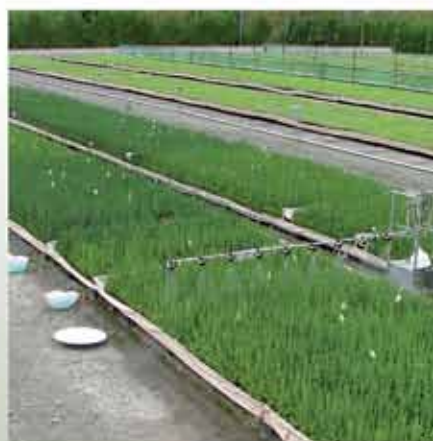


Colloque de transfert de connaissances et de savoir-faire Production de plants forestiers au Québec : **la culture de l'innovation**

Recueil des résumés

www.carrefourforetinnovations.gouv.qc.ca/colloques-themes/production-plants.asp

5 octobre 2011 au Centre des congrès de Québec



Le contenu et les opinions exprimées dans ces textes n'engagent que la responsabilité des auteurs et ne reflètent pas nécessairement la position du ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec.
On peut retrouver le fichier PDF de ce recueil sur le site internet de l'événement.

Organismes impliqués

Ministère des Ressources naturelles et de la Faune (MRNF) du Québec

- Direction de la recherche forestière (DRF)
- Direction générale des pépinières et des stations piscicoles (DGPSP)

Office des producteurs de plants forestiers du Québec (OPPFQ)

Comité organisateur

Mohammed S. Lamhamedi, DRF, MRNF

Fabienne Colas, DRF, MRNF

Julie Gravel-Grenier, DGPSP, MRNF

Dany Paquet, OPPFQ

Claude Gagné, DGPSP, MRNF

Conception graphique du recueil

Maripierre Jalbert, DRF, MRNF

Révision linguistique du recueil

Mario Renaud et Sylvie Bourassa, DRF

Crédits photos page couverture

1	2	3
4	5	6
7	8	9

1 : Anne-Isabelle Bonifassi (U. Laval); 2, 3, 4, 5, 7, 8 : M.S. Lamhamedi (MRNF-DRF);
6 : Daniel Girard (MRNF-DRF); 9 : D. Gélinas (MRNF-DGPSP) et P. Desjardins (MRNF-DRF).

COLAS, F. et LAMHAMEDJ, M.S. (éds.). 2011. *Production de plants forestiers au Québec : la culture de l'innovation. Colloque de transfert de connaissances et de savoir-faire*. Carrefour Forêt Innovations, 4-6 octobre 2011, Québec (Canada). 140 p.

© Gouvernement du Québec

Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, 2011

Dépôt légal – Bibliothèque et Archives nationales du Québec, 2011

ISBN : 978-2-550-62978-8

ISBN (PDF) : 978-2-550-62979-5

Colloque de transfert de connaissances et de savoir-faire
Production de plants forestiers au Québec :
la culture de l'innovation

Recueil des résumés

www.carrefourforetinnovations.gouv.qc.ca/colloques-themes/production-plants.asp

5 octobre 2011 au Centre des congrès de Québec

Le colloque en un coup d'œil

à la salle 202 du Centre des congrès de Québec

5 octobre 2011

Carrefour Forêt Innovations

9 h Mot d'accueil : **Robert Jobidon (DRF)**, **Daniel Richard (DGPSP)** et **Dany Paquet (OPPFQ)**

9 h 15 *Réponses aux principales préoccupations techniques des pépiniéristes du Québec*
Plusieurs conférenciers traiteront de thèmes sélectionnés parmi les questions reçues.

10 h 30 **Pause**

10 h 45 *Les propriétés physiques des substrats affectent-elles la croissance racinaire des plants d'épinette blanche (2+0) en pépinière forestière ?*
Steeve Pépin (U. Laval), Simon Boudreault (U. Laval), Ian Paiement (U. Laval), Jean Caron (U. Laval) et Mohammed S. Lamhamedi (DRF)

11 h 15 *L'utilisation des toiles claires peut-elle augmenter la croissance des racines des plants d'épinette blanche (1+0) en pépinière forestière ?*
Mohammed S. Lamhamedi (DRF), Mario Renaud (DRF), Pascal Desjardins (DRF) et Linda Veilleux (DRF)

11 h 45 **Dîner**

13 h 30 *Évaluation de l'efficacité de la fertilisation foliaire d'urée sur la concentration foliaire en azote des plants d'épinette noire 2+0 en récipients*
Jean Gagnon (DRF)

14 h *Réponses morpho-physiologiques des familles d'épinette blanche aux changements climatiques*
Delphine Boyer-Groulx (U. Laval), S. Carles (U. Laval), M.S. Lamhamedi (DRF), J. Beaulieu (SCF), D.C. Stowe (U. Laval), H.A. Margolis (U. Laval), A. Rainville (DRF), P.Y. Bernier (SCF) et J. Bousquet (U. Laval)

14 h 30 *Existe-t-il des différences entre les vergers à graines d'épinette blanche quant à leurs effets sur la croissance racinaire des plants (2+0) en pépinière forestière ?*
Sylvie Carles (U. Laval), Mohammed S. Lamhamedi (DRF), Jean Beaulieu (SCF), Debbie Stowe (U. Laval) et Hank Margolis (U. Laval)

15 h **Pause**

15 h 15 *Les plants issus de l'embryogenèse somatique : un énorme potentiel à notre portée pour augmenter la productivité forestière !*
André Rainville (DRF), Nadya Wahid (U. Laval), Mohammed S. Lamhamedi (DRF), Guy Prigent (DRF) et Jean Beaulieu (SCF)

15 h 45 *Le développement d'outils moléculaires pour accélérer les programmes d'amélioration génétique des arbres au Québec*
John MacKay (U. Laval), Brian Boyle (U. Laval), Jean Bousquet (U. Laval), Jean Beaulieu (SCF), Nathalie Isabel (SCF), Armand Séguin (SCF) et Martin Perron (DRF)

16 h 15 **Fin du colloque**

Remerciements

Le comité organisateur de ce colloque de transfert de connaissances et de savoir-faire tient à remercier les organisateurs du Carrefour Forêt Innovations pour leur appui et le support logistique durant la journée du colloque. Nous tenons également à remercier toutes les personnes (conférenciers, professionnels, techniciens, etc.) ayant participé de façon active à la réussite de ce colloque et à l'élaboration du contenu de ce recueil.

L'édition de ce recueil est rendue possible grâce à la contribution significative de M^{me} Maripierre Jalbert (MRNF-DRF), responsable de la conception graphique, ainsi que M^{me} Sylvie Bourassa (MRNF-DRF) et M. Mario Renaud (MRNF-DRF) pour la révision linguistique des textes publiés dans ce recueil.

Nous remercions également les membres de l'équipe technique Production de semences et de plants de la DRF pour leur implication dans la réussite de cette journée.

Le comité tient à remercier vivement les gestionnaires de la DRF (MM. Robert Jobidon et Jean-Pierre Saucier) et de la DGPSP (MM. Daniel Richard, François-Noël Perreault) pour leur soutien durant les différentes phases de préparation de ce colloque, ainsi que les principaux commanditaires de ce colloque, notamment le MRNF, IPL inc., ainsi que l'Office des producteurs de plants forestiers du Québec.

Les coûts reliés à l'impression de ce document sont partagés entre la DRF et la DGPSP.

Merci à nos partenaires financiers!

**Ressources naturelles
et Faune**

Québec



Table des matières

Contexte	1
<i>Fabienne Colas et Mohammed S. Lamhamedi</i>	
Objectifs	2
Réponses aux principales préoccupations techniques des pépiniéristes du Québec.	3
L'enrobage des semences pourrait-il être utilisé à une échelle opérationnelle pour faciliter l'ensemencement de précision dans les pépinières forestières du Québec?	5
<i>Fabienne Colas</i>	
Le criblage des semences selon leurs dimensions contribue-t-il à faciliter l'atteinte des objectifs de l'ensemencement de précision?	9
<i>Fabienne Colas et Michèle Bettez</i>	
Effets de la température sur la germination des graines en pépinière forestière	13
<i>Fabienne Colas</i>	
Comment réduire l'étalement de la germination des graines en pépinière forestière?	17
<i>Fabienne Colas</i>	
Risques liés à l'utilisation de la silice : existe-t-il des alternatives?	21
<i>Benoit-Marie Gingras</i>	
Doit-on favoriser l'utilisation d'agents mouillants pour la production de plants forestiers?	23
<i>Benoit-Marie Gingras</i>	
Est-il pertinent de surélever les récipients durant la saison hivernale?	25
<i>Benoit-Marie Gingras</i>	
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?	27
<i>Jean Gagnon et Mohammed S. Lamhamedi</i>	
Les effets de l'augmentation du pH des substrats sur la croissance des plants forestiers produits dans les pépinières forestières	33
<i>Mohammed S. Lamhamedi, Mario Renaud et Linda Veilleux</i>	
Les concentrations foliaires en azote recommandées au Québec pour les essences résineuses produites en récipients sont-elles adéquates?	47
<i>Jean Gagnon et Mohammed S. Lamhamedi</i>	
Prédiction et détermination des seuils de tolérance au gel en automne et techniques de protection contre le gel hivernal	53
<i>Mohammed S. Lamhamedi, Linda Veilleux, Mario Renaud et Pascal Desjardins</i>	
La masse des racines pourrait-elle être utilisée comme un critère de qualité avant la livraison des plants en site de reboisement?	65
<i>Mohammed S. Lamhamedi</i>	
L'enrichissement en CO ₂ est-il envisageable pour améliorer la croissance des plants forestiers dans les pépinières forestières du Québec?	71
<i>Delphine Boyer-Groulx, Mohammed S. Lamhamedi et Hank A. Margolis</i>	
Comment éviter la moisissure nivale dans les pépinières forestières?	75
<i>Louise Innes et Julie Bouchard</i>	

Résumés longs des conférences	77
Les propriétés physiques des substrats affectent-elles la croissance racinaire des plants d'épinette blanche (2+0) en pépinière forestière?	79
<i>Steeve Pépin, Simon Boudreault, Ian Paiement, Jean Caron et Mohammed S. Lamhamedi</i>	
L'utilisation des toiles claires peut-elle augmenter la croissance des racines des plants d'épinette blanche (1+0) en pépinière forestière?	87
<i>Mohammed S. Lamhamedi, Mario Renaud, Pascal Desjardins et Linda Veilleux</i>	
Évaluation de l'efficacité de la fertilisation foliaire d'urée sur la concentration foliaire en azote des plants d'épinette noire en récipients 2+0	97
<i>Jean Gagnon</i>	
Réponses morpho-physiologiques des familles d'épinette blanche aux changements climatiques	107
<i>Delphine Boyer-Groulx, Sylvie Carles, Mohammed S. Lamhamedi, Jean Beaulieu, Debbie C. Stowe, Hank A. Margolis, André Rainville, Pierre-Yves Bernier et Jean Bousquet</i>	
Existe-t-il des différences entre les vergers à graines d'épinette blanche quant à leurs effets sur la croissance racinaire des plants (2+0) en pépinière forestière?	113
<i>Sylvie Carles, Mohammed S. Lamhamedi, Jean Beaulieu, Debbie C. Stowe et Hank A. Margolis</i>	
Les plants issus de l'embryogenèse somatique : un énorme potentiel à notre portée pour augmenter la productivité forestière !	119
<i>André Rainville, Nadya Wahid, Mohammed S. Lamhamedi, Guy Prégent et Jean Beaulieu</i>	
Le développement d'outils moléculaires pour accélérer les programmes d'amélioration génétique des arbres au Québec	125
<i>John MacKay, Brian Boyle, Philippe Rigault, Jean Bousquet, Jean Beaulieu, Nathalie Isabel, Armand Séguin et Martin Perron</i>	
Stands en lien avec le thème du colloque.	131

Contexte

Fabienne Colas et Mohammed S. Lamhamedi

Direction de la recherche forestière, ministère des Ressources naturelles et de la Faune, 2700 rue Einstein, Québec (Québec) G1P 3W8

Au Québec, environ 150 millions de plants forestiers sont produits chaque année par six pépinières publiques du ministère des Ressources naturelles et de la Faune (MRNF), et 15 pépinières privées regroupées au sein de l'Office des producteurs de plants forestiers du Québec (OPPFQ). Les plants sont destinés à la remise en production des aires forestières qui se régénèrent mal naturellement. Environ 15 à 20 % des superficies coupées annuellement sont reboisées afin de garantir une régénération suffisante, en quantité et en qualité.

Grâce aux acquis obtenus dans les programmes d'amélioration génétique, la proportion de plants produits à partir de semences améliorées génétiquement est en constante augmentation. Ces semences sont produites dans le réseau de vergers à graines implanté par la Direction générale des pépinières et des stations piscicoles (DGPSP) du MRNF, à l'échelle de la province du Québec dès le début des années 1980. Les plants, produits en récipients et à racines nues, doivent répondre, au moment de leur mise en terre, à des critères de qualification morphologiques et physiologiques complets et intégrateurs établis par le Ministère.

Au Québec, depuis plus de 30 ans, le transfert de connaissances auprès des pépinières, qu'elles soient privées ou publiques, est assuré, dans la majorité des cas, par le MRNF en collaboration avec d'autres centres de recherche. Ce transfert d'expertises et de savoir-faire répond aux besoins de connaissances spécifiques à des problématiques opérationnelles émis par les pépiniéristes forestiers du Québec. Différents moyens sont utilisés : publications scientifiques et techniques, visites sur le terrain, comités techniques, colloques, réunions annuelles de l'OPPFQ ou jour-

nées de formation sur un thème spécifique. De plus, une assistance et un accompagnement auprès des pépiniéristes est assuré de façon continue par le MRNF afin que les acquis de la recherche dans le domaine de la production de semences et de plants soient régulièrement intégrés aux opérations courantes des pépinières forestières, afin d'améliorer la qualité des plants produits, ainsi que leur rentabilité. Citons par exemple des nouveaux outils informatiques de gestion de la fertilisation, de quantification du lessivage et de l'irrigation des cultures en récipients, le développement de chartes de tolérance au gel des plants, l'élaboration de standards de culture, la détermination des besoins en eau et en éléments minéraux des principales essences forestières.

En 2004, la DGPSP a mis en place une unité opérationnelle de production de plants forestiers par embryogenèse somatique (ES) en mettant l'accent, dans une première phase, sur l'épinette blanche. L'ES est une technique de culture *in vitro* qui ne fait pas appel aux modifications génétiques. Dans un premier temps, les plants produits sont évalués dans des tests de variétés où les meilleurs sont sélectionnés. Le Québec préconise la sélection précoce, dès le stade de la pépinière, afin d'accélérer l'intégration de ces plants de très haute qualité génétique tout en maintenant des coûts compétitifs. Le modèle d'intégration de l'ES dans la filière de reboisement au Québec est unique au monde. De plus, les résultats obtenus via la génomique fonctionnelle viendront bonifier les programmes d'amélioration génétique en permettant une sélection précoce et très ciblée de caractères recherchés chez les essences utilisées dans le reboisement (qualité du bois, longueur de la fibre...).

Objectifs

Organisé conjointement par la Direction de la recherche forestière et la Direction générale des pépinières et stations piscicoles, toutes deux du ministère des Ressources naturelles et de la Faune, ainsi que par l'Office des producteurs de plants forestiers du Québec, ce colloque s'adresse aux spécialistes et chercheurs du domaine des pépinières et du reboisement, ainsi qu'aux producteurs et utilisateurs de plants forestiers. Plus spécifiquement, ce colloque a comme objectif de présenter les résultats de plusieurs projets de recherche et de développement, certains réalisés de concert avec d'autres centres de recherche et des pépinières privées et publiques. Les conférences présenteront :

- des réponses aux principales préoccupations techniques des pépiniéristes du Québec;
- l'influence des propriétés physiques des substrats sur la croissance racinaire de l'EPB 2+0;
- les effets de l'utilisation des toiles claires sur le développement racinaire des plants d'EPB en 1+0;
- l'effet de la fertilisation foliaire à base d'urée sur la concentration foliaire en azote de plants d'EPN 2+0;
- l'effet potentiel de l'origine génétique des semences d'EPB sur la croissance racinaire en 2+0;
- la réponse morpho-physiologique de familles d'EPB aux changements climatiques;
- le potentiel des plants d'EPB issus d'embryogenèse somatique;
- le développement d'outils de génétique moléculaire pour accélérer les programmes d'amélioration génétique.

Réponses aux principales préoccupations techniques des pépiniéristes du Québec

Dans le cadre de ce colloque, le comité organisateur a voulu mettre l'accent sur les principales préoccupations techniques des pépiniéristes du Québec afin de leur fournir des éléments de solutions et des recommandations pratiques à leur portée.

La cueillette de ces préoccupations techniques a été effectuée auprès de toutes les pépinières forestières du Québec en février et en juin 2011. Les questions retenues ont obligatoirement une préoccupation à caractère technique, qui n'est pas en relation directe avec l'établissement des normes et critères de qualification des plants. Le comité a essayé de trouver un équilibre entre les différents thèmes et les différentes étapes de production de plants (semences, régies de cultures, etc.) représentatifs des préoccupations techniques de la majorité ou d'une partie des producteurs de plants forestiers du Québec.

Selon les sujets, certaines préoccupations ont été regroupées ou scindées. Elles ont été traitées par différents experts qui ont accepté de répondre aux différentes préoccupations décrites dans cette section à notre demande et nous leurs en sommes très reconnaissants. Au cours de la journée le jour du colloque, certaines de ces préoccupations feront l'objet de courtes présentations orales, suivies d'une période d'échange entre les experts et les pépiniéristes.

Nous sommes convaincus que les éléments de solutions et les recommandations décrites dans cette section dédiée à vos préoccupations, vont susciter votre intérêt pour mettre en application les recommandations proposées, et les améliorer au fil des saisons de croissance.

Préoccupation	Auteur(s)
L'enrobage des semences pourrait-il être utilisé à une échelle opérationnelle pour faciliter l'ensemencement de précision dans les pépinières forestières du Québec ?	F. Colas
Le criblage des semences selon leurs dimensions contribue-t-il à faciliter l'atteinte des objectifs de l'ensemencement de précision ?	F. Colas et M. Bettez
Effets de la température sur la germination des graines en pépinière forestière	F. Colas
Comment réduire l'étalement de la germination des graines en pépinière forestière ?	F. Colas
Risques liés à l'utilisation de la silice : existe-t-il des alternatives ?	B.M. Gingras
Doit-on favoriser l'utilisation d'agents mouillants pour la production de plants forestiers ?	B.M. Gingras
Est-il pertinent de surélever les récipients durant la saison hivernale ?	B.M. Gingras
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 ?	J. Gagnon et M.S. Lamhamedi
Les effets de l'augmentation du pH des substrats sur la croissance des plants forestiers produits dans les pépinières forestières	M.S. Lamhamedi, M. Renaud, L. Veilleux
Les concentrations foliaires en azote recommandées au Québec pour les essences résineuses produites en récipients sont-elles adéquates ?	J. Gagnon et M.S. Lamhamedi
Prédiction et détermination des seuils de tolérance au gel en automne et techniques de protection contre le gel hivernal	M.S. Lamhamedi, L. Veilleux, M. Renaud, P. Desjardins
La masse des racines pourrait-elle être utilisée comme un critère de qualité avant la livraison des plants en site de reboisement ?	M. S. Lamhamedi
L'enrichissement en CO ₂ est-il envisageable pour améliorer la croissance des plants forestiers dans les pépinières forestières du Québec ?	D. Boyer-Groulx, M.S. Lamhamedi, H.A. Margolis
Comment éviter la moisissure nivale dans les pépinières forestières ?	L. Innes et J. Bouchard

L'enrobage des semences pourrait-il être utilisé à une échelle opérationnelle pour faciliter l'ensemencement de précision dans les pépinières forestières du Québec ?

Fabienne Colas^{1,2,3}



Fabienne Colas a obtenu en 1984 un diplôme de technicienne en biotechnologie à l'École Nationale de Chimie de Paris. Elle a obtenu une maîtrise ès biologie génétique appliquée à l'Université Paris 7 Jussieu en 1988. En 1990, le même établissement lui décernait un diplôme d'études supérieures spécialisées en génétique et physiologie végétale.

Au Québec, après cinq saisons comme assistante de recherche, elle est à l'emploi de la Direction de la recherche forestière depuis 1998 comme chercheur.

Ses travaux de recherche portent sur la conservation des semences destinées au programme de reboisement et également à la conservation de la diversité génétique forestière ; l'intégration de l'embryogenèse somatique dans la gestion des vergers à graines; ainsi que l'optimisation des conditions culturales des semenciers dans les vergers à graines hors sol de mélèze.

¹ Direction de la recherche forestière, ministère des Ressources naturelles et de la Faune, 2700 rue Einstein, Québec (Québec) G1P 3W8

² fabienne.colas@mrnf.gouv.qc.ca

³ 418 643 7994 poste 6526

Semer de petites graines augmente la difficulté d'obtenir un ensemencement de précision. Avec près de 60 millions de plants produits annuellement, l'épinette noire (EPN) est l'essence la plus importante pour le programme de reboisement du Québec. Les graines d'EPN sont de petites dimensions : pour les sources améliorées on a, en moyenne, de 700 à 800 000 semences par kilogramme; pour les non améliorées, il s'agit plutôt de 1 000 000 semences/kg.

Les pourcentages de germination (PG) obtenus avec les lots d'EPN dans les pépinières forestières sont dans leur très grande majorité supérieurs à 97 % et souvent très proches de 100 %. Avec de tels PG, il est envisageable de réduire le facteur d'ensemencement en allant même jusqu'à semer une graine par cavité sans nuire au taux d'occupation des cavités. Des pépinières publiques et privées se sont équipées de semoirs de précision afin de faciliter l'atteinte de cet objectif d'une graine par cavité. Ceci entraînerait des économies très importantes tant pour la Direction générale des pépinières et des stations piscicoles (DGPSP; réduction des récoltes) que pour les pépinières (élimination de l'opération d'éclaircie qui est très onéreuse).

Des pépinières publiques et privées se sont équipées de semoirs de précision. Une des avenues envisagées pour faciliter l'atteinte de l'objectif d'une graine par cavité est d'utiliser des semences enrobées. L'enrobage uniformiserait les dimensions des graines et favoriserait la précision à l'ensemencement.

Des essais avec des graines enrobées au Québec en 2006 et 2007

La pépinière privée de Guyenne a initié un essai d'enrobage en 2006 avec des semences de pin gris (PIG) et d'EPN. Le semoir utilisé alors était de type conventionnel. Les graines, fournies par la DGPSP, avaient été enrobées par un fournisseur de Colombie-Britannique (Happel Seed Coating; HAPPEL, 2001) à l'aide d'un substrat à base d'argile dont la composition exacte ne nous a pas été communiquée (Figure 1). Si le taux d'occupation a été maximum (100 %), la germination a été décevante, que les graines aient été enrobées ou non.

En 2007, un deuxième essai impliquant trois pépinières (Guyenne, Boucher et Girardville) a eu

Colas, F., 2011. *L'enrobage des semences pourrait-il être utilisé à une échelle opérationnelle pour faciliter l'ensemencement de précision dans les pépinières forestières du Québec ?* Dans : Colas, F.; Lamhamedi, M.S. (éds.), 2011. Production de plants forestiers au Québec : la culture de l'innovation. Colloque de transfert de connaissances et de savoir-faire. Carrefour Forêt Innovations, 4-6 octobre 2011, Québec (Canada), 140 p. pp : 5 – 7.

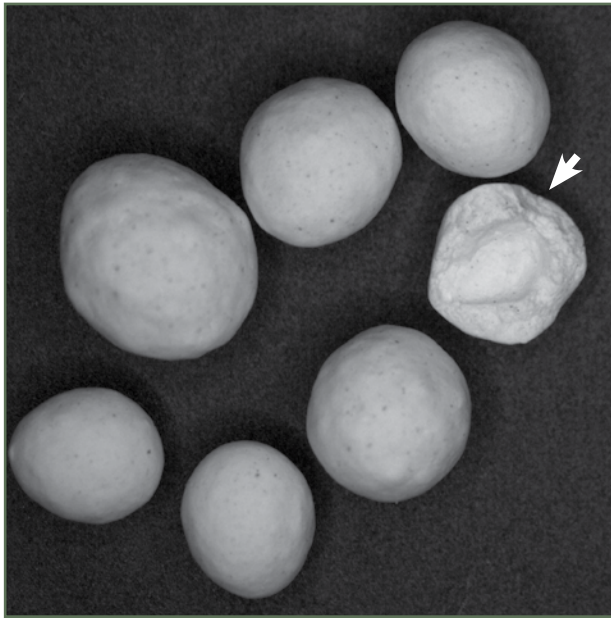


Figure 1. Graines d'épinette noire ayant été enrobées à l'aide d'un substrat à base d'argile (fournisseur Happel Seed Coating). On peut remarquer l'hétérogénéité des dimensions des « boulettes » et la présence de débris d'argile (flèche). Photo F. Colas (MRNF).

lieu avec le même type d'enrobage, l'ensemencement a été effectué à l'aide de semoirs conventionnels. Une étude parallèle a été menée au Centre de semences forestières de Berthier (CSFB), avec les graines utilisées pour la production de Girardville, afin de vérifier la qualité de l'enrobage (nombre de graines par « boulette »), la vitesse de dissolution du substrat et la germination en milieu contrôlé.

En pépinière, les résultats sont similaires à ceux obtenus à Guyenne en 2006, soit une germination ralentie et réduite.

Au laboratoire, il a été montré que :

- l'enrobage fait plus que doubler le diamètre des graines,
- près de 10 % des « boulettes » ne contiennent pas de semences soit autant de cavités vides,
- en conditions contrôlées, la germination et la vigueur germinative des graines enrobées sont plus faibles que les non enrobées.

Ces résultats montrent que l'enrobage testé dans le cadre de ces essais permet une augmentation significative des dimensions des graines, mais que la germination est altérée réduisant ainsi le taux d'occupation des cavités par les semis (BETTES et SAVARY 2006). Également, on peut constater une grande hétérogénéité dans les dimensions des « boulettes » (Figure 1), ainsi que la présence de débris d'enrobage (Figure 1), la présence de « boulettes » ne contenant

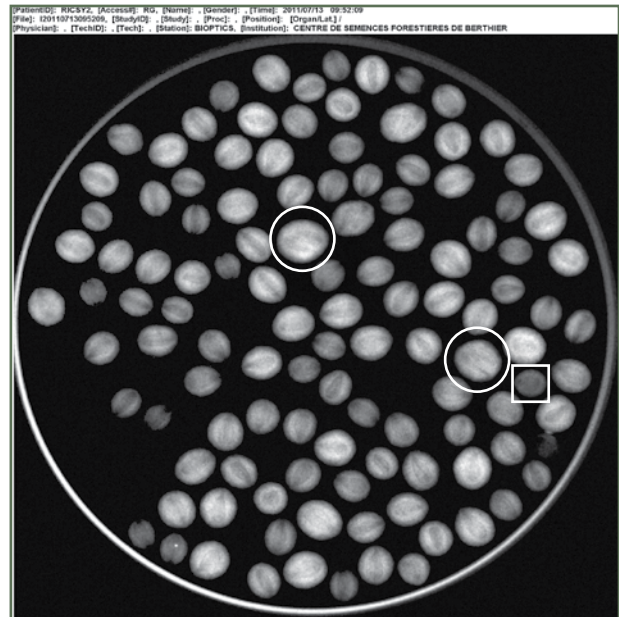


Figure 2. Vue, aux rayons X de graines enrobées d'EPN utilisées lors de l'essai réalisé à la pépinière de Girardville en 2007. Sur ce cliché on retrouve des « boulettes » comprenant 2 graines (encadrées) et vides (encadrée). Photo CSFB.

pas de graines ou bien en ayant deux (Figure 2). Bien que les graines enrobées aient permis un ensemencement de précision, le matériau d'enrobage utilisé dans ces essais n'est pas adéquat pour les étapes de la germination des semences forestières de l'épinette noire utilisées à une échelle opérationnelle.

L'enrobage dans le domaine forestier en dehors du Québec

Depuis 2007-2008, des échanges ont été réalisés avec des collaborateurs canadiens et européens au sujet de l'enrobage puisque ce sujet est d'intérêt pour plusieurs pépinières du Québec. Les réponses sont diverses.

Par exemple, des essais ont été réalisés, chez Irving¹ au Nouveau Brunswick, mais comme les entreprises d'enrobage ne peuvent garantir que 100 % des « boulettes » contiennent une graine, l'entreprise a préféré se tourner, avec succès, vers l'ensemencement de précision.

Chez Vilmorin² en France, des essais ont également été entrepris sur les semences d'arbres, mais ceux-ci ont mis en évidence un effet négatif de l'enrobage sur la germination (tout comme ce qui a été observé au Québec et ailleurs). Les coûts de mise au point de la formulation du substrat d'enrobage sont très élevés, ce qui a été jugé peu rentable pour le

¹ Information reçue de M. Kendall Brown le 26 octobre 2007

² Information reçue de M. Nicolas Vionnet le 9 mars 2010

volet forestier de leurs semences. Cela dit, Vilmorin réalise des enrobages pour les semences potagères, mais le volume des ventes et les coûts des semences permettent ces investissements.

En Colombie-Britannique³, seules deux essences ont leurs graines enrobées : le cèdre rouge (*Thuja plicata*) et l'aulne rouge (*Alnus rubra*). Le substrat utilisé est à base d'argile. L'entreprise qui réalise l'enrobage est Happel Seed coating (HAPPEL 2001), celle qui a enrobé les graines qui ont été testées au Québec en 2006 et 2007. Il n'est pas fait mention des résultats de germination.

Plusieurs références bibliographiques font état d'essais d'enrobage de graines forestières non pas pour la production de plants en pépinière, mais pour augmenter les chances de succès d'un ensemencement aérien. L'objectif est donc bien différent. Dans ce cas, le mélange d'enrobage va contenir des produits permettant une protection des graines contre les rongeurs, les champignons et ce, jusqu'à leur germination (ADAMS 1995, PAMUK et BERGSTEN 2002).

Nous pouvons donc constater que l'enrobage de graines forestières n'est pas une avenue qui est privilégiée au niveau international pour la production de plants en pépinière forestière.

L'enrobage dans le domaine horticole

Dans le domaine horticole, le portrait est différent. En effet, même si le coût des graines est très élevé, le prix de vente des produits finis (plants ou récoltes réalisées sur les plants) l'est également ce qui rend le coût de la semence marginal dans le prix final. Il n'en est pas de même pour la production de plants forestiers puisque le prix de revient est faible.

Il faut faire la différence entre le domaine de la production de plants forestiers et le domaine horticole où la tendance actuelle serait plutôt pour le pelliculage. Il s'agit de recouvrir les semences d'un mince film qui contient des composés comme des phytocides qui permettent aux graines d'avoir un environnement favorable lors de leur germination. Cependant, ce traitement ne modifie pas les dimensions des graines et ne présente donc pas d'intérêt pour faciliter la précision à l'ensemencement.

Conclusion

Enrober les graines forestières pour faciliter un ensemencement de précision est une solution qui paraît séduisante. Comme les essais l'ont démontré, le défi est de disposer d'un matériau d'enrobage permettant à la fois d'uniformiser les dimensions des

graines, de garantir que l'on ait qu'une seule graine par « boulette » et, surtout, qui ne nuise pas à la vitesse et au taux de germination des graines. Actuellement, ce produit miracle n'existe pas, ou s'il existe, le secret est bien gardé! Le développement d'un tel matériau est un travail très important qui nécessiterait des investissements substantiels sans garantie de rentabilité.

Dans le contexte actuel, il est plus rentable de poursuivre les travaux en pépinière sur la précision de l'ensemencement selon les recommandations qui ont émané des travaux sur la modification des facteurs d'ensemencement depuis 2005 (COLAS *et al.* 2007). Dans ces essais, nous avons montré qu'un ensemencement de précision est possible à condition d'y accorder de l'importance dans les opérations des pépinières.

Dans le même temps, l'attention pourrait être portée à l'homogénéisation des dimensions de graines dans les lots d'EPN à l'aide d'un criblage précis quitte à livrer des lots séparés par calibre comme cela a déjà été fait pour l'épinette blanche.

Un texte ayant pour thème le criblage est également contenu dans ce recueil.

Références

- ADAMS, M.J. 1995. *Seed treatments have potential for direct seeding*. Natural resources Canada, Canadian Forest Service-Ontario 4 p.
- BETTES, M. et A. SAVARY, 2006. *L'enrobage des semences forestières : une voie d'avenir ???* Des plants et des hommes 9(3) : 22-25.
- COLAS, F., M. BETTES et A. SAVARY, 2007. *Bilan des productions opérationnelles d'épinette noire et de pin gris ensemencées en 2007 avec différents facteurs d'ensemencement dans deux pépinières publiques*. Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Direction de la recherche forestière, Avis technique. 12 p. <http://www.mrnf.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Colas-Fabienne/Avis-techn-facteurs-2007.pdf>
- HAPPEL, C., 2001. *Seed pelleting*. Tree Seed Working Group NewsBulletin 34: 16-17.
- PAMUK, G.S. et U. BERGSTEN, 2002. *Coated Scots Pine seeds makes autumn direct seedling possible*. Dans: 2002 Annual meeting of IUFRO 2.09.00. Research Group for Seed Physiology and Technology. 11-15 september, 2002, Chania, Crète. Edité par C. A. Thanos, T. L. Beardmore, K. F. Connor et E. L. J. Tolentino. pp. 116.

³ Information reçue de M. Dave Kolotelo le 22 octobre 2007

Le criblage des semences selon leurs dimensions contribue-t-il à faciliter l'atteinte des objectifs de l'ensemencement de précision ?

Fabienne Colas^{1,3,4} et Michèle Bettez²

¹ Direction de la recherche forestière, ministère des Ressources naturelles et de la Faune, 2700 rue Einstein, Québec (Québec) G1P 3W8

² Centre de semences forestières de Berthier, Direction générale des pépinières et stations piscicoles, MRNF, 1690, chemin Grande Côte, Ste-Geneviève de Berthier (Québec) J0K 1A0

³ fabienne.colas@mrnf.gouv.qc.ca

⁴ 418 643 7994 poste 6526

La photo et la note biographique complète du 1^{er} auteur sont présentées à la page 5.

Depuis 2003, la qualité des semences utilisées pour le reboisement au Québec a été fortement améliorée tant pour la germination, que la qualité génétique. Dans le même temps, une orientation a été prise pour réduire les coûts de production afin d'améliorer la rentabilité des pépinières forestières et de la filière des semences au Québec. Côté semences, l'accent a été mis sur l'optimisation des facteurs d'ensemencement (FE) utilisés en pépinières. Le FE est le nombre de semences viables allouées pour produire un plant. Jusqu'en 2005, les FE utilisés pour les essences résineuses étaient de 2,5 ou 3,2 semences viables par cavité (s.v./cavité) selon le niveau d'amélioration génétique des semences (améliorées ou non).

Les travaux sur la mise à jour des FE ont débuté en 2003. Ils étaient facilités par l'amélioration significative de la germination des lots extraits au Centre de semences forestières de Berthier (CSFB). Des essais techniques avec des FE réduits ont ainsi été réalisés à une échelle opérationnelle dans les six pépinières publiques durant trois ans. Ces travaux ont abouti à une révision des FE utilisés pour les trois principales essences du programme de reboisement (épinette noire [EPN], pin gris [PIG] et épinette blanche [EPB]). Celle-ci a mis l'accent sur les possibilités de réduction du nombre de semences viables utilisées pour produire un plant, sans toutefois nuire à l'atteinte des objectifs de production. Ceci entraînerait des économies très importantes tant pour la Direction générale des pépinières et des stations piscicoles (DGPSP ; réduction des coûts liés aux récoltes) que pour les pépinières (élimination de l'opération d'éclaircie qui est très onéreuse).

En 2005, une première réduction des FE a été déterminée à 2,5 s.v./cavité pour tous les lots d'EPN, EPB et PIG quel que soit le type de source (améliorée ou non). Auparavant, le FE des sources non améliorées était de 3,2. La réduction s'est poursuivie pour l'EPN et le PIG seulement (voir Tableau 1 pour les FE 2011), le FE pour l'EPB étant maintenu à 2,5 s.v./cavité.

Le travail d'amélioration des procédures d'extraction s'est poursuivi au CSFB. Il a permis des gains significatifs pour les pourcentages de germination (PG) des lots extraits, et ce pour toutes les essences incluant le pin gris. Les principales modifications ont porté sur la durée et l'intensité du passage en tarare, la méthode de désilage ainsi que le séchage final.

COLAS, F. et M. BETTEZ, 2011. *Le criblage des semences selon leurs dimensions contribue-t-il à faciliter l'atteinte des objectifs de l'ensemencement de précision ?* Dans : Colas, F.; Lamhamedi, M.S. (éds.), 2011. Production de plants forestiers au Québec : la culture de l'innovation. Colloque de transfert de connaissances et de savoir-faire. Carrefour Forêt Innovations, 4-6 octobre 2011, Québec (Canada), 140 p. pp : 9 – 12.

Tableau 1. Facteurs d'ensemencement utilisés en 2011 pour la majorité de la production de plants d'épinette noire et de pin gris selon le type de récipient et les pépinières de production. Des modalités particulières sont en vigueur pour les pépinières ayant acquis un semoir de précision (Source A. Savary DGPSP).

Essence	Pépinières	PG ¹ du lot ≥ 90%				PG du lot < 90%
		113-25	67-50	45-110	Autres récipients	Tous les récipients
Épinette noire	PPU ²	2,0			2,5	2,5
	PPR ³	2,2			2,5	
Pin gris	PPU	2,0	2,0	2,0	2,5	
	PPR	2,2	2,2	2,0	2,5	
Autres essences	PPU et PPR	2,5				

¹ PG = pourcentage de germination, ²PPU = pépinières publiques, ³ PPR = pépinières privées

Depuis 2010, quelques pépinières ont acquis un semoir de précision, rendant possible l'usage à grande échelle du FE de 1 s.v./cavité pour les lots dont le taux de germination est supérieur à 95 %.

Un des facteurs clé dans la réussite de la nouvelle méthode de travail à l'aide des semoirs de précision réside dans l'utilisation de semences homogènes en forme et volume. Comme le producteur vise 1 semence par cavité, il est primordial que cela se matérialise dans 100 % des cas afin de limiter les cavités vides qui autrement seront coûteuses pour lui. Ainsi, nous avons concentré nos efforts pour perfectionner le criblage des semences d'épinette noire, qui contrairement au pin gris, produit des semences de grosseurs variables dans un même lot.

Le criblage des semences d'EPN n'est pas réalisé de façon systématique car il ne présente pas d'avantage opérationnel pour les pépinières qui ne sont pas équipées de semoirs de précision. Ainsi la fourniture de graines d'EPN criblées selon leurs dimensions, c'est-à-dire séparées par grosseur, pourrait être avantageuse pour les pépiniéristes équipés de semoirs de précision seulement. En effet, cela aiderait la performance du semoir en permettant un meilleur ajustement et limitant le nombre de cavités vides ou ensemencées en double lors d'un ensemencement à une graine par cavité.

Nous avons voulu déterminer si le criblage qui peut actuellement être réalisé au CSFB est fiable et utile pour améliorer la précision de l'ensemencement réalisé avec des semoirs de précision. Dans un premier temps, un essai opérationnel a été réalisé avec l'EPN; l'ensemencement a été effectué à la pépinière de Normandin.

Méthode de criblage utilisée au CSFB

Le criblage est réalisé avec un crible BCC (Figure 1).



Figure 1 : Crible BCC utilisé au CSFB pour la réalisation de la séparation des graines par grosseur. Photo M. Bettez.

La séparation des calibres de semences se déroule en trois étapes successives (Figure 2).

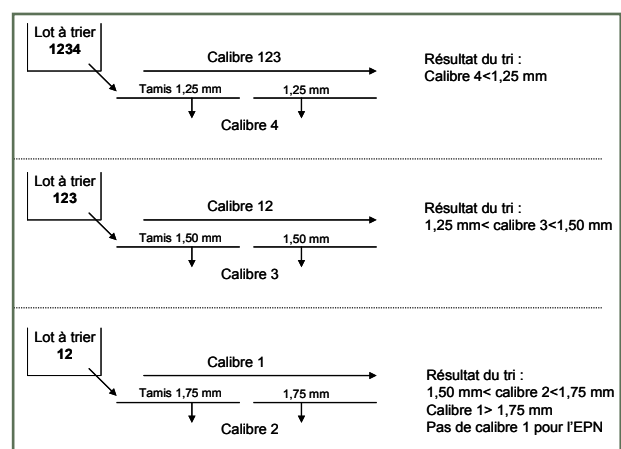


Figure 2 : Méthode de séparation par calibre des semences d'épinette noire au CSFB à l'aide du crible BCC. La séparation par calibre est effectuée en trois étapes successives. Deux tamis de même grosseur sont utilisés à chaque étape.

Le premier tamis permet de cribler les plus petites semences (<1,25 mm, calibre 4). Le lot sans les petites graines est ensuite criblé à nouveau avec un crible de mailles plus larges (1,50 mm); on crible alors les graines de calibre 3 (1,25 mm<calibre 3<1,50 mm). Le lot est à nouveau criblé afin de récupérer les graines de calibre 2 (1,50 mm<calibre 2<1,75 mm). À noter que pour l'EPN, on ne retrouve pas de graines dont le diamètre est supérieur à 1,75 mm, même pour les sources améliorées.

Essai technique opérationnel

Dans le cadre d'un essai technique opérationnel, six sources d'EPN (trois vergers et trois sources naturelles) ont été choisies parmi celles qui seront allouées au cours des prochaines années.

Un kg de semences de chaque source a été criblé sur le crible BCC au CSFB. Chaque lot, et ce pour chaque passage, a été criblé à deux reprises (deux répétitions) afin de vérifier la reproductibilité du traitement et donc sa fiabilité.

Les graines séparées obtenues ont été analysées avec le logiciel de traitement de l'image Winseedle® pour déterminer leurs dimensions.

Pour obtenir un résultat reproductible, la vitesse de criblage a été réduite. En effet, si la vitesse est maintenue à la hauteur de celle utilisée pour la séparation des graines préalable à l'élimination des graines vides, les graines plus petites passent trop vite sur le tamis sans passer à travers les mailles. Dans ces conditions, le criblage réalisé au CSFB est fiable. L'efficacité de la séparation est similaire pour les graines de sources naturelles et de vergers. On constate une faible pollution entre les calibres, c'est-à-dire présence d'un faible pourcentage de semences de plus faible calibre parmi les semences plus grosses.

Qu'en est-il à l'ensemencement?

La pépinière de Normandin possède un semoir de précision de marque Mosa. Une partie des graines ensemencées à la pépinière l'a été avec le facteur 1,0. Les graines ont été fournies en deux lots : calibre 4 seul, calibre 1, 2 et 3 regroupés. En effet, pour l'EPN il n'y a pas de calibre 1 et la quantité de calibre 2 est insuffisante pour réaliser un ensemencement (moins de 10 % du lot). Selon les commentaires reçus, le criblage est acceptable mais pas suffisant pour avoir un ensemencement de haute précision. Il reste un peu de pollution entre les calibres. La pépinière a fait un criblage manuel supplémentaire des graines envoyées par le CSFB, à l'aide de tamis fabriqués avec des grillages en acier inoxydable ayant des mailles carrées de 10-12 mm environ. Ceci a permis d'éli-

miner les petites graines du calibre 1, 2, et 3 et aussi permis une meilleure précision de l'ensemencement.

Lors du criblage apparaît une poussière fine résultant du frottement des graines. Cette poussière nuit à l'ensemencement. Lors du criblage supplémentaire réalisé à Normandin, cette poussière a été, en partie éliminée. Avec le PIG, un court trempage des graines a permis d'éliminer toute la poussière.

Influence de la grosseur de la graine sur le gabarit du plant

Un autre intérêt potentiel du criblage serait de permettre la culture des graines par calibre, ce qui pourrait avoir un effet positif sur l'uniformité des gabarits produits. Ceci faciliterait également l'optimisation des régies de culture (fertilisation et irrigation). Ainsi, par exemple, le pépiniériste pourrait ajuster son calendrier de fertilisation selon l'évolution de la croissance en hauteur et les standards de croissance ciblées à la fin de saison de croissance.

Chez l'épinette de Norvège (*P. abies*), la taille de la graine a peu d'incidence sur la croissance précoce du semis et, après un an, la performance du semis dépend d'un effet exclusivement maternel (MULLER et SCHULTZE 1996). Pour l'épinette de Sitka (*P. sitchensis*), on ne remarque pas d'effet de la grosseur de la graine sur la grosseur du plant après huit mois de culture (CHAISSURISRI *et al.* 1994). Au Québec, pour la production de plants d'épinette blanche (*P. glauca*) dont les semences sont de familles uniparentales ou biparentales, nous avons montré qu'il est intéressant de cultiver les graines les plus petites (calibre 4) séparément (LAMHAMEDI *et al.* 2005). En effet, ces graines produisent des plants de plus petit gabarit qu'il est plus facile de cultiver à part. Il est important de semer tout de même les petites graines, car si on les élimine, on va éliminer d'emblée une partie de la variabilité génétique (MULLER et SCHULTZE 1996). Cet effet de la grosseur de la graine sur le gabarit du plant n'est pas marqué chez l'EPN, le criblage ne présente pas d'intérêt pour faciliter la culture des plants; son intérêt réside dans la facilité de l'ensemencement de précision.

Conclusion et portée opérationnelle des résultats préliminaires

Le criblage des semences est un outil fiable à privilégier pour favoriser l'ensemencement de précision pour les pépinières possédant des semoirs de précision.

Dans les conditions actuelles, et à condition de ralentir la vitesse du criblage, le CSFB réalise un criblage de qualité, reproductible, qui pourrait

être complété par un nettoyage supplémentaire des semences pour éliminer la poussière générée par le frottement entre les graines lors de l'opération.

En ayant un ensemencement de précision les pépinières et la DGPSP réalisent des économies substantielles :

- pépinières : semer une semence par cavité réduit l'opération d'éclaircie qui est très coûteuse ;
- DGPSP : fournir moins de semences pour atteindre le même objectif de production se traduit par des économies substantielles dans les coûts d'établissement de sources, de récolte et de traitement des lots.

Essais opérationnels à réaliser

Avant de généraliser l'offre de criblage, il est nécessaire de vérifier, sur plusieurs lots, dans des pépinières différentes et à l'aide de semoirs de précision différents, si l'effet positif de ce traitement additionnel justifie l'investissement par le CSFB.

Remerciements

Nous tenons à souligner le travail réalisé par Pierre Comtois de la pépinière de Normandin lors de l'essai d'ensemencement avec les semences criblées.

Information complémentaire (fournie par Pierre Comtois)

Fournisseur du grillage pour la fabrication de tamis :

- Vision Technique KLEIN inc,
Montréal 514 642 0409
- Coût = 5 \$ /pied carré, le matériel se vend en largeur de 48 pouces.
- Ouverture des mailles : 14 mesh = 1,310 mm,
22 T = 0,964 mm

Références

CHAISIRISRI, K., D.G. EDWARDS et Y.A EL-KASSABY, 1994. *Effects of seed size on seedling attributes in Sitka spruce*. New Forests 8(1): 81-87.

LAMHAMED, M.S., F. COLAS et D. TOUSIGNANT, 2005. *Caractérisation de la croissance des pieds-mères d'épinette blanche issus de croisements dirigés : 1- Approche méthodologique*. Direction de la recherche forestière, Avis technique 10 p.

MULLER, F. et U SCHULTZE, 1996. *Effects of seed size fractionation on early test traits and seedling development from descendants of Norway spruce seed stands originating from different altitudes*. Centralblatt-fur-das-Gesamte-Forstwesen 113(3-4): 155-174.

Effets de la température sur la germination des graines en pépinière forestière

Fabienne Colas^{1,2,3}

¹ Direction de la recherche forestière, ministère des Ressources naturelles et de la Faune, 2700 rue Einstein, Québec (Québec) G1P 3W8

² fabienne.colas@mrnf.gouv.qc.ca

³ 418 643 7994 poste 6526

La photo et la note biographique complète de l'auteur sont présentées à la page 5.

Les principaux facteurs qui influencent la germination des semences sont, par ordre d'importance décroissante : l'humidité (teneur en eau de la graine et du substrat), la température, la lumière et l'aération autour de la graine (BONNER 2008).

Lors de l'ensemencement au printemps, les conditions climatiques peuvent être très variables, notamment la température. De plus, dans le contexte des changements climatiques, les conditions prévalant au printemps sont devenues assez imprévisibles d'une année à l'autre.

Qu'en est-il de l'effet de la température sur la germination des graines des principales essences utilisées dans le programme de reboisement du Québec ? Y a-t-il des seuils critiques de températures ?

En 2003, la Direction de la recherche forestière, en collaboration avec le Centre de semences forestières de Berthier (CSFB), a réalisé des essais, en milieu contrôlé, afin d'évaluer l'effet de 6 températures (10, 15, 20, 25, 30 et 35 °C) sur la germination de 6 lots représentatifs des trois principales essences utilisées dans le programme de reboisement du Québec, soit les épinettes blanche et noire (EPB, EPN) et le pin gris (PIG). La température était maintenue constante pour toute la durée du test, la période en présence de lumière était de 16 h. Ces températures correspondent aux valeurs couramment utilisées dans ce type d'essai.

Pour chacune des essences, deux durées de test ont été évaluées, soit la durée normale du test telle que définie par les normes internationales (ISTA 2009) et le double de cette durée. En effet, nous voulions être sûr d'atteindre le pourcentage de germination maximal pour chacune des températures.

Une partie de ce travail a été présentée au Carrefour 2003 dans le cadre du colloque conjoint : La filière de production de plants au Québec : de la semence à la plantation (COLAS et PELLETIER 2003).

Note : cet essai s'est déroulé en 2003. Les taux de germination observés alors pour les trois essences étudiées étaient inférieurs à ceux qui sont observés actuellement. Les travaux d'amélioration des procédures d'extraction ont permis, depuis, des améliorations tangibles de ces taux.

Colas, F., 2011. *Effets de la température sur la germination des graines en pépinière forestière*. Dans : Colas, F.; Lamhamedi, M.S. (éds.), 2011. Production de plants forestiers au Québec : la culture de l'innovation. Colloque de transfert de connaissances et de savoir-faire. Carrefour Forêt Innovations, 4-6 octobre 2011, Québec (Canada), 140 p. pp : 13 – 16.

Résultats et discussion

Épinette noire

Les 6 lots d'EPN ayant été testés ont un comportement similaire, il y a peu de variation entre les résultats de germination.

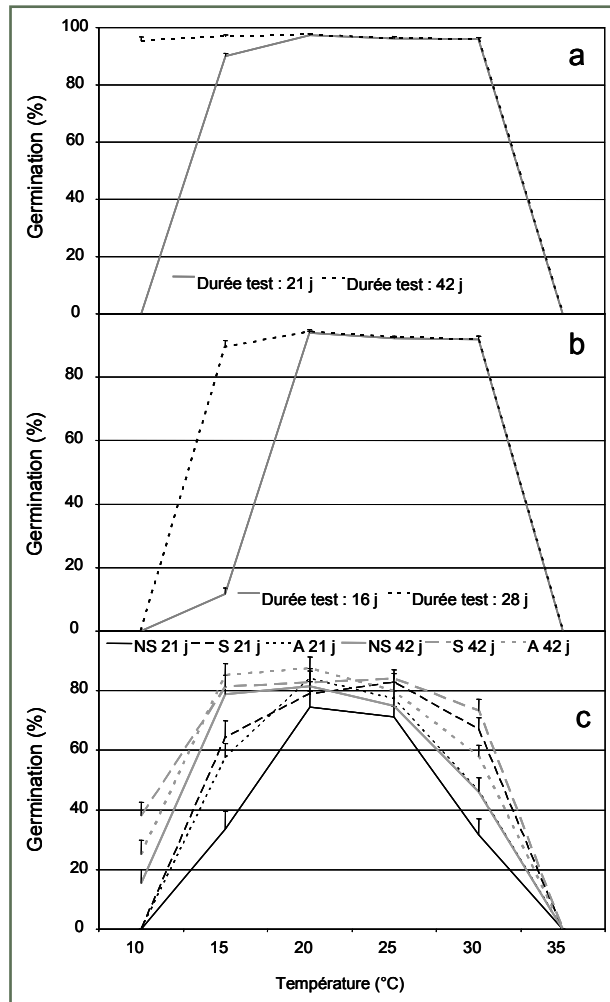


Figure 1. Pourcentage de germination moyen obtenu en conditions contrôlées à 6 températures constantes différentes (10, 15, 20, 25, 30 et 35 °C) pour 6 lots de graines. a. Épinette noire : durée du test 21 et 42 jours; b. Pin gris : durée du test 16 et 28 jours; c. Épinette blanche : durée du test 21 et 42 jours, trois traitements : graines non stratifiées, amorcées durant 24 h dans l'eau courante, stratifiées 21 jours.

L'effet de la température sur la germination est variable (Figure 1a). À 35 °C, les lots de graines ne germent pas, même après 42 jours, cette température est donc incompatible avec la germination de l'EPN. À 10 °C, la germination a atteint sa valeur maximale après 42 jours, alors qu'elle était nulle après 21 jours. Pour 15 °C, augmenter la durée de germination permet d'atteindre le taux de germination maximal qui n'était pas encore atteint après 21 jours. Cette température retarde donc la germination sans nuire à l'atteinte de sa valeur maximale.

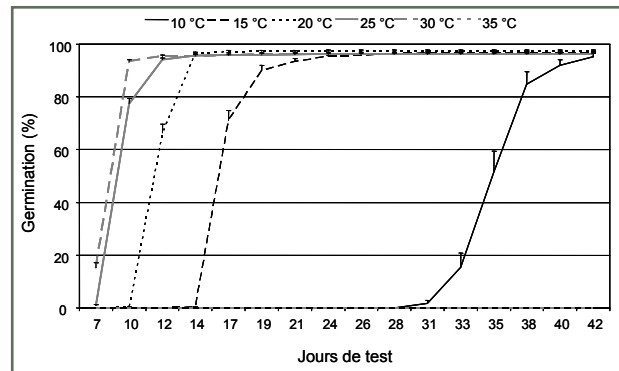


Figure 2. Cumulatif du pourcentage de germination moyen au cours du test effectué à 6 températures différentes (10, 15, 20, 25, 30 et 35 °C) en conditions contrôlées durant 42 jours pour 6 lots de graines d'épinette noire.

La figure 2 permet d'évaluer la vitesse à laquelle germent les lots en fonction de la température. Pour les températures de 20, 25 et 30 °C, le taux de germination maximal est atteint dès 14 jours. Ces températures sont les plus proches de celles utilisées pour déterminer la germination des lots au CSFB (28 °C durant 8 h, 20 °C pendant 16 h). Pour 15 °C, il est atteint à 21 jours. Quant aux lots germant à 10 °C, la germination n'a débuté qu'après 31 jours pour atteindre son maximum à 42 jours seulement.

Pin gris

Les 6 lots de PIG ayant été testés ont un comportement similaire, il y a peu de variation entre les résultats de germination.

L'effet de la température sur la germination est plus important sur le pin gris (Figure 1b) que sur l'EPN. Les températures 10 et 15 °C sont très défavorables à la germination. Si le test de germination se poursuit, la germination maximale est presque atteinte à 15 °C. Toutefois, pour les lots mis à germer à 10 °C, la germination reste nulle même après 28 jours. Tout comme pour l'EPN, la germination reste nulle à 35 °C.

L'accumulation de la germination varie selon la température (Figure 3). À 25 et 30 °C, la germination maximale est très rapidement atteinte (respectivement jour 9 et jour 7). Ces deux températures sont les plus proches des conditions qui sont utilisées dans le test de germination courant au CSFB (id EPN). À 20 °C, il faut attendre 12 jours pour obtenir la germination maximale. À 15 °C, la germination maximale est légèrement en deçà de celle observée aux températures supérieures, il faut attendre 23 jours pour l'obtenir.

Le pin gris est donc une essence dont la germination est très influencée par la température, qu'elle soit faible (10-15 °C) ou élevée (35 °C).

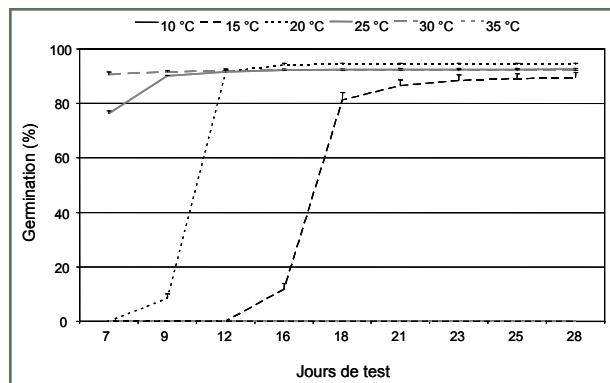


Figure 3. Cumulatif du pourcentage de germination au cours du test effectué à 6 températures différentes (10, 15, 20, 25, 30 et 35 °C) en conditions contrôlées, pour 6 lots de graines de pin gris durant 28 jours.

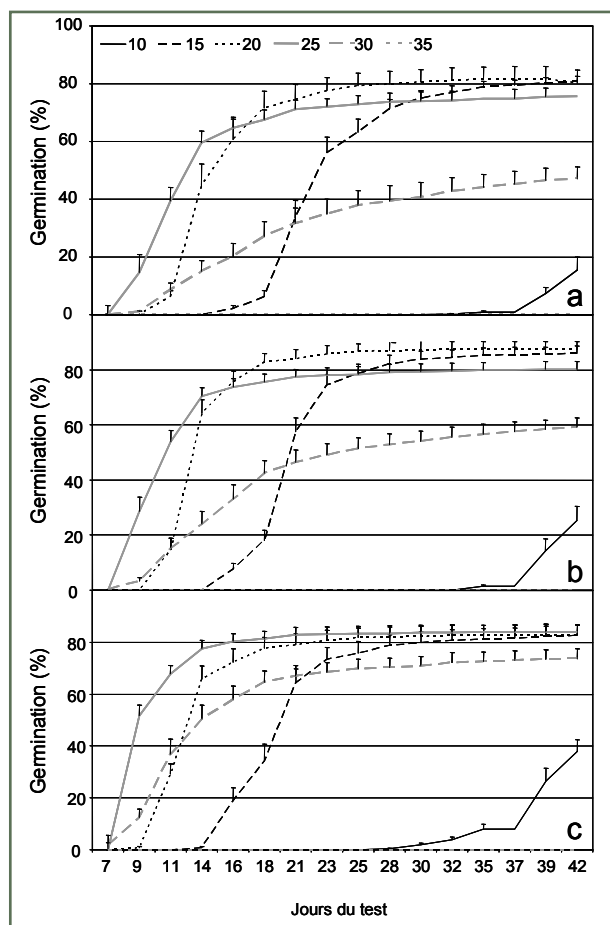


Figure 4. Cumulatif du pourcentage de germination au cours du test effectué à 6 températures différentes (10, 15, 20, 25, 30 et 35 °C) en conditions contrôlées, pour 6 lots de graines d'épinette blanche, a : non stratifiées, b : amorcées durant 24 h dans l'eau courante, c : stratifiées durant 21 jours.

Épinette blanche

Contrairement à l'EPN et au PIG, les lots d'EPB ont un comportement moins homogène. On peut observer des variations entre les lots, qui sont toutefois acceptables, et permettent de tirer des conclusions valables.

L'EPB est une essence présentant une dormance¹. La stratification (traitement par le froid humide) est le traitement qui permet à la graine de germer à son plein potentiel grâce à la levée de la dormance. Ce traitement est offert par le CSFB pour tous les lots d'EPB.

L'amorçage est un traitement qui peut être appliqué pour accélérer et uniformiser la germination des graines (BRAULT *et al.* 1996). Cependant, ce traitement n'a aucun effet pour lever la dormance. L'amorçage peut être réalisé au CSFB, c'est pourquoi il a été inclus dans les traitements réalisés dans cet essai pour l'EPB.

Quel que soit le traitement, l'augmentation de la durée du test permet d'atteindre des germinations supérieures (Figure 1c), surtout pour les températures plus faibles (10 et 15 °C). Lorsqu'il y a germination, les graines non stratifiées ont la plus faible germination. Les températures les plus favorables à la germination sont 20 et 25 °C, ce qui correspond aux conditions de température du test réalisé au CSFB (id EPN). À ces températures, les graines stratifiées et amorcées ont des germinations similaires, non significativement différentes. La germination des graines est nulle à la température constante de 35 °C peu importe le traitement appliqué.

Pour toutes les températures testées, la germination maximale des graines non stratifiées n'est pas atteinte dans les limites du test de 21 jours (Figure 4a). C'est à 25 °C que la germination débute le plus rapidement. À 15 °C, la germination débute lentement et atteint la valeur maximale après 37 jours.

Pour le traitement amorcé, la forme des courbes obtenues est similaire à celles observées pour le traitement non stratifié (Figure 4b). Cependant, les taux de germination atteints après amorçage sont supérieurs à ceux obtenus avec les graines non stratifiées.

La stratification des graines permet d'accélérer la germination et ce pour toutes les températures testées (Figure 4c). À l'exception de 10 et 30 °C où la germination

¹ Une semence normalement développée est considérée comme dormante lorsqu'elle ne germe pas dans des conditions qui devraient permettre sa germination. Le blocage provient de la semence elle-même et non pas de conditions environnementales inadéquates (CÔME et CORBINEAU 2006).

nation est significativement augmentée, les taux de germination atteints sont similaires à ceux observés pour les traitements non stratifié et amorcé. C'est donc le traitement à privilégier pour limiter les effets de la température sur la germination des graines d'EPB en pépinière.

Conclusion

La germination des graines est influencée par la température pour les valeurs extrêmes. La réaction des essences est variable. Cependant, pour les trois essences étudiées (EPB, EPN et PIG), la température de 35 °C inhibe totalement la germination. Dans les cas de chaleur extrême dans les tunnels, il faut donc favoriser la ventilation naturelle par l'ouverture des côtés et, si nécessaire, prévoir des arrosages de courte durée pour réduire la température au niveau du substrat.

Parmi les trois essences étudiées, l'EPN est celle pour laquelle la température a l'effet le plus limité. La germination de l'EPN est retardée par des températures constantes inférieures à 15 °C sans nuire à l'atteinte de la valeur maximale. La germination est nulle à 35 °C.

Pour le PIG, les températures constantes inférieures à 15 °C et supérieures à 30 °C inhibent la germination. Le PIG étant l'essence qui germe le plus rapidement, elle est souvent celle qui est semée le plus tard dans la période d'ensemencement printanière. Les risques de subir des températures trop froides sont donc quasiment exclus. Également, rares sont les périodes très chaudes durant la période d'ensemencement.

L'EPB est l'essence qui a les réponses les plus variables selon les lots. Pour limiter l'effet de la température sur la germination des graines d'EPB, il est essentiel d'utiliser des semences stratifiées. Ce traitement, en plus de lever la dormance des graines, va accélérer la germination, permettre une bonne germination sur un spectre plus large de températures et la rendre plus uniforme. Cet effet positif de la stratification, en lien avec la température de germination, a également été souligné pour les essences forestières de Colombie-Britannique (LEADEM 1996 et KOLOTELO 1998), ainsi que par FLANNIGAN et WOODWARD (1993) sur le pin rouge. La stratification permet un semis plus précoce et une germination plus fiable dans des conditions de températures défavorables au début de la saison (LEADEM 1996).

Références

- BONNER, F.T., 2008. *Chapter 1 : Seed biology*. Dans : *The woody plant seed manual*. USDA, Forest Service, Agriculture Handbook 727. p. 3-37.
- BRAULT, N., S. MERCIER et M. BETTEZ, 1996. *Traitement des graines d'arbres. : 2^e partie de 2. Cours n° 37*. L'Aubelle 113. 12 p.
- COLAS, F. et M. PELLETIER, 2003. *Développement de techniques pour améliorer la germination des graines de résineux*. Carrefour de la recherche forestière 2003, Ministère des Ressources naturelles, Direction de la recherche forestière. Centre des congrès de Québec, 20 février 2003.
- CÔME, D. et F. CORBINEAU, 2006. *Dictionnaire de la biologie des semences et des plantules*. Éditions TEC & DOC, Lavoisier. 226 p.
- FLANNIGAN, M.D. et WOODWARD, F.I. 1993. *A laboratory study of the effect of temperature on red pine seed germination*. *Forest Ecology and Management* 62(1-4): 145-156.
- ISTA (2009). *Règles internationales pour les essais de semences 2009*. International Seed Testing Association, Bassersdorf (Suisse).
- KOLOTELO, D., 1998. *Seed biology. Anatomy, morphology, physiology, germination, testing, seed preparation and handling*. Dans *Tree Seed Workshop*, Mesachie Lake, Vernon & Prince George (C.-B.), 18 p.
- LEADEM, C., 1996. *A guide to the biology and use of forest tree seeds*. B.C. Ministry of Forests, Forestry Division Services Branch, Production Resources. 20 p.

Comment réduire l'étalement de la germination des graines en pépinière forestière ?

Fabienne Colas^{1,2,3}

¹ Direction de la recherche forestière, ministère des Ressources naturelles et de la Faune, 2700 rue Einstein, Québec (Québec) G1P 3W8

² fabienne.colas@mrnf.gouv.qc.ca

³ 418 643 7994 poste 6526

La photo et la note biographique complète de l'auteur sont présentées à la page 5.

Les principaux facteurs qui influencent la germination des semences sont, par ordre d'importance décroissante : l'humidité (teneur en eau de la graine et du substrat), la température, la lumière et l'aération autour de la graine (BONNER 2008).

Différents traitements peuvent être appliqués aux semences afin de favoriser une germination rapide et uniforme. Les principaux sont la stratification (appliquée seulement aux graines des essences présentant une dormance) et l'amorçage. La stratification est une technique de levée de dormance par le froid (CÔME et CORBINEAU 2006); elle est appliquée seulement aux graines des essences présentant une dormance. L'amorçage, également appelé pré-germination ou *priming*, consiste à placer les semences dans des conditions d'hydratation qui assurent les premières phases de la germination (germination *stricto sensu*) sans que la croissance de la racine ne débute (CÔME et CORBINEAU 2006).

Depuis 2001, le Centre de semences forestières de Berthier (CSFB) a réalisé des améliorations très importantes au processus d'extraction des semences. Ceci s'est traduit par des augmentations significatives des valeurs moyennes de germination pour toutes les essences (Figure 1), en particulier l'épinette blanche, le pin gris, le pin blanc et, dans une moindre mesure l'épinette noire (mais les valeurs obtenues étaient déjà proches de 100 %).

Lorsque les lots ont un potentiel germinatif très élevé, ce qui est le cas de la presque totalité des lots de semences livrés aux pépiniéristes du Québec (Figure 1), leur germination est rapide et regroupée, lorsque les conditions climatiques ne sont pas défavorables.

Dans le texte sur l'effet de la température sur la germination, présent dans ce recueil (COLAS 2011), nous avons montré que des températures faibles ou trop élevées vont provoquer l'étalement de la germination en ralentissant la vitesse, mais que la germination maximale sera atteinte.

Il faut noter que la germination des lots de PIG de la récolte 2010 est nettement à la hausse, ce qui va se refléter dans les prochaines allocations de semences.

Colas, F., 2011. *Comment réduire l'étalement de la germination des graines en pépinière forestière ?* Dans : Colas, F.; Lamhamedi, M.S. (éds.), 2011. Production de plants forestiers au Québec : la culture de l'innovation. Colloque de transfert de connaissances et de savoir-faire. Carrefour Forêt Innovations, 4-6 octobre 2011, Québec (Canada), 140 p. pp : 17 – 19.

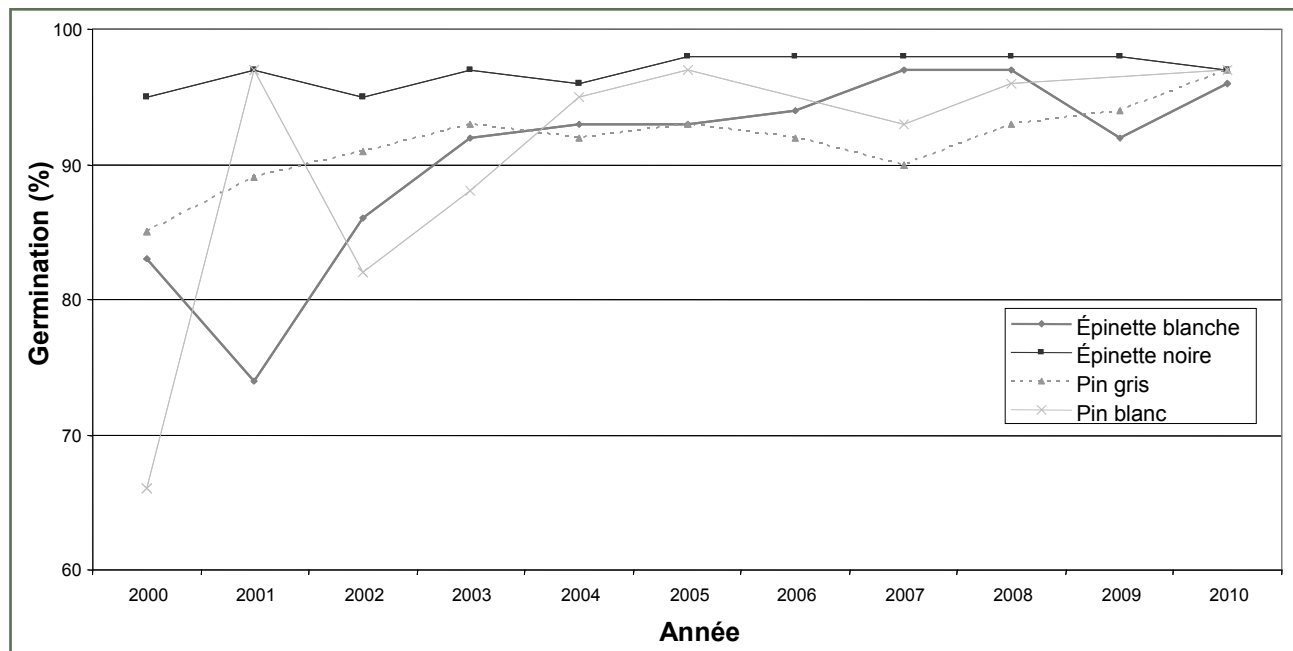


Figure 1. Évolution du pourcentage de germination moyen des principales essences extraites du Centre de semences forestières de Berthier (épinettes blanche et noire, pins blanc et gris) entre 2000 et 2010. Chaque valeur correspond à la moyenne du PG obtenu pour tous les lots extraits d'une même essence durant chacune des années de récolte. Le nombre de lots varie de 2 à 107 selon l'essence et l'année.

Parmi les principales essences utilisées dans le programme de reboisement du Québec, l'épinette blanche (EPB) est l'essence qui présente, naturellement, l'étalement de germination le plus important. Pour lever la dormance des graines d'EPB et, en même temps limiter l'étalement, le CSFB applique un traitement de stratification à toutes les graines de cette essence avant leur expédition en pépinière. Ce traitement est également appliqué au pin blanc ainsi qu'au sapin baumier. En plus des effets bénéfiques sur la vitesse et la synchronisation de la germination de la majorité des graines, ce traitement limite grandement les effets d'une température plus faible.

Certains pépiniéristes sont tentés d'amorcer les semences, notamment d'EPN, pour accélérer la germination. Avec la qualité germinative très élevée des lots qui leur sont fournis actuellement (taux de germination et vigueur), ce traitement est pratiquement inutile. De plus, il faut s'assurer de bien faire sécher les graines en surface afin que l'ensemencement se déroule correctement.

Le pin gris est le conifère ayant la germination la plus rapide. Certes, dans des conditions printanières très défavorables on pourra observer, à l'occasion, un étalement de la germination, mais la germination maximale est atteinte en moins de quatre semaines (voir texte sur l'effet de la température sur la germination dans le présent recueil). Cela dit, comme le PIG est semé, en général, à la fin de la période d'ensemencement,

Tableau 1. Pourcentage de germination (PG) moyen, minimum et maximum, de tous les lots d'épinette blanche (EPB), d'épinette noire (EPN) et de pin gris (PIG) expédiés pour l'ensemencement 2011 (données fournies par la DGPSP).

Essence	PG moyen de tous les lots expédiés en 2011 (min-max)	Nb lots expédiés en 2011
EPB	94,3 (91,5-97)	35
EPN	97,5 (94-99)	59
PIG	93,2 (88-99)	33

il sera très rare d'observer des conditions climatiques trop défavorables provoquant l'étalement de la germination.

Ainsi, grâce à l'allocation de lots de semences ayant un pouvoir germinatif très élevé et l'utilisation du traitement de stratification pour les lots dormants, bien que les conditions climatiques soient variables au printemps, les pépiniéristes du Québec disposent de matériel de bonne qualité qui doit minimiser l'étalement de la germination.

Recommandations pour éviter l'étalement de la germination

- Les graines ne doivent pas se déshydrater durant la phase de germination; il est donc nécessaire de procéder à des irrigations fréquentes qui maintiennent la teneur en eau du substrat élevée (sans être saturé).

- Limiter l'exposition des récipients à des températures froides (surtout les nuits) durant les premières phases de germination car la température est le facteur principal affectant la vitesse de germination.

Références

BONNER, F.T., 2008. *Chapter 1 : Seed biology*. Dans : The woody plant seed manual. USDA, Forest Service, Agriculture Handbook 727. pp. 3-37.

CÔME, D. et F. CORBINEAU, 2006. *Dictionnaire de la biologie des semences et des plantules*. Éditions TEC & DOC, Lavoisier. 226 p.

COLAS, F., 2011. *Effets de la température sur la germination des graines en pépinière forestière*. Dans : Colas, F.; Lamhamedi, M.S. (éds.), 2011. Production de plants forestiers au Québec : la culture de l'innovation. Colloque de transfert de connaissances et de savoir-faire. Carrefour Forêt Innovations, 4-6 octobre 2011, Québec (Canada). 140 p. pp : 13-16.

Risques liés à l'utilisation de la silice : existe-t-il des alternatives ?

Benoit-Marie Gingras^{1,2,3}



Benoit-Marie Gingras est ingénieur forestier, diplômé de l'Université Laval en 1986. En 1992, ce même établissement lui décernait le titre de maître ès sciences (sciences forestières). De 1997 à 2004, il a agi à la Direction de la recherche forestière (ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec, MRNF) à titre de chargé

de projets de recherche sur la production de plants en pépinières forestières et sur l'évaluation de la performance des plants en plantations comparatives. Depuis 2004, il agit à titre d'expert en production de plants à la Direction générale des pépinières et des stations piscicoles du MRNF.

¹ Direction générale des pépinières et des stations piscicoles, 880 chemin Sainte-Foy, Québec (Québec) G1S 4X4

² benoit-marie.gingras@mrnf.gouv.qc.ca

³ 418 627 8660 poste 4652

Considérant que la silice constitue un excellent matériau de recouvrement des semences, tout devrait être mis en œuvre pour s'assurer de son utilisation de façon sécuritaire. À cet effet, l'installation de systèmes d'aspiration des poussières et de ventilation performants devrait réduire de façon significative les risques liés à l'utilisation de la silice cristalline (quartz).

Il existe d'autres matériaux (calcite, gravier, granite, billes de polystyrène, petites pierres [ouest canadien]) qui peuvent être utilisés pour le recouvrement des semences. Ils doivent toutefois rencontrer, entre autres, les caractéristiques suivantes (ROBERT et ÉMOND 1989) :

- matériau inerte;
- très peu de particules fines afin de ne pas favoriser la formation d'une croûte à la surface des cavités, ce qui affecte négativement la pénétration et l'absorption de l'eau et des éléments minéraux;
- ne doit présenter aucun obstacle lors de la levée des semences;
- doit permettre une bonne aération à la surface des cavités;
- être de couleur pâle (blanchâtre) afin de réfléchir les rayons lumineux incidents à la surface des cavités, ce qui permet de réduire la température au niveau des semences durant la germination.

Comme nous ne possédons que très peu d'information sur les autres matériaux de recouvrement, le producteur de plants forestiers devrait procéder à des essais répétés avant de remplacer la silice par un autre matériau.

Référence

ROBERT, D. et L. ÉMOND, 1989. *La production de plants forestiers au Québec (notions générales)*. Gouvernement du Québec, Ministère de l'Énergie et des Ressources, Service de la régénération forestière. Édition préliminaire. Québec, mai 1989. 188 p.

Gingras, B-M., 2011. *Risques liés à l'utilisation de la silice : existe-t-il des alternatives ?* Dans : Colas, F.; Lamhamedi, M.S. (éds.), 2011. *Production de plants forestiers au Québec : la culture de l'innovation*. Colloque de transfert de connaissances et de savoir-faire. Carrefour Forêt Innovations, 4-6 octobre 2011, Québec (Canada), 140 p. pp : 21.

Doit-on favoriser l'utilisation d'agents mouillants pour la production de plants forestiers ?

Benoit-Marie Gingras^{1,2,3}

¹ Direction générale des pépinières et des stations piscicoles, 880 chemin Sainte-Foy, Québec (Québec) G1S 4X4

² benoit-marie.gingras@mrnf.gouv.qc.ca

³ 418 627 8660 poste 4652

La photo et la note biographique complète de l'auteur sont présentées à la page 21.

Les agents mouillants : définition et mode de fonctionnement

Les agents mouillants permettent au média, telle la mousse de tourbe qui est hydrophobe lorsque sèche, d'accepter l'eau à l'intérieur de sa structure.

Les agents mouillants fonctionnent comme les surfactants; ils diminuent la tension de surface de l'eau (force qui retient les molécules d'eau en surface) et aident l'eau à se transférer d'une particule de sol à l'autre. Les agents mouillants augmentent ainsi les capacités de dispersion, permettent une meilleure pénétration de l'eau dans le substrat hydrophobe, ainsi qu'un mouvement uniforme de l'eau dans la zone racinaire.

Les agents mouillants sont des molécules qui, d'un côté sont attirées par l'eau, et de l'autre par les molécules unipolaires telles que celles retrouvées dans la tourbe. Ils agissent sensiblement comme un aimant qui retient les deux surfaces ensemble, qui autrement se repousseraient. Lorsque l'eau est appliquée sur une surface hydrophobe, elle n'est pas absorbée rapidement et repose en surface ou s'écoule sur les côtés. Lorsque le substrat est traité avec un agent mouillant, l'eau est rapidement absorbée. L'usage d'agents mouillants permet donc une meilleure utilisation de l'eau.

Efficacité des agents mouillants

Pour être efficaces, les agents mouillants ne doivent pas se dégrader rapidement. Les agents mouillants commerciaux fonctionnent sur une période relativement longue mais seront éventuellement dégradés par les micro-organismes du sol qui sont friands des chaînes de carbone qui s'y trouvent. Il est recommandé de traiter le substrat régulièrement si la période de croissance est relativement longue, ce qui est le cas pour la production de plants forestiers. L'efficacité des agents mouillants est affectée par le type d'agent mouillant utilisé, sa dilution, l'usage antérieur d'agents mouillants dans le substrat, l'état de décomposition de la tourbe et le contenu en eau du substrat lorsque l'eau est appliquée. Les agents mouillants ne sont efficaces que pour les substrats hydrophobes.

Gingras, B.-M., 2011. *Doit-on favoriser l'utilisation d'agents mouillants pour la production de plants forestiers?* Dans : Colas, F.; Lamhamedi, M.S. (éds.), 2011. Production de plants forestiers au Québec : la culture de l'innovation. Colloque de transfert de connaissances et de savoir-faire. Carrefour Forêt Innovations, 4-6 octobre 2011, Québec (Canada), 140 p. pp : 23 – 24.

Les agents mouillants utiles pour la production de plants forestiers au Québec ?

Bien que les agents mouillants permettent une meilleure pénétration de l'eau dans les substrats hydrophobes, leur utilisation dans les substrats de culture utilisés au Québec n'est pas nécessaire si le producteur de plants forestiers gère son irrigation de façon optimale. Toutefois, si le pépiniériste décide d'utiliser un agent mouillant, il devrait effectuer des essais répétés sur une petite portion de la culture avant d'utiliser le produit à grande échelle. La concentration suggérée par le fabricant peut cependant, dans certains cas, ne pas être adéquate. À l'aide d'essais, le producteur doit déterminer le dosage de l'agent mouillant qui permet un mouillage adéquat du substrat sans affecter la germination des semences et la croissance des plants. En effet, à certaines concentrations, les agents mouillants peuvent diminuer la germination des semences, réduire la longueur de la racine et affecter négativement la croissance des parties aérienne et racinaire des plants. La température et les précipitations peuvent également affecter la réaction des plants (ex. : réduction de la croissance) en présence d'une grande quantité d'agent mouillant dans les substrats tourbeux. Certains agents mouillants peuvent endommager la cuticule cireuse qui permet aux feuilles et aux aiguilles de diminuer les pertes d'eau par transpiration épidermique (perte d'eau par la cuticule et par les stomates). Il est donc recommandé d'être prudent lorsque l'on applique le produit directement sur le feuillage. L'ajout d'agents mouillants ne semble pas affecter la rétention des minéraux dans le sol. De plus, la plupart des engrais commerciaux sont compatibles avec les agents mouillants.

Pour des informations complémentaires

- <http://fr.wikipedia.org/wiki/Tensioactif>
- <http://www.ecoumenegolf.org/BPhyto/Mieux%20comprend.%20les%20mouillants%2024.PDF>
- <http://aquatrols.com/greenhouse-and-nursery/nursery/products/media-and-soil-surfactants/aquagro-2000-l/?LOCALE=CA>
- http://fr.academic.ru/dic.nsf/frwiki/61033#Les_agents_mouillants
- <http://www.waynesthisandthat.com/peatmoss.htm>
- <http://www.global-garden.com.au/burnley/dec02jan03dte.htm>
- http://www.caes.uga.edu/Publications/pubDetail.cfm?pk_id=7678&pg=np&ct=wetting%20agents&kt=&kid=&pid=
- http://books.google.ca/books?id=c0dbLOBf1EYC&pg=PA74&lpg=PA74&dq=agents+mouillants&source=bl&ots=WwyKLH_dpB&sig=fKGoEqoto8Eambas9x5prs6vMfc&hl=fr&ei=UYMdTr2UJMrVgQfF6YDPCQ&sa=X&oi=book_result&ct=result&resnum=5&ved=0CCQQ6AEwBDgU#v=onepage&q=agents%20mouillants&f=false

Est-il pertinent de surélever les récipients durant la saison hivernale ?

Benoit-Marie Gingras^{1,2,3}

¹ Direction générale des pépinières et des stations piscicoles, 880 chemin Sainte-Foy, Québec (Québec) G1S 4X4

² benoit-marie.gingras@mrnf.gouv.qc.ca

³ 418 627 8660 poste 4652

La photo et la note biographique complète de l'auteur sont présentées à la page 21.

Un comité technique a été mis en place à la DGSP afin d'étudier différentes alternatives à la surélévation des récipients durant l'hiver. En effet, cette opération est coûteuse et les risques de blessures, pour les ouvriers, sont importants.

La conclusion de ce travail est que la meilleure méthode de protection hivernale des plants consiste à mettre les récipients directement au sol et installer une protection de bordure adéquate. Indépendamment de la notion de changements climatiques, le fait de maintenir les récipients surélevés durant la saison hivernale représentera toujours un risque pour le producteur de plants forestiers. L'utilisation de toiles de protection hivernale pour les productions en 1+0 et l'application de neige artificielle peuvent toutefois permettre de conserver les récipients surélevés en hiver.

À titre de complément d'information, voici des extraits du rapport d'étape rédigé par les membres du comité technique de la DGSP sur la protection hivernale en 2009 (A. CORBEIL, D. GÉLINAS, B.M. GINGRAS, L. LAVERGNE et M. RIOUX) intitulé : *Recherche de nouvelles méthodes de protection hivernale pour la production de plants en récipient – rapport d'étape*.

L'interaction entre les dégâts (gel des racines, dessiccation...) observés sur les plants et les méthodes de protection hivernale est complexe et variable d'une culture à l'autre, d'une saison à l'autre et d'une pépinière à l'autre. Cette interaction prend en compte plusieurs variables telles l'essence, le calendrier de production, l'état d'endurcissement des plants, la période de l'année, les conditions météorologiques, l'épaisseur de la couche de neige, la localisation de la pépinière, etc.

L'examen du bilan des avantages et inconvénients de chaque méthode fait ressortir que la **méthode de protection hivernale la plus efficace consiste à descendre les récipients au sol pour l'hiver**. Trois autres méthodes peuvent être recommandées. Les cultures en 1+0 peuvent être maintenues surélevées si une toile de protection hivernale est utilisée. Les cultures effectuées dans le récipient 45-110 pourraient être réalisées en 1,5 an et livrées au cours de la deuxième saison de croissance. Finalement, les plants prévus pour une livraison en dormance pourraient être entreposés en chambre froide.

Gingras, B-M., 2011. *Est-il pertinent de surélever les récipients durant la saison hivernale ?* Dans : Colas, F.; Lamhamedi, M.S. (éds.), 2011. Production de plants forestiers au Québec : la culture de l'innovation. Colloque de transfert de connaissances et de savoir-faire. Carrefour Forêt Innovations, 4-6 octobre 2011, Québec (Canada), 140 p. pp : 25 – 26.

Indépendamment de la méthode de protection utilisée, le producteur doit tout mettre en œuvre pour favoriser un endurcissement des plants adéquat à l'automne, installer des protections de bordure ainsi que des brise-vent ou des clôtures pour favoriser l'accumulation de neige sur les plants.

Référence

CORBEIL, A., D. GÉLINAS, B.M. GINGRAS, L. LAVERGNE et M. RIOUX, 2009. *Recherche de nouvelles méthodes de protection hivernale pour la production de plants en récipients*. Rapport d'étape et recommandations du comité technique. Ministère des ressources naturelles et de la faune, Direction générale des pépinières et stations piscicoles. 33 p.

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 ?

Jean Gagnon^{1,2,3} et Mohammed S. Lamhamedi¹

¹ Direction de la recherche forestière, ministère des Ressources naturelles et de la Faune, 2700 rue Einstein, Québec (Québec) G1P 3W8

² jean.gagnon@mrnf.gouv.qc.ca

³ 418 643 7994 poste 6566

La photo et la note biographique complète du 1^{er} auteur sont présentées à la page 97.

Introduction

Les champignons mycorhiziens, qui vivent et fonctionnent en symbiose avec les systèmes racinaires des essences forestières résineuses et feuillues, sont omniprésents aussi bien en forêt que dans les pépinières forestières du Québec. Cette association symbiotique « champignon-racine » est bénéfique pour les deux partenaires. Les deux principaux types de mycorhizes qui prédominent en milieu naturel sont les endomycorhizes et les ectomycorhizes. Alors que l'on retrouve les endomycorhizes chez presque toutes les espèces de plantes et chez plusieurs essences feuillues (ex. : érables, frênes, noyers, etc.), les ectomycorhizes se retrouvent sur presque toutes les essences résineuses (ex. : pins, sapins, épinettes, mélèzes, etc.) et aussi sur quelques espèces feuillues (ex. : chênes, hêtres, bouleaux, etc.).

Contrairement aux endomycorhizes qui ne sont visibles qu'à l'aide d'un microscope, les racines courtes (racines d'absorption) mycorhizées par les champignons ectomycorhiziens sont visibles à l'œil nu. En effet, les poils absorbants de ces dernières sont remplacés par les hyphes (filaments microscopiques) du champignon. Ces hyphes forment un mycélium autour des racines courtes mycorhizées appelé gaine ou manchon fongique (Figures 1b, 1c, 1e).

Puisque la majorité des plants forestiers produits en récipients et à racines nues dans les pépinières forestières du Québec sont des essences résineuses (épinettes, pins, mélèzes et sapins) et que les racines de ces essences sont associées aux champignons ectomycorhiziens, le texte qui suit portera uniquement sur les ectomycorhizes en pépinières forestières.

La symbiose ectomycorhizienne procure plusieurs avantages pour les deux partenaires. Alors que le plant forestier fournit des produits de la photosynthèse (sucres) au champignon pour assurer sa survie et compléter son cycle vital (avantage nutritionnel), le champignon ectomycorhizien procure au plant plusieurs avantages nutritionnels, métaboliques et prophylactiques.

- Nutritionnel : amélioration de l'absorption de l'eau et des éléments minéraux grâce à l'extension accrue des racines à l'aide de la phase extra-matricielle constituée par des hyphes fins qui forment un

GAGNON, J. et M.S. LAMHAMED, 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.; Lamhamedi, M.S. (éds.), 2011. Production de plants forestiers au Québec : la culture de l'innovation. Colloque de transfert de connaissances et de savoir-faire. Carrefour Forêt Innovations, 4-6 octobre 2011, Québec (Canada), 140 p. pp : 27 – 32.

mycélium et des cordons mycéliens. Les plants ectomycorhizés ont donc une meilleure résistance à la sécheresse et sont capables de mieux résister aux stress hydriques et nutritionnels rencontrés en milieu naturel. La racine courte mycorhizée va donc explorer un volume de sol beaucoup plus grand que ne le faisaient les poils absorbants de la racine courte non mycorhizée (Figures 1b, 1c, 1e).

- Métabolique : le champignon sécrète et libère des hormones de croissance, notamment des auxines, cytokinines et gibbérellines.
- Prophylactique : le manchon fongique, formé par les champignons autour de la racine courte mycorhizée constitue une barrière physique à l'infection par les pathogènes racinaires. Il permet également une meilleure tolérance aux stress environnementaux abiotiques. Certains champignons produisent aussi des antibiotiques qui agissent contre les champignons pathogènes du sol.

Puisqu'en milieu naturel, la presque totalité des systèmes racinaires des essences résineuses vivent et fonctionnent en symbiose avec des champignons ectomycorhiziens, les chercheurs du Québec et de partout dans le monde ont, depuis plusieurs décennies, tenté d'imiter la nature en inoculant les plants forestiers avec des champignons ectomycorhiziens en pépinières forestières. Cette pratique d'inoculation artificielle des plants visait à améliorer les performances des plants (taux de survie, croissance) après leur mise en terre sur les différents sites de reboisement du Québec.

L'inoculation artificielle des plants avec des champignons ectomycorhiziens dans les pépinières forestières du Québec

De 1984 à 1994, des expériences d'inoculation artificielle de plants en récipients (plusieurs essences, espèces de champignons ectomycorhiziens, types d'inoculants appliqués à différentes périodes, types de récipients) ont été réalisées dans toutes les pépinières forestières gouvernementales du Québec.

Ces expériences d'inoculation de plants en récipients avec des champignons ectomycorhiziens ont notamment permis de : 1) démontrer que la mycorhization de ces cultures était inhibée par des teneurs élevées en azote (N) et phosphore (P) dans le substrat; et 2) déterminer des niveaux de fertilité en N et P qui permettent d'induire et de maintenir la formation d'un taux élevé de mycorhization (plus de 50 % des racines courtes mycorhizées). Le maintien de basses fertilités du substrat en N et P tout au long de la saison de croissance fut possible, grâce à l'approche de nutrition minérale développée au Québec.

À partir de ces dispositifs de mycorhization effectués en pépinières, douze plantations expérimentales de plants mycorhizés ont été établies de 1985 à 1990 avec plusieurs essences (épinettes noire et blanche, pin gris, mélèze laricin) produites dans le récipient 45-110. Les résultats de mesurage de ces plantations ont montré que pour 10 de ces 12 plantations, les plants mycorhizés n'ont pas permis d'améliorer la croissance et la survie des plants sur les différents sites de reboisement. Trois raisons peuvent expliquer cette absence de gain chez les plants mycorhizés par rapport aux plants témoins dans ces 10 plantations :

- au moment du reboisement, les plants inoculés artificiellement avec un champignon ectomycorhizien dans le récipient 45-110 étaient désavantagés par rapport à ceux non inoculés (témoins) car ils étaient plus petits que ces derniers;
- les performances des plants mycorhizés en plantation (croissance, survie) n'étaient pas comparées à celles de plants témoins exempts de mycorhization naturelle, mais plutôt à des plants qui sont devenus mycorhizés naturellement par les spores de champignons ectomycorhiziens provenant des peuplements forestiers situés aux abords de ces pépinières. En effet, dès la fin de leur première saison de croissance (à partir du mois d'août) en pépinière, les racines des plants 1+0 non inoculés artificiellement (témoins) ont commencé à être colonisées naturellement par les champignons *Laccaria* sp et *Thelephora terrestris*;
- le fait que les plants mycorhizés artificiellement en pépinière soient mis en terre sur des sites forestiers déjà colonisés naturellement par plusieurs espèces de champignons ectomycorhiziens peut expliquer l'absence de gain des plants mycorhizés sur les plants témoins car ils doivent compétitionner avec la flore déjà existante sur ces sites et mieux performer que cette dernière. D'où l'importance de sélectionner des souches fongiques non seulement bien adaptées aux conditions culturales qui prévalent dans les pépinières forestières du Québec, mais aussi capables de compétitionner et de mieux performer que la flore déjà présente en abondance sur les sites forestiers du Québec.

Il est donc beaucoup plus difficile d'obtenir des gains de croissance hautement significatifs chez les plants mycorhizés sur de tels sites où les champignons ectomycorhiziens abondent naturellement, que sur des sites dépourvus d'activité microbiologique où seule la mise en terre de plants mycorhizés permet d'assurer la survie et la croissance des plants. Cela explique pourquoi les reboisements réalisés ailleurs dans le monde avec des plants mycorhizés ont eu plus de succès sur des sites perturbés et dégradés dépourvus d'activité microbiologique (ex. : sites

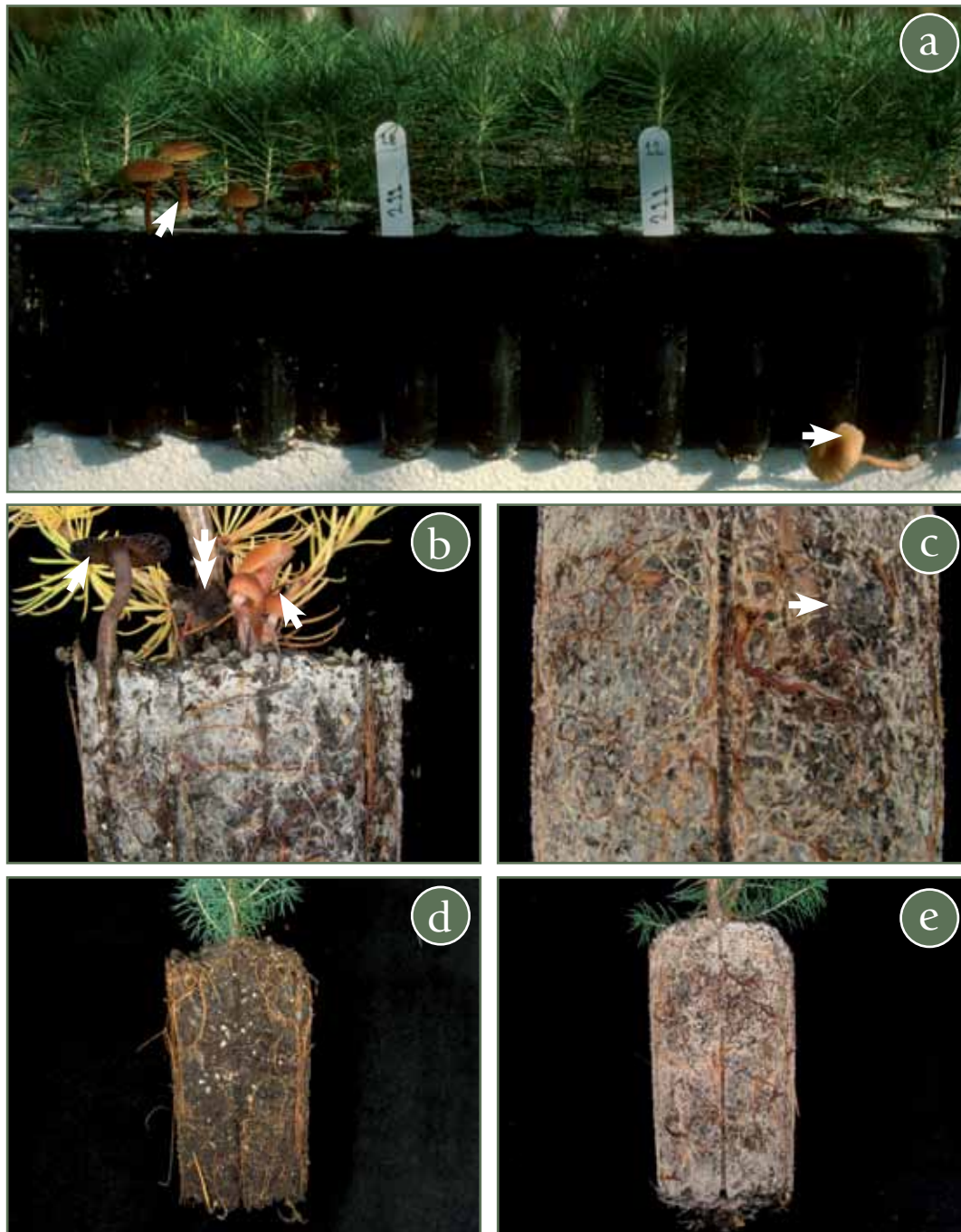


Figure 1. a : Plants de pins gris (1+0) mycorhizés par le champignon ectomycorhizien *Laccaria bicolor* et produits de mai à octobre 1984 dans une serre expérimentale de la pépinière forestière de Trécesson. Des fructifications (carpophores) de *Laccaria bicolor* sont apparues en fin de saison au-dessus et sous les récipients 45-110. (Photo : Jean Gagnon). b : Bouture de mélèze hybride (MEH) produite à la pépinière de Saint-Modeste et mycorhizée naturellement par les champignons ectomycorhiziens *Laccaria* sp (flèche) et *Thelephora terrestris* (double flèche). Des fructifications (carpophores) de ces champignons sont apparues en fin de saison au-dessus des récipients 15-320. (Photo : Mohammed Lamhamedi). c : Carotte de substrat de tourbe-vermiculite d'une bouture d'épinette blanche 2+0 produite en récipients 15-320 à la pépinière de Saint-Modeste et mycorhizée naturellement par les champignons ectomycorhiziens *Laccaria* sp. et *Thelephora terrestris*. Les hyphes de ces champignons ont formé un mycélium très dense et ont doté la carotte d'une meilleure cohésion. (Photo : Mohammed Lamhamedi). d : Bouture d'épinette blanche 2+0 non mycorhizée produite en récipients 15-320 à la pépinière de Saint-Modeste (Photo : Mohammed Lamhamedi). e : Bouture d'épinette blanche 2+0 mycorhizée naturellement produite en récipients 15-320 à la pépinière de Saint-Modeste. Comparé au plant non mycorhizé (Figure 1d), la mycorhization naturelle de ces plants par les champignons ectomycorhiziens *Laccaria* sp. et *Thelephora terrestris* a non seulement permis d'assurer une meilleure cohésion de la carotte de substrat, elle a aussi stimulé la formation de racines courtes. (Photo : Mohammed Lamhamedi).

d'anciennes mines et de déchets miniers, bancs d'emprunts...) et sur des sites pauvres et difficiles à régénérer situés dans des zones arides et semi-arides.

Restent donc les deux plantations où les plants mycorhizés ont aussi bien ou mieux performé que les plants témoins. Il s'agit de deux plantations d'épinette noire établies sur des sites à éricacées dominés par le *Kalmia angustifolia* L. Sur de tels sites, la croissance des plants d'épinette noire (EPN) est souvent ralentie par le *Kalmia*. Cette espèce entre en compétition avec les plants d'EPN pour les éléments minéraux du sol et favorise l'accumulation d'un humus brut où les nutriments sont peu disponibles. Les problèmes de régénération et de croissance sur ces stations, généralement pauvres, pourraient aussi s'expliquer par le fait que le *Kalmia* libère dans le sol des substances allélopathiques (phénols, tanins) qui inhibent certaines enzymes associées à la décomposition de la matière organique et qui ralentissent également la croissance racinaire. De plus, les plants d'EPN croissant à proximité du *Kalmia* sont plus fréquemment colonisés par des pseudo-mycorhizes, ce qui diminue leur potentiel de mycorhization par des champignons bénéfiques.

L'inoculation des plants en récipients avec des spores de champignons ectomycorhiziens : un moyen pour réduire le taux d'insuffisance racinaire dans les pépinières forestières du Québec

Nos observations effectuées dans les dispositifs sur la mycorhization installés dans les pépinières forestières du Québec montrent que les plants en récipients et à racines nues deviennent mycorhizés naturellement à partir de l'automne. Cette période coïncide avec la réduction des apports de fertilisants, l'arrêt de croissance en hauteur des plants et l'abondance des fructifications des champignons ectomycorhiziens (ex. : *Laccaria* sp, *Thelephora terrestris* (Figures 1a et 1b)). Les spores de ces fructifications sont ensuite dispersées par le vent. La mycorhization naturelle de ces plants par les champignons ectomycorhiziens est très irrégulière au sein d'une même culture et varie aussi en fonction des essences résineuses produites et de la localisation de la pépinière et des ses pratiques culturales. Elle est aussi très variable d'une année à l'autre et le taux de mycorhization naturelle des plants est également très variable (0 à 100 %) entre les plants d'un même lot produit sous les mêmes régies de culture.

Lorsque le système racinaire des plants en récipients est bien mycorhizé (plus de 50 % des racines courtes mycorhizées), le mycélium du champignon ectomycorhizien formé à la surface de la carotte de substrat de tourbe-vermiculite permet d'assurer une

meilleure cohésion de cette dernière (Figures 1b, 1c, 1e). Une étude récente, avec des plants de fortes dimensions (PFD) de mélèze laricin (2+0) produits en récipients 15-320 à la pépinière de Saint-Modeste, a en effet permis de démontrer que la mycorhization naturelle de ces plants à l'automne avait conduit à une meilleure cohésion de la carotte.

Puisque la mycorhization naturelle des plants en récipients peut permettre d'augmenter la cohésion de la carotte, il serait intéressant de l'améliorer. Pour ce faire, le pépiniériste peut choisir d'inoculer à l'automne certaines cultures en récipients, notamment celles dont la carotte manque de cohésion et dont la hauteur cible a été atteinte chez plus de 90 % des plants (rappelons que des teneurs élevées en N et P dans le substrat inhibent le développement des champignons). L'inoculation pourrait se faire avec des spores provenant des fructifications présentes tant dans les cultures en récipients que celles à racines nues ou dans les peuplements forestiers situés près de la pépinière. Cette technique d'inoculation est à la portée des pépiniéristes car elle est très facile à maîtriser et peu coûteuse. Pour préparer un inoculant de spores, il suffit de récolter des carpophores de champignons ectomycorhiziens, de les rincer à l'eau du robinet pour enlever la terre ou autre matière organique, de les couper en morceaux de 1-3 cm³ et de les broyer à l'aide d'un broyeur en présence d'eau du robinet à haute vitesse pendant 2-3 minutes jusqu'à ce que le mélange soit homogène. La suspension de spores doit ensuite être gardée au réfrigérateur jusqu'à son utilisation. Elle peut être appliquée à l'aide du système d'irrigation de la pépinière et pour s'assurer d'une distribution uniforme, il est souhaitable de faire deux applications de la solution de spores à 2-3 semaines. Cette technique a d'ailleurs déjà été utilisée avec succès dans certaines pépinières forestières. Cependant, le maintien d'une colonisation élevée des racines par ces champignons ne pourra avoir lieu que si la fertilité du substrat est faible. Considérant la contrainte de l'atteinte des normes et critères de qualité des plants en récipients et la très courte durée de la saison de croissance au Québec, il est souhaitable que l'inoculation des plants avec des spores s'effectue à l'automne, période où la fertilité des substrats en N et P est plus faible. Afin de favoriser la cohésion des racines, l'inoculation des plants pourrait être appliquée en automne aux stades 1+0 et 2+0. En 2004, la pépinière de Pampev inc. a effectué des inoculations des plants 1+0 et 2+0 de différentes essences forestières (épinettes blanche, noire, rouge et de Norvège) pour favoriser la cohésion des carottes et améliorer la croissance des racines. L'évaluation de la présence des carpophores de *Laccaria bicolor* en

réponse à cette inoculation a été effectuée en octobre 2004 et a révélé que la densité de carpophores variait entre 1 et 14,5 carpophores par m². Le nombre de carpophores par tunnel variait entre 61 et 744. Ces résultats ont été obtenus suite à une évaluation de 210 à 600 récipients par tunnel.

Les expériences de fertilisation, avec différents niveaux de N et de P, réalisées dans les pépinières forestières gouvernementales du Québec ont permis d'élaborer des calendriers de fertilisation appropriés pour maintenir les niveaux de fertilité souhaitables en N et P assimilables. Généralement, des niveaux de fertilité du substrat en N et P assimilables de 25-50 mg/kg de N et 30-60 mg/kg de P sont adéquats pour produire des plants bien mycorhizés et assurer une croissance adéquate de ces derniers (ex : épinettes noire et blanche, pin gris, chêne rouge). Il reste cependant à vérifier si ces niveaux de fertilité de substrats vont permettre d'atteindre les normes et critères de qualité des plants en récipients selon les différents types de cultures à produire (espèces, récipients, volumes de la cavité, âge des plants, date de livraison des plants, etc.).

Conclusion

Dans les pépinières forestières du Québec, l'inoculation des plants forestiers à l'automne, avec des spores de différentes espèces de champignons ectomycorhiziens, est envisageable et à la portée du pépiniériste. Cette inoculation artificielle à l'aide de spores permettra de stimuler la croissance des racines et d'améliorer de façon significative la colonisation et la cohésion de la carotte, ce qui contribuera à diminuer de façon importante le taux d'insuffisance racinaire et le rejet des plants. La réussite de l'inoculation et le maintien de la colonisation des racines par des champignons ectomycorhiziens imposent au pépiniériste un contrôle rigoureux de la fertilité du substrat en N et en P et une diminution significative des apports en fertilisants pour ces deux éléments. Ces conditions ne pourraient être réunies qu'en automne et cette période coïncide avec la période où la majorité des plants 2+0 ont presque atteint les standards de croissance ciblés par le pépiniériste. La colonisation, en pépinière forestière, des racines des plants par des champignons ectomycorhiziens très diversifiés et adaptés aux conditions écologiques du Québec, constitue donc un moyen de conservation et d'introduction de la biodiversité dans les sites de reboisement pauvres et dépourvus de champignons ectomycorhiziens (lande, site agricole, sites miniers, sol décapé, etc.).

La présence des ectomycorhizes et des fructifications est donc un excellent indicateur qui certifie, hors de tout doute, la viabilité du système racinaire. Cette présence confirme, du même coup, l'optimisation de la régie de fertilisation lors du développement racinaire à l'automne, et la protection de l'environnement contre la pollution causée par les apports de fertilisants.

Références

- BUSCHENA, C.A., R.L. DOUDRICK et N.A. ANDERSON, 1992. *Persistence of Laccaria sp. as ectomycorrhizal symbionts of container-grown black spruce*. Can. J. For. Res. 22: 1883-1887.
- CASTELLANO, M.A., 1996. *Outplanting performance of mycorrhizal inoculated seedlings*. Dans: Concepts in mycorrhizal research. Handbook of vegetation science. Edité par K.G. Mukerji. Kluwer, Dordrecht, Netherlands. p. 223-301.
- CASTELLANO, M.A. et R. MOLINA, 1989. *Mycorrhizae*. Dans : *The container tree nursery manual, volume 5*. Landis, T.D., R.W. Tinus, S.E. McDonald et J.P. Barnett (éditeurs). Agric. Handbook, n° 674. Washington D.C.: U.S. Departement of agriculture, Forest Service. p. 101-167.
- CASTELLANO, M.A. et J.M. TRAPPE, 1985. *Ectomycorrhizal formation and plantation performance of Douglas-fir nursery stock inoculated with Rhizopogon spores*. Can. J. For. Res. 15: 613-617.
- FORTIN, J.A., C. PLENCHETTE et Y. PICHÉ, 2008. *Les mycorhizes : La nouvelle révolution verte*. Éditions multiMondes, Éditions Quae, Québec, Canada. 131 p.
- GAGNON, J. et C.-G. LANGLOIS, 1995. *Utilisation pratique des mycorhizes en foresterie : à la croisée des chemins*. Dans : J.A. Fortin, C. Charest et Y. Piché. La symbiose mycorhizienne : état des connaissances. Éditions ORBIS Publishing [Montréal], p. 165-177.
- 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 : 840-845.
- 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 : 922-929.
- GAGNON, J., C.-G. LANGLOIS et J. GARBAYE, 1991. *Growth and ectomycorrhiza formation of container-grown red oak seedlings as a function of nitrogen fertilization and inoculum type of Laccaria bicolor*. Can. J. For. Res. 21 : 966-973.
- GAGNON, J., C.-G. LANGLOIS, D. BOUCHARD et F. LE TACON, 1995. *Growth and ectomycorrhizal formation of container-grown Douglas-fir seedlings inoculated with Laccaria bicolor under four levels of nitrogen fertilization*. Can. J. For. Res. 25 : 1953-1961.
- KROPP, B.R. et C.-G. LANGLOIS, 1990. *Ectomycorrhizae in reforestation*. Can. J. For. Res. 20: 438-451.

LAMHAMED, M.S., M. RENAUD, P. DESJARDINS et L. VEILLEUX, 2011. *Évaluation de la qualité morpho-physiologique du système racinaire des plants de mélèze laricin : les racines foncées ou noires peuvent-elles être considérées mortes?* Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Direction de la recherche forestière. Avis technique de recherche forestière SGRE-3. 33 p.

LAMHAMED, M.S., M. ABOUROUH et J.A. FORTIN, 2009. *Technological transfer: the use of ectomycorrhizal fungi in conventional and modern forest tree nurseries in northern Africa - Chapter 11*. Dans : Khasa, D., Y. Piché et A.P. Coughlan (éds.). *Advances in mycorrhizal science and technology*. NRC Research Press, Ottawa, Canada. p. 139-152.

LAMHAMED, M.S., P.Y. BERNIER et J.A. FORTIN, 1992a. *Growth, nutrition and water stress tolerance of Pinus pinaster inoculated with ten dikaryotic strains of Pisolithus sp.* Tree Physiol. 10:153-167.

LAMHAMED, M.S., P.Y. BERNIER et J.A. FORTIN, 1992b. *Hydraulic conductance and soil water potential at the soil-root interface of Pinus pinaster seedlings inoculated with different dikaryons of Pisolithus sp.* Tree Physiol. 10:231-244.

LAMHAMED, 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.

LANGLOIS, C.-G., 1988. *Les ectomycorhizes : biologie et utilisation*. Bulletin de l'Ordre des ingénieurs forestiers du Québec: L'Aubelle N° 66, 11 p.

LANGLOIS, C.-G. et J. GAGNON, 1988. *The production of mycorrhizal conifer seedlings in Quebec : the progression of the project*. Dans : Proceedings of the Canadian Workshop on Mycorrhizae in Forestry, 1-4 Mai 1988, Sainte-Foy, Québec. M. Lalonde et Y. Piché, éd. Centre de recherche en biologie forestière, Université Laval, Sainte-Foy, Québec, Canada, p. 9-13.

LANGLOIS, C.-G. et J. GAGNON, 1993. *A global approach to mineral nutrition based on the growth needs of seedlings produced in forest tree nurseries*. Dans : N. J. Barrow, éd. *Plant Nutrition-From Genetic Engineering to Field Practice*. Proceedings of the 12th International Plant Nutrition Colloquium, 21-26 septembre 1993, Perth, Western Australia. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Pays-Bas : p. 303-306.

LE TACON, F., D. MOUSAIN, J. GARBAYE, D. BOUCHARD, J.-L. CHURIN, C. ARGILLIER, J.-M. AMIRAUT et B. GÉNÉRE, 1997. *Mycorhizes, pépinières et plantations forestières en France*. Rev. For. Fr., 49: 131-154.

MARX, D.H. et C.E. CORDELL, 1988. *Specific ectomycorrhizae improve reforestation and reclamation in the eastern United States*. Dans: Proceedings of the Canadian Workshop on Mycorrhizae in Forestry, 1-4 Mai 1988, éd. M. Lalonde et Y. Piché. Faculté de foresterie et de géodésie, Université Laval, Sainte-Foy, Que. p. 75-86.

MARX, D.H., B.M. STEPHEN et C.E. CORDELL, 1992. *Application of specific ectomycorrhizal fungi in world forestry*. Dans : Frontiers in industrial mycology, G.F. Leatham. Chapman & Hall, New York, p. 78-98.

QUORESHI, A.M., G. KERNAGHAN et G.A. HUNT, 2009. *Mycorrhizal fungi in Canada forest nurseries and field performance of inoculated seedlings - Chapter 9*. Dans : Khasa, D., Y. Piché et A.P. Coughlan (éds.). *Advances in mycorrhizal science and technology*. NRC Research Press, Ottawa, Canada. p. 115-127.

THIFFAULT, N., B.D. TITUS et A.D. MUNSON, 2004. *Black spruce seedlings in a Kalmia-Vaccinium association: microsite manipulation to explore interactions in the field*. Can. J. For. Res. 34 (8): 1657-1668.

WALKER, G.R. et A.U. MALLIK, 2009. *Black spruce reforestation in Kalmia heath: seedling response to forest floor mixing and mycorrhizal inoculation with Paxillus involutus*. Can. J. For. Res. 39: 2007-2020.

YAMASAKI, S.H., J.W. FYLES, K.N. EGGER et B.D. TITUS, 1998. *The effect of Kalmia angustifolia on the growth, nutrition, and ectomycorrhizal symbiont community of black spruce*. Forest Ecology and Management 105: 197-207.

Les effets de l'augmentation du pH des substrats sur la croissance des plants forestiers produits dans les pépinières forestières

Mohammed S. Lamhamedi^{1,2,3}, Mario Renaud¹ et Linda Veilleux¹

¹ Direction de la recherche forestière, ministère des Ressources naturelles et de la Faune, 2700 rue Einstein, Québec (Québec) G1P 3W8

² mohammed.lamhamedi@mrnf.gouv.qc.ca

³ 418 643 7994 poste 6553

La photo et la note biographique complète du 1^{er} auteur sont présentées à la page 87.

Introduction

L'utilisation de substrats ayant un pH neutre à alcalin, afin de produire des plants forestiers à une échelle opérationnelle, engendre l'apparition de symptômes de déficience, selon les essences, en fer et en manganèse. Ces symptômes peuvent également être dus à un excès d'eau et une saturation du substrat pendant une période relativement prolongée (irrigation excessive, pluies abondantes, etc.). Les variations du pH (> 6,5) affectent négativement la disponibilité des éléments minéraux dans la rhizosphère, les échanges gazeux (photosynthèse, etc.), la croissance des racines et des parties aériennes des plants forestiers.

Au Québec, l'augmentation du pH des substrats tourbeux, utilisés dans les pépinières forestières, est généralement effectuée par le pépiniériste en ajoutant de la chaux dans le substrat. Par contre, dans les zones arides et semi-arides, le pépiniériste ne contrôle pas totalement le pH initial du substrat. Dans ce cas, le problème de l'augmentation du pH dans les substrats de ces pépinières forestières est causé par la combinaison de la mauvaise qualité de l'eau d'irrigation et l'utilisation des substrats non tourbeux dont le pH initial est relativement élevé (6,5 à 8). Dans certaines régions de ces zones arides et semi-arides, le problème du pH se pose également dans les sites de reboisement où le calcaire domine.

Objectifs généraux

1. Documenter l'ampleur et l'impact des modifications des propriétés physico-chimiques des substrats, notamment le pH, sur la croissance et la nutrition minérale des plants forestiers au Québec et ailleurs.
2. Établir des courbes de titration d'une solution aqueuse extraite du substrat ayant un pH neutre à alcalin dont l'objectif est de déterminer la quantité d'acide phosphorique à ajouter pour diminuer le pH du substrat.
3. Élaborer quelques recommandations claires et précises sur les techniques culturales et les approches à utiliser pour corriger ce problème de déficience en fer.
4. Informer les pépiniéristes sur les limites des moyens proposés pour corriger les symptômes de déficience en vue de rattraper les retards de croissance observés sur les racines et les parties aériennes surtout lorsque la durée de la saison de croissance est très courte, ce qui est le cas au Québec.

LAMHAMED, M.S., M. RENAUD et L. VEILLEUX, 2011. *Les effets de l'augmentation du pH des substrats sur la croissance des plants forestiers produits dans les pépinières forestières*. Dans : Colas, F.; Lamhamedi, M.S. (éds.), 2011. Production de plants forestiers au Québec : la culture de l'innovation. Colloque de transfert de connaissances et de savoir-faire. Carrefour Forêt Innovations, 4-6 octobre 2011, Québec (Canada), 140 p. pp : 33 – 45.

Problématique de l'augmentation du pH des substrats tourbeux, engendrée par l'ajout de la chaux, dans les pépinières forestières du Québec

Au Québec, les pépinières forestières utilisent uniquement les substrats tourbeux pour produire les plants forestiers. La tourbe représente plus de 80 % de la composition de ces substrats, et elle est généralement mélangée avec d'autres constituants (perlite, vermiculite, compost, etc.). Ces substrats sont caractérisés par des pH très acides (3 à 4).

Certaines pépinières forestières gouvernementales et privées du Québec ont eu recours à l'utilisation de la chaux à une échelle opérationnelle afin d'augmenter le pH du substrat à 5,4 (lors de l'empotage, ajout de chaux dolomitique (20 % - 50 % de MgCO_3) ou calcique (70 % - 100 % de CaCO_3) ou à l'achat de substrats tourbeux qui contiennent déjà de la chaux), ceci avec l'objectif d'optimiser la disponibilité et l'absorption des éléments minéraux.

Généralement, les pépiniéristes utilisent des ratios de mélange (tourbe / chaux) relativement similaires à ceux utilisés en horticulture et en agriculture (5 à 12 Kg de chaux / m^3) sans tenir compte des spécificités et des exigences nutritionnelles des essences forestières qui sont complètement différentes de celles des espèces horticoles et agricoles. Lorsqu'ils achètent des substrats déjà mélangés avec de la chaux, selon les recommandations du fournisseur, ils n'ont souvent aucune information sur le ratio du mélange et sur la nature de la chaux utilisée. De plus, les pépiniéristes n'ont aucune garantie de la stabilité du pH tout au long des deux saisons de croissance des plants.

Au Québec, pour faire un diagnostic et juger de l'ampleur des effets de l'ajout de la chaux dans les substrats sur la qualité morpho-physiologique des plants, nous avons effectué quelques visites de différentes pépinières forestières du Québec. Nous avons également réalisé certaines analyses minérales des substrats, de l'eau d'irrigation et des plants en laboratoire¹.

Symptômes de déficience et de croissance des plants de différentes essences forestières du Québec

Lorsque le ratio de mélange (tourbe / chaux) n'est pas optimal pour la production de plants forestiers, ces derniers montrent des symptômes de déficience et une réduction significative de leur croissance. Ces symptômes se caractérisent initialement par une chlorose des jeunes aiguilles des apex (Figures 1 et 2a-b). Étant donné que la concentration de la chaux ne peut pas être identique d'une cavité à l'autre, dans le cas de la production de plants forestiers en récipients, ou d'une zone à une autre, dans le cas des

plants à racines nues, l'apparition des symptômes de déficience (chlorose) et la réduction de la croissance en hauteur montrent une certaine variabilité spatiale (Figures 1b-c et 2a, c). En effet, la chlorose sera généralement apparente rapidement dans certaines zones des plants à racines nues ou dans les cavités des récipients où la concentration de la chaux est relativement élevée avec un pH neutre à alcalin. Cependant,

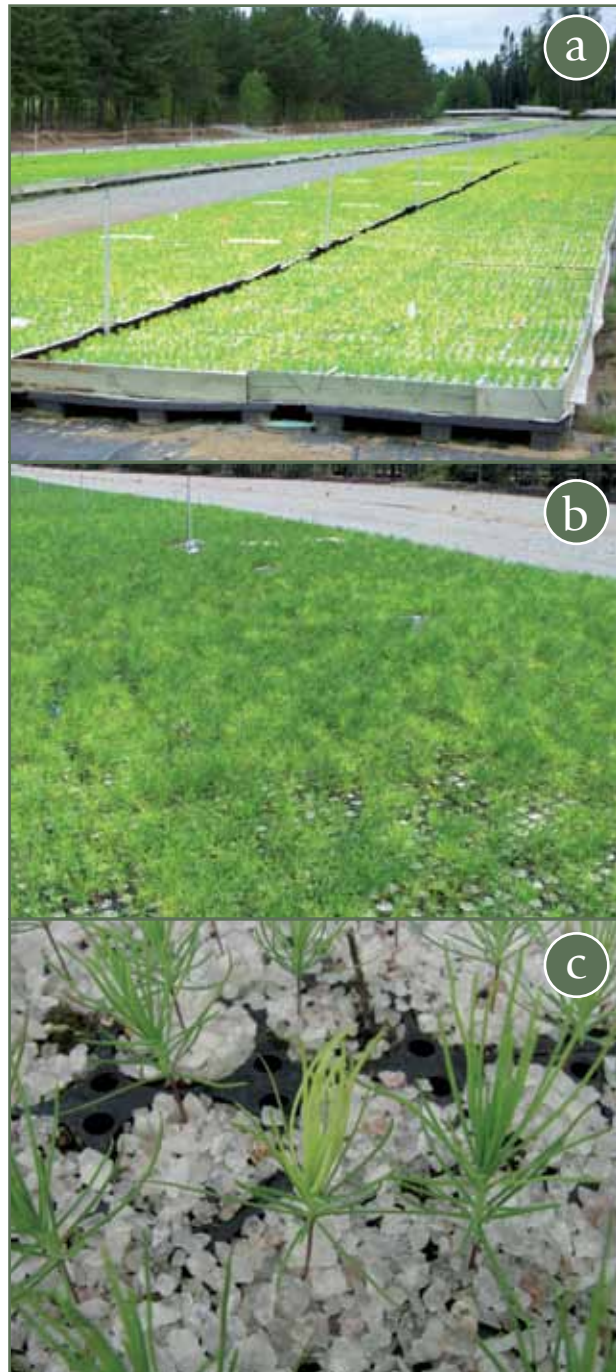


Figure 1. a- Chlorose relativement généralisée et b- sporadique chez des plants de pin gris. c- Exemple de chlorose des apex chez le pin gris (1+0) en pépinière forestière.



Figure 2. a- Exemple de variabilité spatiale de chlorose chez les plants du pin blanc cultivés à racines nues. b- Exemple de chlorose des apex de boutures d'épinette blanche produites à racines nues. c- Exemple de variabilité spatiale de la croissance en hauteur de plants de pin blanc en récipients causée par les variations du pH entre les cavités en réponse à l'ajout de la chaux dans le substrat.

les modifications du pH peuvent varier selon la nature et la composition initiale de la tourbe ou du sol, le type de chaux, les variations des propriétés internes de la tourbe ou du sol, de l'acidité échangeable et de l'acidité de réserve ^{2,3}.

Après l'empotage, le pH initial du substrat mélangé avec de la chaux est généralement optimal pour la croissance des plants résineux (4,3 à 5,3). **Le problème réside dans la dégradation progressive de la chaux qui engendre une augmentation continue du pH tout au long de la première saison.** Cette augmentation du pH pourrait également continuer au début de la deuxième saison de croissance et elle est le résultat du type de chaux utilisée et du ratio de mélange (chaux / substrat) non optimal pour la croissance à long terme des plants résineux en pépinière forestière. Par exemple, chez des plants d'*Abies fraseri* (Pursh) Poir., BRYAN *et al.* (1989) ⁴ ont évalué différents ratios de mélange (0, 1, 2, 4 et 8 Kg de chaux dolomitique / m³ de tourbe). Après 19 mois de croissance en serre, les plants produits dans les mélanges ayant des ratios 1 et 2 Kg de chaux dolomitique / m³ de tourbe ont montré une meilleure croissance des racines et des parties aériennes que les autres ratios, soit 0, 4 et 8 Kg de chaux dolomitique / m³ de tourbe ⁴. De plus, les meilleures croissance ont été également obtenues avec des pH très acides (4,2 et 4,5) de ces deux ratios (1 et 2 Kg chaux dolomitique / m³ de tourbe). Ceci laisse suggérer que les plants résineux de certaines essences peuvent mieux croître avec des pH très acides par comparaison au pH optimal (pH=5,5) généralement recommandé pour les conifères.

Ainsi, lorsque le pH n'est pas stable et élevé (neutre à alcalin), celui-ci affecte de façon négative la croissance des plants, aussi bien chez les feuillus que chez les résineux par comparaison aux plants témoins (Figures 3 à 6).

Lors de la dégradation de la chaux, surtout calcique, la présence du calcium et la formation, par la suite, du carbonate de calcium (CaCO₃), des ions bicarbonates (HCO₃⁻) et carbonates (CO₃²⁻) contribuent de façon majeure à l'augmentation du pH du substrat de croissance. Par la suite, le calcium et le magnésium se lient à ces ions pour former des carbonates de magnésium et de calcium. Ces deux sels insolubles ne se lessivent pas facilement du substrat; ils contribuent aussi au maintien du pH neutre à alcalin. De cette façon, des concentrations élevées en calcium peuvent contribuer à l'apparition des symptômes de déficience en magnésium. Selon la sensibilité des espèces, des pH élevés peuvent engendrer des déficiences spécifiques à plusieurs éléments (Zn,

Encadré 1. Exemple d'utilisation des courbes de titration et calcul des quantités d'acide phosphorique à appliquer à une échelle opérationnelle.

Objectif

Calculer la quantité d'acide phosphorique H_3PO_4 à 85 % par gramme de substrat sec à ajouter pour abaisser le pH à 5.3 :

À partir d'une courbe de titration, on a déterminé que 120 microlitres de H_3PO_4 1 % sont suffisants pour abaisser le pH à 5.32 d'un filtrat de substrat de 30 mL.

Donc, 120 microlitres H_3PO_4 0,85 % neutralisent 30 ml de filtrat, soit :

$$\frac{0,120 \text{ ml } (\text{H}_3\text{PO}_4 \text{ à } 0,85 \%) / 30 \text{ ml} \times 88,93^* (\% \text{ humidité à saturation du substrat})}{100-88,93} =$$

0,0321 ml H_3PO_4 à 0,85 % par gramme de substrat sec (à 105°C)
ou 0,000321 ml de H_3PO_4 85 % à ajouter par gramme de substrat sec (à 105°C).

Pour chaque type de récipient dont le pH du substrat doit être ajusté, il faut déterminer le poids sec total de substrat (séché à 105°C) par cavité et le multiplier par le volume d'acide phosphorique 85 % calculé ci haut pour les plants 1+0 et 2+0. Cette valeur sera la quantité à appliquer par plant. Ces valeurs serviront de base pour calculer votre besoin total de H_3PO_4 à ajouter pour chaque aire de culture devant être traitée en tenant compte des types de récipients utilisés, des superficies totales, de l'âge (1+0 ou 2+0) des plants et des systèmes de fertilisation en usage dans chaque pépinière.

Après chaque application de H_3PO_4 , il est important de déterminer à nouveau le pH du substrat afin de savoir si d'autres applications seront nécessaires ultérieurement.

Note importante

À chaque ajout de H_3PO_4 , du phosphore est donc ajouté au substrat. Il faudra donc en tenir compte dans votre calendrier de fertilisation. Pour connaître les quantités de phosphore, voici quelques données à utiliser lors des calculs :

- 1 Litre de H_3PO_4 85 % = 1436 g/L;
- l'acide phosphorique contient 32 % de P.



Figure 3. a- Chlorose des jeunes aiguilles et réduction de la croissance des plants d'épinette blanche (2+0) suite à l'ajout de la chaux dans le substrat à un ratio de 4,75 Kg de chaux/ m³ de tourbe. Notez également l'affaissement du substrat. b- Exemple de deux catégories de plants d'épinette blanche dont le substrat a un pH neutre à alcalin (7,22 – 7,36) par rapport à celui de la production normale (pH=4,85) et qui montrent une faible croissance lors de la deuxième saison de croissance. Le substrat est constitué de 80 % tourbe fine, 15 % vermiculite et 5 % perlite.



Figure 4. a- Comparaison de la croissance des racines et des parties aériennes des plants de pin blanc (2+0) produits en pépinière forestière. Plants (à droite et au centre) dont le substrat initial contenait de la chaux et ayant subi un traitement pour acidifier le pH. Plant témoin (à gauche) n'ayant subi aucun traitement. b- Morphologie et croissance des plants d'épinette blanche (2+0) produits en pépinière forestière dont le substrat contenait de la chaux (4,75 Kg de chaux / m³ de tourbe; pH=7,36) comparés aux plants témoins (c).

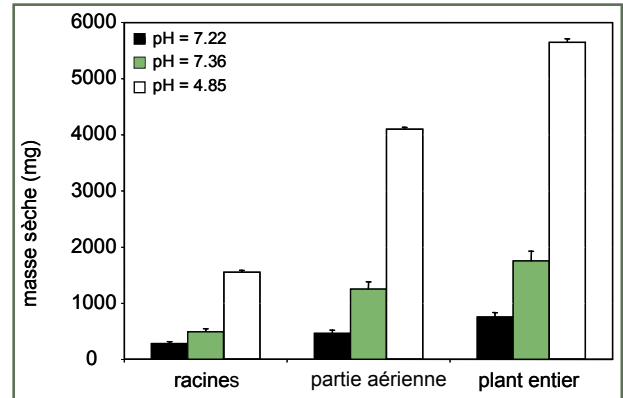


Figure 5. Masses sèches moyennes des parties aériennes, des racines et totales de deux catégories de plants d'épinette blanche (2+0) produits en pépinière forestière dont le substrat a un pH neutre à alcalin (7,22 – 7,36; 4,75 Kg de chaux / m³ de tourbe) par rapport à celui de la production normale (pH = 4,85). Le substrat est constitué de 80 % de tourbe fine, 15 % de vermiculite et 5 % de perlite.

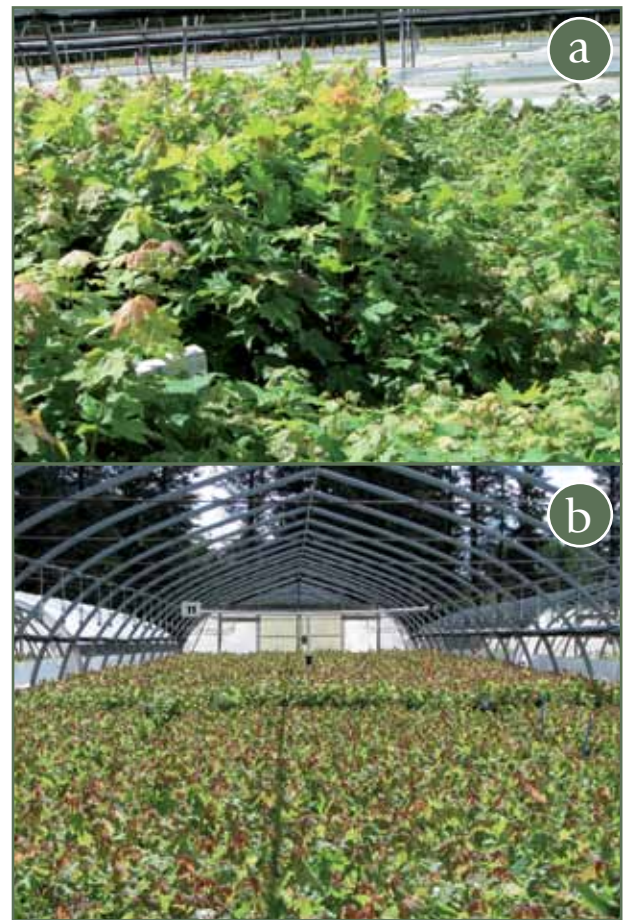


Figure 6. Différence de croissance lors de la deuxième saison de croissance en pépinière forestière pour a- des plants d'érable à sucre (témoin à gauche, ajout de chaux à droite); et b- d'érable argenté (ajout de chaux au premier plan et témoin au second plan).

Cu, B, Fe, Mn et Ca) chez les résineux. Pour corriger la déficience en fer et même si on ajoute des fertilisants riches en fer sous forme chélatée, à l'exception du fertilisant Sequestrene (NaFeEDDHA; Fe : 10 %, application foliaire ou au substrat) (Figure 7), la disponibilité du fer dans la rhizosphère, c'est-à-dire dans l'environnement immédiat des racines, se trouve très réduite lorsque le pH s'approche ou dépasse la neutralité (pH > 6 à 6,5; Figure 7).

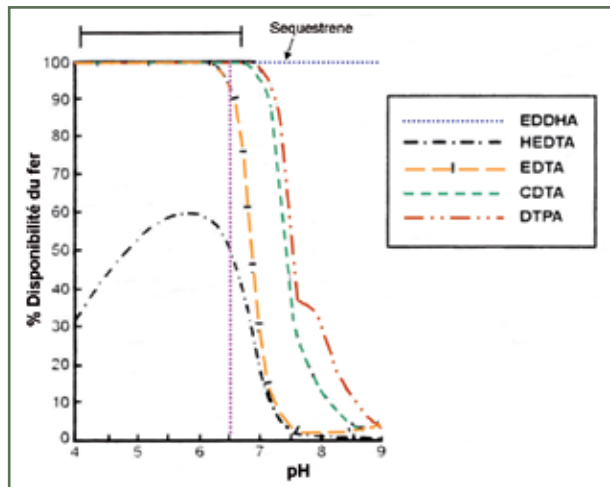


Figure 7. Pourcentage de disponibilité du fer des différents fertilisants en fonction de l'augmentation du pH. Lorsque le pH devient supérieur à 6,5, la disponibilité du fer diminue significativement et devient presque nulle (Figure adaptée de LANDIS 1997).

Détermination des courbes de titration

Pour corriger les symptômes de déficience observés chez les plants forestiers et favoriser la disponibilité et l'absorption des éléments minéraux par les racines des plantes, le pépiniériste n'a pas d'autre choix que de recourir à l'ajout de fertilisants acides pour diminuer le pH des substrats. Le recours aux courbes de titration permet de déterminer de façon précise la quantité requise de fertilisant acide pour diminuer le pH du substrat de croissance. Les courbes de titration doivent être déterminées par un laboratoire spécialisé.

Le choix du fertilisant acide ou d'un produit donné (non fertilisant), dont l'objectif est de diminuer le pH du substrat, doit se faire sur la base d'une connaissance approfondie :

- de la quantité précise du fertilisant ou du produit à ajouter pour atteindre la valeur cible du pH;
- des réactions chimiques qui pourront avoir lieu entre ce fertilisant ou ce produit et les éléments minéraux contenus dans la solution du substrat (Ca, SO_4 , etc.). Par exemple, certains pépiniéristes optent pour l'utilisation de l'acide sulfurique (H_2SO_4) pour

acidifier le substrat ou l'application des sulfates de fer (FeSO_4) pour corriger la déficience en fer. Ces deux produits contiennent des sulfates qui vont réagir avec les ions calcium, contenus dans la solution fertilisante (apports par les autres fertilisants) ou le calcium du substrat pour former du gypse (CaSO_4) sous forme de précipité. Ainsi, on doit s'assurer de la compatibilité des produits retenus, notamment entre ceux utilisés pour corriger le pH et ceux de la solution fertilisante (ou solution du substrat);

- des effets directs ou secondaires des doses appliquées sur la qualité des plants et la santé humaine. Lorsque l'injection d'acide est nécessaire, utiliser des gants et des lunettes de protection et **toujours ajouter l'acide à l'eau, mais jamais l'eau à l'acide**. Il serait important d'éviter l'utilisation de l'acide nitrique (HNO_3) car ce produit peut, en cas d'éclaboussures sans protection adéquate des yeux, provoquer la cécité chez la personne qui fait les mélanges des différents produits. Ainsi, il est recommandé d'utiliser l'acide phosphorique pour diminuer le pH et assurer un apport en phosphore, tout en limitant les risques lors de la préparation des solutions.

Avant de commencer à déterminer la courbe de titration, le pépiniériste devrait faire des analyses minérales en laboratoire sur des échantillons composites et représentatifs du substrat afin d'en connaître le pH initial. Ainsi, dans chacun des échantillons composites de substrat ayant des pH neutres à alcalins, on doit prélever 10 mL d'extrait de la solution du substrat. Par la suite, la diminution du pH est notée selon la quantité du fertilisant acide ajoutée

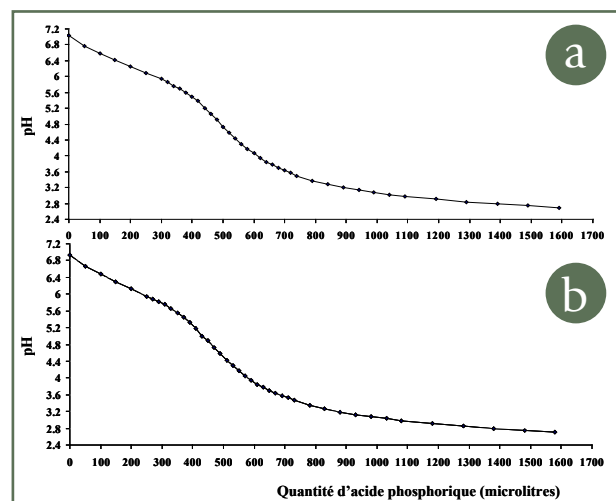


Figure 8. Exemple de deux courbes de titration du filtrat extrait des deux catégories de substrats (pH neutre à alcalin). Le volume titré est de 30 mL. L'acide phosphorique (H_3PO_4) utilisé est concentré à 1 % (1 mL d'acide phosphorique concentré à 85 % par 100 mL, soit 0,85 % en H_3PO_4). Ces courbes de titration ont été déterminées par le laboratoire de chimie organique et inorganique de la direction de la recherche forestière du ministère des Ressources naturelles et de la Faune.

à l'aide d'une micropipette. La figure 8 montre un exemple de deux courbes de titration de deux échantillons composites de substrat. Dans ce cas précis, on a utilisé l'acide phosphorique concentré à 1 % prélevé à partir d'une solution d'acide phosphorique (H_3PO_4) concentrée à 85 % et une solution de substrat de 30 mL issue d'un mélange de trois échantillons composites (10 mL / échantillon composite). Le recours à l'acide phosphorique permet la diminution du pH et un apport de phosphore. L'encadré 1 présente un exemple d'utilisation des courbes de titration et de calcul des quantités d'acide phosphorique à appliquer à une échelle opérationnelle.

Solutions et recommandations préconisées et leurs limites

- Avant d'utiliser un substrat qui contient de la chaux à une échelle opérationnelle et de généraliser son utilisation pour toute la pépinière, il est important de faire des essais en tenant compte du ratio de mélange (chaux / tourbe) et de l'essence forestière.
- Il faut éviter les ratios de mélange (chaux / tourbe) utilisés en agriculture et en horticulture (4 à 12 Kg de chaux / m^3 de tourbe) car les seuils de tolérance des plantes horticoles en matière de variations du pH sont complètement différents de ceux des plants forestiers. Il est fortement recommandé d'utiliser des taux de mélange plus faibles (1 à 2 Kg / m^3 maximum) pour la production de plants forestiers.
- Dans le contrat d'achat du substrat préalablement mélangé avec de la chaux, on doit faire préciser la composition chimique de la chaux, le ratio de mélange (chaux / tourbe), l'uniformité du mélange, les variations tolérées des concentrations de la chaux entre les échantillons de substrat dans les cavités, la stabilité du pH et les variations limites de l'augmentation du pH à tolérer pendant au moins deux saisons de croissance.
- Tenir compte de la libération lente de la chaux et de son effet sur l'évolution de l'augmentation du pH du substrat en relation avec la disponibilité des éléments minéraux.
- Lorsque le pépiniériste se trouve devant une situation de chlorose généralisée ou sporadique des plants résineux en réponse à l'ajout de la chaux, il s'avère nécessaire de :
 - faire un échantillonnage représentatif du substrat en tenant compte de la variabilité spatiale, ainsi que des variations de chlorose entre les plants afin d'avoir des mesures représentatives et fiables du pH;
 - faire réaliser des courbes de titration par un laboratoire reconnu pour connaître avec précision la quantité du produit acidifiant à ajouter pour abaisser le pH du substrat;
 - ne pas utiliser l'acide nitrique (HNO_3), l'acide sulfurique (H_2SO_4) et les sulfates de fer (FeSO_4) (précipitation, compatibilité, etc.). Par contre, il est recommandé d'utiliser l'acide phosphorique concentré car ce produit peut abaisser le pH et peut apporter une partie de la quantité du phosphore;

tion, compatibilité, etc.). Par contre, il est recommandé d'utiliser l'acide phosphorique concentré car ce produit peut abaisser le pH et peut apporter une partie de la quantité du phosphore;

- faire une vérification du système de fertigation et de la compatibilité entre les fertilisants et les produits acidifiants afin de s'assurer que la dose souhaitée à appliquer est réellement reçue par les plants;
- respecter les ratios standards d'équilibre entre les différents éléments minéraux;
- utiliser des systèmes ayant un bon coefficient d'uniformité lors de l'application des solutions;
- faire des analyses physico-chimiques du substrat pour suivre l'évolution de la fertilité et du pH du substrat, ainsi que les symptômes de chlorose des aiguilles;
- commencer le plus rapidement possible à abaisser le pH du substrat et éviter les délais car il est souvent difficile de corriger la déficience en fer surtout lorsqu'elle devient très sévère et que la saison de croissance est très courte. En présence d'une déficience sévère, la chlorose peut entraîner une mortalité des apex. Malgré les corrections apportées, il se peut qu'une grande proportion des plants ne puisse répondre aux normes et critères de qualité des plants du ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec.

Effets de la qualité de l'eau d'irrigation et des variations du pH des substrats sur la qualité morpho-physiologique des plants produits dans les pépinières forestières des zones semi-arides et arides

Qualité de l'eau d'irrigation

À l'inverse du Québec, plus particulièrement dans les zones semi-arides et arides, l'eau d'irrigation dans la plupart des pépinières forestières se caractérise par une salinité élevée, un pH basique ($\text{pH} > 7$) et une alcalinité élevée. La source de l'alcalinité est généralement causée par les ions bicarbonates (HCO_3^-) et carbonates (CO_3^{2-}). L'eau d'irrigation en pépinière ayant une concentration en bicarbonates supérieure à 60 ppm contribue de façon significative à l'augmentation du pH du substrat surtout vers la fin de la saison de croissance^{5,6}. Pour une croissance optimale de plants résineux et de feuillus en pépinière, le pH de la rhizosphère doit être maintenu, respectivement, à 5,5 et 6,5⁷. Ainsi, dans certaines pépinières, le pH de l'eau d'arrosage varie entre 7,6 et 8,1 alors que la concentration en bicarbonates oscille entre 146 ppm et 207 ppm (Figure 9).

En plus des apports de bicarbonates par l'eau d'irrigation, l'excès d'eau lors des irrigations contribue également à l'augmentation rapide de la concentration des bicarbonates dans la rhizosphère suite à la réaction chimique qui se produit entre le carbonate de calcium, l'eau et l'accumulation du gaz carbonique (CO_2) en absence d'oxygène. Le gaz carbonique est

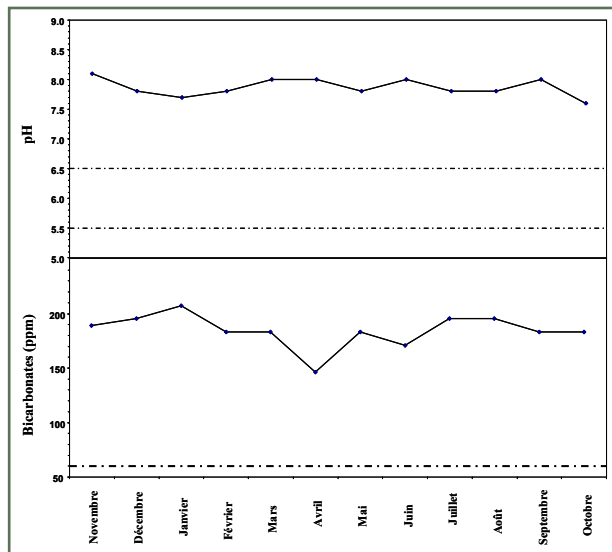


Figure 9. Évolution, tout au long de l'année, du pH et de la concentration en bicarbonates de l'eau d'arrosage à la pépinière forestière de Kasserine en Tunisie située dans une région aride. Les lignes en pointillée indiquent les valeurs souhaitées pour produire des plants forestiers en pépinière forestière.

issu de la respiration des racines et des micro-organismes. Par exemple dans les pépinières forestières modernes en Tunisie (Figure 10a), la combinaison de ces principaux facteurs fait que les symptômes de chlorose apparaissent de façon précoce dans les aires de chevauchement entre deux asperseurs d'irrigation successifs où on assiste à des teneurs en eau élevées et à une accumulation des ions bicarbonates responsables de l'augmentation rapide du pH de la rhizosphère (Figure 10b). Aussi, le faible volume du substrat contenu dans chaque cavité du conteneur fait que l'augmentation du pH est plus rapide dans les conteneurs que dans les sols agricoles.

D'autres facteurs contribuent également à l'apparition de la déficience en fer, notamment des excès en cuivre, en zinc, en manganèse ou en phosphore. De faibles concentrations en potassium ou un déséquilibre du ratio (Fe : Cu : Mg) peuvent aussi induire une déficience en fer ⁷. Dans le cas de la production de plants dans les pépinières modernes en Tunisie, ces facteurs ont été relativement contrôlés suite à l'optimisation des programmes de fertilisation ^{6,8}. Les fréquences d'apparition de la chlorose des aiguilles et des feuilles des essences forestières et fruitières sont généralement plus élevées dans les sols où il y a une dominance du calcaire ^{9,10,11}.

Suite à l'irrigation avec une eau chargée en bicarbonates, le calcium et le magnésium se lient à ces ions pour former les carbonates de magnésium et de calcium. Ces deux sels insolubles ne se lessivent pas facilement du substrat et contribuent à l'augmenta-

tion du pH du substrat de croissance. Les pH élevés affectent la disponibilité du zinc, du fer et du manganèse ⁷. Selon les pH initiaux de l'eau d'arrosage et du substrat, l'augmentation du pH dans le substrat induit des déficiences apparentes en fer malgré son ajout dans les solutions de fertilisation. Cette déficience se caractérise au départ par une chlorose des jeunes aiguilles de l'apex aussi bien chez les résineux (Figure 10c) que chez certains feuillus ou espèces fruitières méditerranéennes ^{7,12,13}.

L'augmentation du pH dans la rhizosphère des plants produits en récipients dépend de la composition du substrat, de son pH initial et des régies d'irrigation et de fertilisation. En effet, en utilisant une eau d'irrigation chargée en bicarbonates, la déficience en fer apparaît initialement dans les substrats qui ont un pH proche de la neutralité lors de l'empotage (Figures 10d-f). De plus, la sensibilité et les besoins en fer varient selon les espèces résineuses. En utilisant les mêmes substrats et les mêmes régies d'irrigation et de fertilisation, les plants de *Pinus pinea* ont montré des symptômes de déficience en fer de façon plus précoce par rapport à ceux de *Pinus halepensis* (Figure 10f) alors que les plants de *Cupressus sempervirens* n'ont jamais montré de symptômes de déficience en fer. Les analyses minérales ont confirmé que dans certains cas de déficience sévère en fer, la concentration foliaire ne dépassait pas 11 ppm alors que la concentration souhaitée devrait être, en moyenne, de l'ordre de 100 ppm.

Si la déficience en fer n'est pas corrigée et devient très sévère, les aiguilles des apex terminaux et latéraux deviennent blanches puis, s'ensuit alors une perte de turgescence et un dessèchement (Figures 11a-b). La déficience peut devenir généralisée et affecter négativement le taux de photosynthèse et la croissance des plants et, par conséquent, la qualité de tous les plants produits en pépinière ⁶. Pour plus de détails, le rôle du fer dans les processus métaboliques spécifiques à la synthèse de la chlorophylle et au transport des électrons dans les chaînes de respiration et de photosynthèse sont décrits de façon détaillée dans des articles de synthèse ^{14,15}.

Solutions et recommandations préconisées

- Analyse physico-chimique de l'eau et des substrats : la première étape a consisté à faire une analyse physico-chimique initiale du substrat et de l'eau, ainsi que tout au long de la saison de croissance, pour tenir compte des variations des différents paramètres de l'eau (pH, apport en nitrates et autres éléments nutritifs, etc.).
- Optimisation du programme de fertilisation : les programmes de fertilisation pour chaque essence (résineux et feuillus) ont été ajustés en tenant

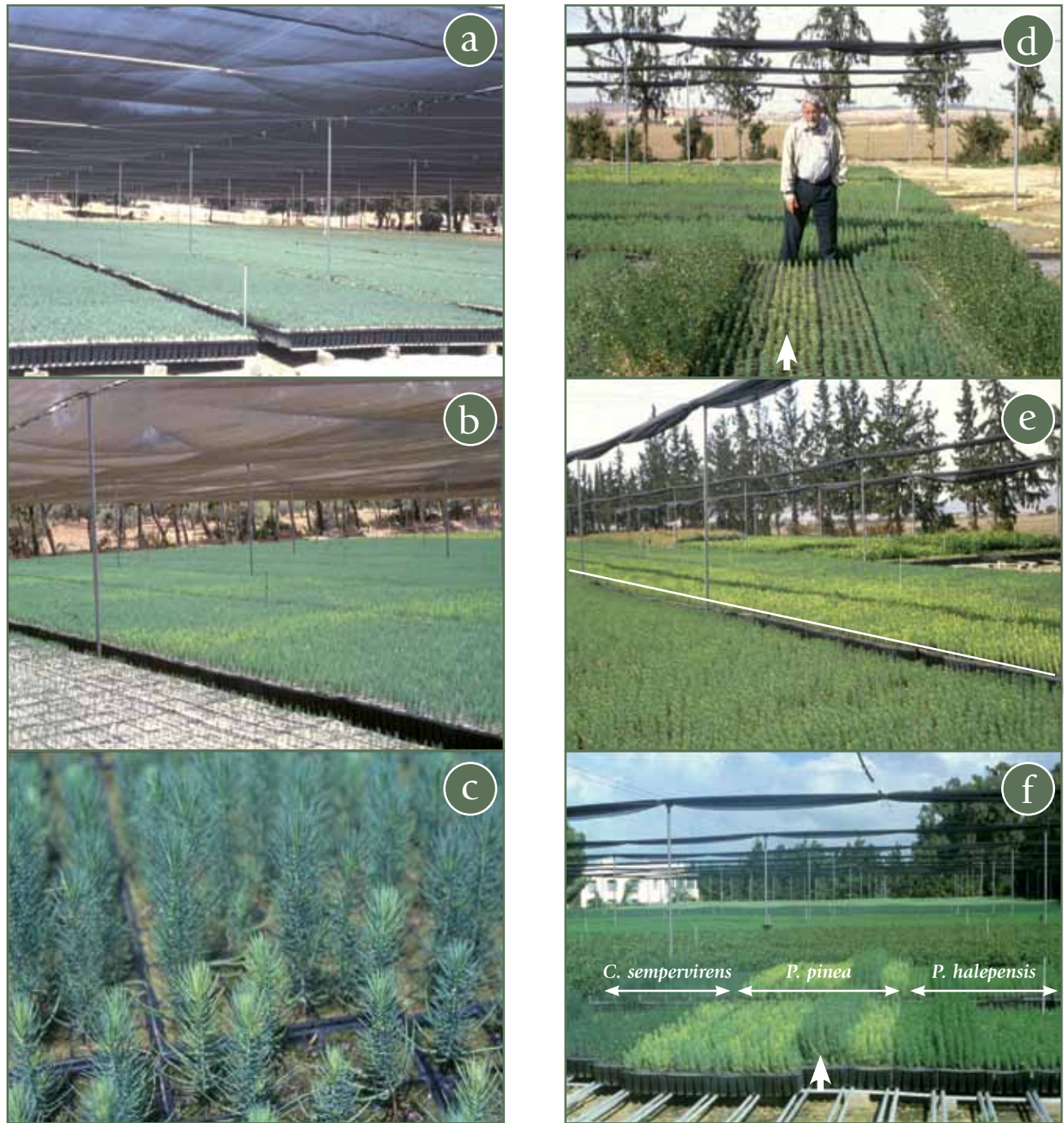


Figure 10. a- Vue générale d'une pépinière forestière moderne en Tunisie. b- Apparition précoce de la chlorose dans l'aire de chevauchement entre les asperseurs. c- Premier stade de l'apparition de la chlorose chez les jeunes aiguilles de l'apex des plants de *Pinus pinea* produits dans un substrat à base de compost. Noter l'absence de chlorose chez les plants à l'arrière, produits dans un substrat à base de tourbe et de vermiculite. d- Apparition précoce de la chlorose dans un substrat à base de compost dont le pH initial est proche de la neutralité (flèche). Chaque rangée de récipients représente un substrat différent. e- La chlorose peut devenir généralisée et affecter la qualité des plants. Les plants non chlorosés sont produits dans un substrat à base de tourbe et de vermiculite. La ligne blanche sépare les plants produits dans le substrat de tourbe et de vermiculite de ceux produits dans le compost (en arrière). f- Exemple de différence en matière de sensibilité entre les essences résineuses selon les variations du pH. Apparition précoce de la chlorose chez les plants de *Pinus pinea* produits dans des substrats à base de compost. Chaque rangée de récipients représente un substrat. Notez la croissance et l'absence de chlorose chez les plants de cette essence produits dans un substrat à base de tourbe et de vermiculite (flèche au centre). Notez également l'absence de chlorose à ce même stade de croissance chez les plants de *Pinus halepensis* et *Cupressus sempervirens*.

compte de l'apport de l'eau et du produit acidifiant (acide phosphorique) en éléments minéraux, de la compatibilité entre les fertilisants, des ratios d'équilibre entre les éléments minéraux, des stades de croissance et de la phase dépressive des nitrates dans les substrats à base de compost (éviter l'immobilisation de l'azote pendant les premières phases de croissance des plants). La quantité d'acide phosphorique à ajouter a été déterminée à l'aide d'une courbe de titration.

- Étant donné que les pH initiaux du substrat et de l'eau sont neutres à basiques, nous avons opté pour l'utilisation du fertilisant NaFeEDDHA comme source de fer car la disponibilité du fer reste maximale (100 %) entre les pH 4 à 9 (Figure 7).
- Inoculation des plants par des champignons ectomycorhiziens en vue de corriger la déficience en fer.

L'utilisation d'un substrat standard relativement stérile à base de compost et l'absence d'une mycorhization naturelle justifient le recours à l'inoculation par les champignons ectomycorhiziens. Ceci permet d'améliorer davantage la qualité des plants et faciliter l'absorption, la disponibilité et la correction de la déficience en fer ^{16, 17}.

Dans le cadre du projet de modernisation des pépinières forestières, nous avons opté pour l'utilisation des spores de *Rhizopogon* comme inoculum ^{18, 19}. Cependant, les années sèches sont généralement caractérisées par une production très faible de carpophores de champignons ectomycorhiziens. Parmi les champignons les plus abondants en Afrique du Nord et qui tolèrent les stress hydrique et thermique, on trouve *Pisolithus tinctorius*, *Rhizopogon* sp. et *Cenococcum geophilum*. L'abondance de ce dernier est relativement très faible par comparaison aux deux premiers.

En tenant compte de l'effet négatif des concentrations élevées en éléments minéraux, notamment celles du phosphore sur le degré de colonisation des racines, nous avons opté d'inoculer les plants lorsque plus de 80 % d'entre eux ont atteint les caractéristiques de croissance souhaitées. Cette phase coïncide avec la diminution significative de l'utilisation des fertilisants en début d'automne (mi-août) lors de la période d'endurcissement des plants et du retrait des ombrières. Elle coïncide également avec l'apparition des symptômes de déficience en fer et de la phase de croissance active des racines. Dans le cas où on produit en pépinière des essences non exigeantes en fertilisants, on peut inoculer les plants dès que la germination des semences est complétée.

Le recours à l'utilisation des spores comme technique d'inoculation ne nécessite pas un équipement

de laboratoire très sophistiqué et onéreux. De plus, cette approche est à la portée de tous les responsables des pépinières forestières et facile à introduire dans l'itinéraire technique de production de plants à l'échelle opérationnelle. Les spores sont obtenues à partir de fructifications dont l'abondance est relativement importante en automne surtout après les premières pluies. Sur le plan pratique, on doit récolter les fructifications des deux champignons (*Rhizopogon* et *Pisolithus*) tout en évitant de récolter les carpophores âgés et complètement ouverts. On transporte ces fructifications dans un sac en papier et on les laisse sécher à l'abri des poussières, à température ambiante (20-25 °C). Une fois que les fructifications sont séchées, on peut les stocker au réfrigérateur à 4 °C pour une courte durée ou au congélateur pour une plus longue durée.

Lors de l'inoculation, on commence par un tamisage des spores pour éliminer les particules qui pourraient obstruer les asperseurs. L'inoculation peut être effectuée en utilisant le système de fertigation. Les spores ont généralement un diamètre inférieur à 50 µm, ce qui facilite leur passage à travers les filtres et les asperseurs. Une quantité de 40 à 60 ml de spores est suffisante pour inoculer 100 000 plants. La quantité de spores nécessaire à l'inoculation peut être mélangée avec deux litres d'eau et stockés dans un réfrigérateur pour assurer une bonne dispersion des spores dans la solution initiale. Lors de l'inoculation des plants, on commence par le mouillage des plants (durée : 2 minutes) afin d'éviter l'adhérence des spores aux aiguilles ou aux feuilles. Par la suite, on procède à l'inoculation des plants par les spores et on termine par un rinçage des plants (durée : 2 minutes). Ce dernier rinçage permettra à la majorité des spores d'être en contact direct et de façon rapide avec la rhizosphère. Ainsi, deux à trois semaines après l'inoculation des plants aussi bien en pépinière traditionnelle qu'en pépinière moderne, on observe normalement l'apparition de mycorhizes de *Rhizopogon* et de *Pisolithus*.

L'inoculation des plants de pin d'Alep et de pin pignon à l'aide de spores de *Rhizopogon* a conduit à une excellente colonisation des racines et à une correction de la chlorose des plants due à une déficience en fer (Figures 11a, d). Les plants témoins non-inoculés ont continué à montrer une chlorose des aiguilles (Figure 11a). Nous avons également observé une bonne extension de la phase extramatrielle constituée par des cordons mycéliens (Figure 11c), et une bonne colonisation des racines (Figure 5d). L'utilisation d'un substrat organique moins dense et la colonisation des racines par *Rhizopogon* ont favorisé



Figure 11. a- Si la déficience en fer n'est pas corrigée, la chlorose peut atteindre les apex des branches latérales (flèche à droite). Si elle devient sévère, les apex deviennent blancs et se dessèchent (double flèche au centre). À gauche, le plant mycorhizé de *P. pinea* ne présente aucun symptôme de déficience (Tunisie). b- Dessèchement des apex des plants de *Pinus oocarpa* (Nicaragua). c- Formation de cordons mycéliens et une bonne cohésion de la carotte chez *P. pinea* (Tunisie). d- Plants de *P. pinea* mycorhizés qui ne présentent aucun symptôme de déficience en fer (Tunisie). Noter l'excellent développement des racines.

la croissance des racines et la cohésion de la carotte (Figures 11c-d).

Ainsi, les champignons mycorhiziens facilitent l'absorption et la disponibilité du fer dans la rhizosphère^{17, 20, 21} grâce à :

- l'augmentation de la surface de contact, c'est-à-dire, l'augmentation du nombre de points d'entrée;
- la production d'acides organiques et plus particulièrement l'acide oxalique. Ceci acidifie la mycorrhizosphère^{16, 22}. La concentration de cet acide est augmentée par les nitrates, le calcium et les bicarbonates;
- la production de sidérophores (hydroxamate). Ces sidérophores agissent comme chélateur et comme réservoir du fer²³. La stabilité de ces sidérophores est plus élevée (10³⁰) et leur présence dans la mycorrhizosphère augmente la disponibilité du fer²⁴.

Conclusion

- L'ajout de la chaux à un taux de mélange (chaux / tourbe) non optimal affecte de façon négative la croissance des plants (partie aérienne et racines) résineux et feuillus au Québec. Cet amendement engendre une augmentation du pH du substrat (neutre à alcalin) et des déséquilibres ioniques. Ceci affecte l'absorption des différents éléments nutritifs.
- Le taux de mélange utilisé par le pépiniériste doit tenir compte des possibilités de l'augmentation du pH selon la dégradation progressive de la chaux.
- La diminution du pH de l'eau ou du substrat pourrait se faire par l'ajout de l'acide phosphorique suite à la détermination des courbes de titration. Cependant, la diminution du pH générée par les courbes de titration est intimement liée au pH de la solution du sol lors des analyses, mais elle ne tient pas compte de la dégradation future de la chaux dolomitique et de son effet à long terme sur la croissance des plants. À cet effet, le pépiniériste pourrait faire des corrections supplémentaires en tenant compte de la diminution réelle du pH après l'application de l'acide phosphorique.
- Il serait important de commencer le plus rapidement possible d'abaisser le pH du substrat afin d'éviter les délais car il devient parfois difficile de corriger la déficience en fer surtout lorsqu'elle devient très sévère et que la saison de croissance est très courte. En présence d'une déficience sévère, la chlorose peut entraîner une mortalité des apex. Malgré les corrections apportées, il se peut qu'une grande proportion des plants ne puisse répondre aux normes et critères de qualité des plants du ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec.

Remerciements

Nous tenons à remercier MM. Denis Langlois et Carol De Blois, ainsi que le personnel du laboratoire de chimie organique et inorganique (Direction de la recherche forestière, ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec) pour leur aide et leur collaboration exemplaires lors des analyses et la détermination des courbes de titration.

Les résultats présentés dans ce document sont issus de plusieurs projets de recherche dont l'appui financier était assuré par le ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec et par plusieurs organismes subventionnaires et de développement notamment, le Centre de recherche et de développement international du Canada (phase I : 3-P-85-1007 et phase II : 3-P-90-0063), l'Agence canadienne de développement international (projet : 660/13328), la Fondation internationale pour la science, le Fonds international de coopération universitaire de l'agence universitaire de la Francophonie (projet 2000/PAS/15), la Banque mondiale (projet : BIRD 3601, prêt accordé au gouvernement tunisien) et le Fonds nordique (projet NIB/NDF).

Références

- 1- LAMHAMED, 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*. Avis technique. Direction de la recherche forestière, ministère des Ressources naturelles et de la Faune. 15 p.
- 2- CARON, J. 2001. *La tourbe et les milieux artificiels*. Dans : Payette, S. et L. Rochefort, (éds.). *Écologie des tourbières du Québec-Labrador*. Presses de l'Université Laval, Québec, Canada. p. 399-410.
- 3- RIPPY, J. F. M. 2005. *Factors affecting pH establishment and maintenance in peat-moss-based substrates*. Ph.D. thesis, North Carolina State University, USA. 150 p.
- 4- BRYAN, J. A., J. R. SEILER et R. D. WRIGHT, 1989. *Influence of growth medium pH on the growth of container-grown fraser seedlings*. J. Environ. Hort. 7(2) 62-64.
- 5- MATHERS H. 1998. *Water quality : Thinking about pH and alkalinity*. The Digger 6: 34-36.
- 6- LAMHAMED, M.S., B. FECTEAU, L. GODIN et C. GINGRAS, 2006. *Guide pratique de production en hors sol de plants forestiers, pastoraux et ornementaux en Tunisie*. Pampev International, Montréal, Canada. 88 p. (13 annexes).
- 7- LANDIS, T.D., R.W. TINUS et J.P. BARNETT, 1989. *Seedling nutrition and irrigation*. Vol. 4. *The container tree nursery manual*. Agric. Handbk. 674. USDA Forest Service, Washington DC.

- 8- LAMHAMED, M.S., Y. AMMARI, B. FECTEAU, J.A. FORTIN et H. MARGOLIS, 2000. *Problématique des pépinières forestières en Afrique du nord et stratégies d'orientation*. Cahiers Agricultures 9: 369-380.
- 9- BROWN, J.C. 1956. *Iron Chlorosis*. Ann. Rev. Plant Physiol. 7: 171-190.
- 10- SMITH, E.M. et C.D. MITCHELL, 1977. *Eastern white pine iron deficiency*. J. Arboriculture 3: 129-130.
- 11- MENGEL, K. 1994. *Iron availability in plant tissues – iron chlorosis on calcareous soils*. Plant Soil 165: 275-283.
- 12- GOGORCENA, Y., N. MOLIAS, A. LARBI, J. ABADIA et A. ABADIA, 2001. *Characterization of the response of cork oak (Quercus suber) to iron deficiency*. Tree Physiol 21: 1335-1340.
- 13- ALCÁNTARA, E., A.M. CORDEIRO et D. BARRANCO, 2003. *Selection of olive varieties for tolerance to iron chlorosis*. J. Plant Physiol. 160: 1467-1472.
- 14- CHANEY, R. L. 1984. *Diagnostic practices to identify iron deficiency in higher plants*. J. Plant Nutr. 7: 47-67.
- 15- KORCAK, R.F. 1987. *Iron chlorosis*. Hort. Rev. 9: 133-186.
- 16- LAPEYRIE, F. 1990. *The role of ectomycorrhizal fungi in calcareous soil tolerance by "symbiocalcicole" woody plants*. Ann. Sci. For. 21: 579-589.
- 17- RODRIGUEZ, R.K., J.K. DWIGHT et L.L. BARTON, 1984. *Iron metabolism by an ectomycorrhizal fungus, Cenococcum geophilum*. J. Plant Nutr. 7: 459-468.
- 18- AMMARI, A., M.S. LAMHAMED, N. AKRIMI et A. ZINE EL ABIDINE, 2003. *Compostage de la biomasse forestière et son utilisation comme substrat de croissance pour la production de plants en pépinières forestières modernes*. Annales de l'Institut National Agronomique de Tunisie. 18: 99-119.
- 19- LAMHAMED, M.S., M. ABOUROUH et J. A. FORTIN, 2009. *Technological transfer: The use of ectomycorrhizal fungi in conventional and modern forest tree nursery in northern Africa*. Dans : Advances in mycorrhizal science and technology. Khassa, D., Y. Piché et A.P. Coughlan (Eds.). NRC Research Press, Canada. p 139-152.
- 20- CRESS, W. A., G. V. JOHNSON et L. L. BARTON, 1986. *The role of endomycorrhizal fungi in iron uptake by Hilaria Jamesii*. J. Plant Nutr. 9: 547-556.
- 21- CLARK, R. B. et S. K. ZETO, 1996. *Iron acquisition by mycorrhizal maize grown on alkaline soil*. J. Plant Nutr. 19: 247-264.
- 22- PIASSARD, C. 1996. *La mycorhization des plantes forestières en milieu aride et semi-aride : nutrition minérale en terrains calcaires*. Cahiers Options Méditerranéennes 20: 27-32.
- 23- SZANISZLO, P.J., P.E. POWELL, C.P.P. REID et G.R. CLINE, 1981. *Production of hydroxamate siderophore iron chelators by ectomycorrhizal fungi*. Mycologia 73: 1158-1174.
- 24- POWELL, P.E., P.J. SZANISZLO, G.R. CLINE et C.P.P. REID, 1982. *Hydroxamate siderophores in the iron nutrition of plants*. J. Plant Nutr. 5: 653-673.

Les concentrations foliaires en azote recommandées au Québec pour les essences résineuses produites en récipients sont-elles adéquates ?

Jean Gagnon^{1,2,3} et Mohammed S. Lamhamedi¹

¹ Direction de la recherche forestière, ministère des Ressources naturelles et de la Faune, 2700 rue Einstein, Québec (Québec) G1P 3W8

² jean.gagnon@mrnf.gouv.qc.ca

³ 418 643 7994 poste 6566

La photo et la note biographique complète du 1^{er} auteur sont présentées à la page 97.

Mise en contexte

Au Québec, l'utilisation des phytocides, comme moyen de lutte contre la végétation concurrente sur les sites de reboisement, est interdite depuis l'adoption de la *Stratégie de la protection des forêts* en 1994 et son entrée en vigueur depuis 2001. À cet effet, l'utilisation des plants de fortes dimensions (PFD), constitue l'une des solutions respectueuse de l'environnement mise de l'avant par le ministère des Ressources naturelles et de la Faune (MRNF) du Québec. Toutefois, la phase d'établissement des plants qui suit leur mise en terre est une étape cruciale pour assurer leur survie et leur croissance sur les sites de reboisement. En effet, au cours de cette étape, la présence de végétation concurrente diminue de façon significative la disponibilité de plusieurs ressources (eau, éléments minéraux et lumière) et exerce un effet négatif sur l'établissement, la survie et la croissance de la plantation. Afin de contrer ces effets négatifs et stimuler l'extension des racines à travers le sol, les plants qui sont mis en terre doivent avoir des réserves foliaires en azote (N) optimales pour assurer une survie, une croissance et des processus physiologiques (échanges gazeux, etc.) adéquats en plantation.

Chaque année, plus de 150 millions de plants sont produits dans les 21 pépinières forestières du Québec (6 publiques et 15 privées). Les pépiniéristes doivent produire des plants qui répondent non seulement à différentes normes et critères de qualité morphologiques (ex : hauteur, diamètre, rapport hauteur/diamètre), mais aussi au critère physiologique de concentration foliaire minimale en azote (N). Selon ce critère en vigueur depuis 1999, la concentration foliaire minimale en N des plants des essences résineuses en récipients doit être de 1,5 % pour les plants conventionnels (volumes de cavités < 300 cm³, ex : réc. 45-110, 67-50) et de 1,7 % pour les plants de fortes dimensions (PFD) (volume des cavités > 300 cm³, ex : réc. 25-310) (VEILLEUX *et al.* 2011).

Importance de la concentration foliaire en azote (N) des plants forestiers produits en récipients

Le standard de concentration (%) foliaire en azote (N) des résineux produits en récipients devrait se situer entre 1,4 et 2,2 % (LANDIS *et al.* 1989) et, idéalement, chaque pépinière devrait développer ses

GAGNON, J. et M.S. LAMHAMEDI, 2011. *Les concentrations foliaires en azote recommandées au Québec pour les essences résineuses produites en récipients sont-elles adéquates?* Dans : Colas, F.; Lamhamedi, M.S. (éds.), 2011. Production de plants forestiers au Québec : la culture de l'innovation. Colloque de transfert de connaissances et de savoir-faire. Carrefour Forêt Innovations, 4-6 octobre 2011, Québec (Canada), 140 p. pp : 47 – 51.

propres standards. En effet, ces valeurs de référence (SWAN 1971, MORRISON 1974) varient en fonction de l'espèce produite, du stade de croissance et des pratiques culturales. La croissance de ces plants pourrait être retardée lorsque leur concentration foliaire en N est inférieure à 1,5 % alors que lorsqu'elle se situe entre 2,5 et 3,5 %, cela peut entraîner la production de tissus succulents qui deviennent alors trop fragiles (LANDIS et VAN STEENIS 2004). Selon SWAN (1971), lorsque la concentration foliaire en N d'une culture dépasse le seuil de 2,5-2,8 %, le plant est dans une phase de consommation de luxe d'azote (N), phase caractérisée par une augmentation de la concentration en N dans les aiguilles sans gain additionnel de croissance. Au Québec, Les pépiniéristes produisent généralement des plants avec des concentrations foliaires en N entre 2 et 3 % durant la phase active de croissance et près de 2 % en fin de saison.

Le succès du reboisement repose donc sur les réserves en éléments minéraux du plant et plus particulièrement, celles en azote (GROSSNICKLE 2000). À cet effet, plusieurs études réalisées au cours des 20 dernières années ont mis l'accent sur l'augmentation des réserves en azote des plants de différentes espèces (ex : *Picea mariana*, *Picea abies*, *Picea sitchensis*) en utilisant l'approche d'apport intensif d'azote « nutrient loading » en vue d'améliorer leurs performances (survie, croissance) en plantations (TIMMER et MUNSON 1991, TIMMER *et al.* 1991, MALIK et TIMMER 1996, TIMMER 1997, BOIVIN *et al.* 2002, SALIFU et TIMMER 2003, RIKALA *et al.* 2004, THIFFAULT et JOBIDON 2006, WAY, *et al.* 2007, HEISKANEN *et al.* 2009). Selon cette approche de fertilisation effectuée en pépinière lorsque la croissance en hauteur des plants est terminée et que leur bourgeon terminal est formé, des apports importants d'azote (N) sont réalisés pour induire une phase de consommation de luxe qui permettra d'augmenter leurs réserves de N (concentration et contenu), sans toutefois augmenter leurs dimensions (hauteur, diamètre, masses sèches). Bien qu'une concentration foliaire adéquate en N ne garantisse pas la survie à 100 % des plants sur le site de reboisement (d'autres facteurs comme le stress hydrique peuvent affecter la survie), elle s'avère toutefois être un bon facteur pour prédire la croissance des plants après la mise en terre (LANDIS *et al.* 2010).

Les résultats de plusieurs études ont montré que la croissance des plants après plantation peut être améliorée par de plus grandes réserves d'azote (N) suite à des traitements d'augmentation des concentrations en N réalisés en pépinière. Dans le cas d'une étude récente réalisée au Québec avec des plants d'épinette noire produits en réceptifs 45-110

(THIFFAULT et JOBIDON 2006), suite à la mise en terre de plants ayant quatre niveaux de concentrations foliaires en N (N1 : 1,43 %, N2 : 1,89 %, N3 : 2,33 % et N4 : 2,76 %), ceux avec la concentration inférieure au critère de concentration foliaire minimale en N de 1,5 % (N1 : 1,43 %) ont eu une perte de croissance importante comparativement aux autres traitements. Par contre, dans le cas des plants des deux traitements (N3 : 2,33 %; N4 : 2,76 %) qui présentaient des concentrations en N supérieures à ceux du traitement N2 (1,89 %), et répondaient au critère en vigueur au Québec, leur croissance était supérieure deux ans après le reboisement (THIFFAULT et JOBIDON 2006). Cet effet sur la croissance des plants est plus à court terme puisque cinq ans après le reboisement, les plants des quatre traitements présentaient tous des concentrations foliaires en N similaires (0,85 %).

Cependant, la durée des effets de l'apport intensif d'azote varie beaucoup selon l'espèce, les traitements de fertilisation, les concentrations foliaires initiales en N, la fertilité du sol, le climat, etc. Cela explique pourquoi, dans deux autres études (MALIK et TIMMER 1996, WAY *et al.* 2007), pour des plants d'épinette noire mis en terre sur des sites en Ontario, les effets positifs des traitements de l'apport intensif d'azote sur la croissance des plants ont duré aussi longtemps que six ans après plantation, alors que ceux obtenus avec des plants d'épinette de Norvège ont duré seulement un an (RIKALA *et al.* 2004, HEISKANEN *et al.* 2009).

Tel que mentionné précédemment, le critère physiologique de qualification des plants en réceptifs (concentration foliaire minimale en N de 1,5 ou 1,7 %), en vigueur au Québec depuis 1999, permet de maximiser les chances de succès en plantation (survie, croissance), puisque le plant dispose de réserves en azote relativement adéquates pendant sa phase d'installation en site de reboisement. Une étude de VAN DEN DRIESCHE (1988, 1991) a montré que trois ans après la mise en terre de plants d'épinette blanche et de sapin de Douglas ayant différentes concentrations foliaires en azote (N), le plus haut taux de survie des plants a été obtenu avec une concentration en N de 2,1 % dans les aiguilles des plants (Figure 1). Selon LANDIS *et al.* (1989), la concentration foliaire en azote (N) à viser pour assurer la meilleure survie et croissance des plants après plantation devrait se situer autour de 2 %.

L'azote est un des éléments constituant de la molécule de chlorophylle impliqué dans le processus de photosynthèse des plants. Le critère de concentration foliaire minimale en azote permet aussi de s'assurer que le niveau de N soit suffisant pour assurer une photosynthèse optimale chez les plants forestiers

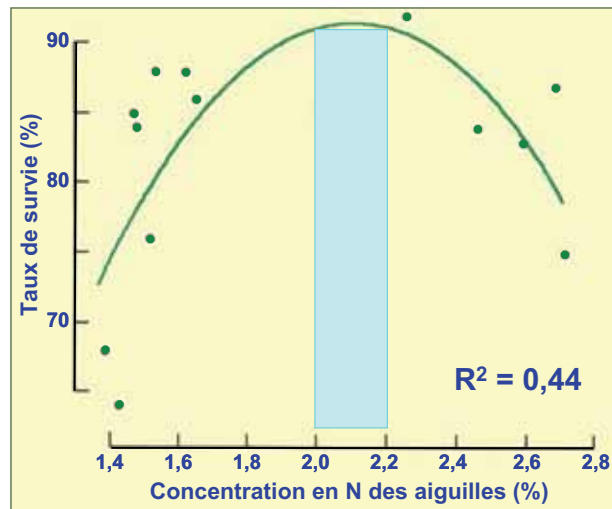


Figure 1. Effet de la concentration foliaire en azote (N) sur le taux de survie des plants du Sapin Douglas (*Pseudotsuga menziesii*). Dans ce cas précis, le taux de survie est maximal lorsque la concentration foliaire en N varie entre 2,0 et 2,2 % (adapté de VAN DEN DRIESCHÉ 1988 par LAMHAMEDI 2009).

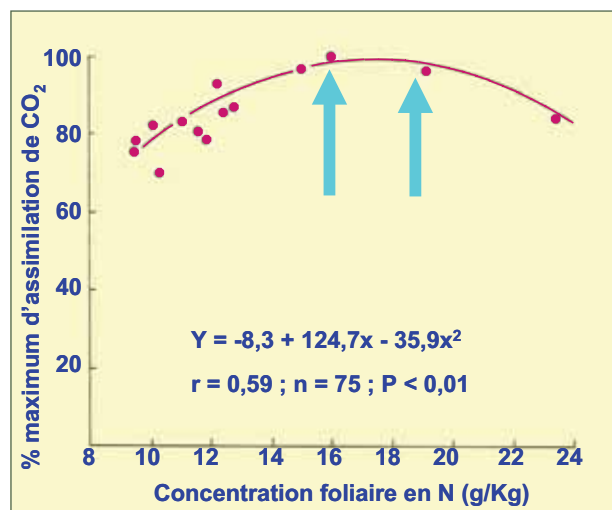


Figure 2. Effet de la concentration foliaire en azote (N) sur le taux de photosynthèse des plants de Sapin Douglas (*Pseudotsuga menziesii*). Dans ce cas précis, le taux de photosynthèse est maximal lorsque la concentration foliaire en N varie entre 1,6 et 2,0 % (adapté de BRIX 1981 par LAMHAMEDI 2009).

(Figures 2 et 3). Les produits de la photosynthèse courante sont essentiels pour la régénération et la croissance de nouvelles racines (Figure 3). En effet, les résultats d'une étude montrent qu'après deux ans de croissance en conditions contrôlées, la croissance des racines et la photosynthèse des PFD d'épinette blanche sont corrélées positivement à la concentration foliaire en azote. Lorsque la concentration foliaire en N est inférieure à 1,5 %, le taux de photosynthèse nette et la régénération des racines sont très faibles (Figure 3).

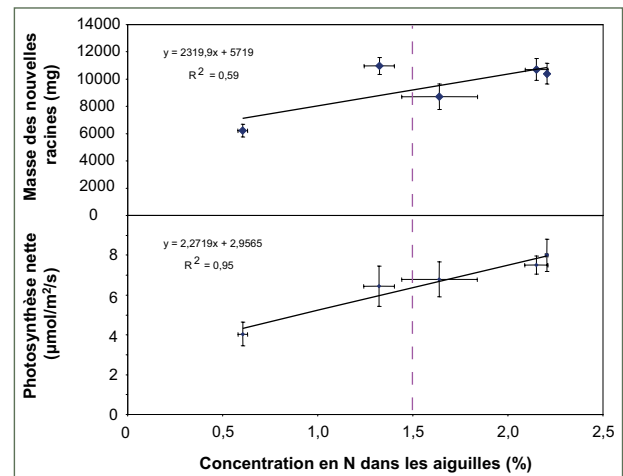


Figure 3. Variations, deux années après leur mise en terre en conditions contrôlées, de la masse des nouvelles racines et du taux de photosynthèse nette des plants d'épinette blanche (2+0) en fonction de leur concentration foliaire en N. La ligne pointillée indique la concentration foliaire en N de 1,5 % (LAMHAMEDI, résultats non publiés).

Modalités d'optimisation de la concentration foliaire en azote des plants produits en pépinière

Durant la phase de croissance active des plants, les applications d'engrais (surtout en azote) doivent être fractionnées afin de répondre aux besoins hebdomadaires des plants et éviter que des concentrations trop élevées en azote (N) dans le plant et dans le substrat ne retardent la formation du bourgeon terminal à la fin de la saison de croissance.

Parmi les différentes sources d'azote (ammonium, nitrate, urée) pouvant être utilisées pour la fertilisation azotée des résineux cultivés en récipients, il est recommandé d'utiliser les formes de N suivantes :

- durant la phase de croissance active des plants, les engrais renfermant beaucoup d'urée et d'ammonium (NH_4^+) produisent des plants plus grands que ceux à base de nitrate.
- en fin de saison (automne), il est préférable d'utiliser le NO_3^- plutôt que le NH_4^+ pour favoriser l'aouètement et l'endurcissement des plants, car le NH_4^+ stimule la croissance en hauteur des nouvelles pousses, ce qui a pour effet de retarder l'aouètement et l'endurcissement des plants.

Le tableau 1, tiré de LAMHAMEDI et GAGNON (2002), présente, à titre d'information, les concentrations foliaires en azote (%) ciblées selon les stades de croissance des plants de fortes dimensions (PFD) d'épinettes noire et blanche (1+0, 2+0) produits en récipients. Veuillez noter que dans le cas des cultures conventionnelles en récipients (45-110, 67-50), ces valeurs peuvent être diminuées de 0,1 à 0,2 %.

Tableau 1. Concentrations (%) foliaires en azote (N) ciblées selon les stades de croissance des plants de fortes dimensions (PFD) d'épinettes noire et blanche (1+0, 2+0) produits en récipients (Lamhamedi et Gagnon 2002).

Essence	Âge	Concentrations (%) foliaires en azote ciblées	
		Début de saison	Fin de saison
Épinette noire	1+0	_____	1) Septembre (pour induire la formation du bourgeon) : 1,8 % (min.)
			2) Une fois le bourgeon formé, terminer la saison à : 2,2 % (max.)
	2+0	2,0 %	1) Août (pour induire la formation du bourgeon) : 1,6 % (min.)
			2) Une fois le bourgeon formé, terminer la saison à : 2,2 % (max.)
Épinette blanche	1+0	_____	1) Septembre (pour induire la formation du bourgeon) : 2,0 % (min.)
			2) Une fois le bourgeon formé, terminer la saison à : 2,6 % (max.)
	2+0	2,3 %	1) Août (pour induire la formation du bourgeon) : 2,0 % (min.)
			2) Une fois le bourgeon formé, terminer la saison à : 2,5 % (max.)

Si, comme ce fut le cas pour certaines productions d'épinette blanche, on observe une baisse des concentrations foliaires en azote (N) de 0,5 % entre la fin de la saison 1+0 et le début de la saison 2+0, on doit tenir compte de cette baisse pour augmenter les concentrations en N en conséquence à la fin de la saison 1+0. Cette diminution de la concentration foliaire en N de 0,5 % peut s'expliquer soit :

- par l'activité métabolique des plants qui a continué tard en saison à l'automne : après la dernière mesure de la concentration foliaire en N de l'automne (conditions automnales douces qui ont retardé l'aoûtement et l'endurcissement des plants);
- par l'activité métabolique hâtive des plants qui a débuté très tôt au printemps : avant la première mesure de la concentration foliaire en N du printemps (conditions ensoleillées combinées à la fonte des neiges rapide à la fin de l'hiver ou au début du printemps).

Conclusion

Le maintien d'une concentration foliaire en azote (N) optimale, qui tient compte de l'essence, de la phase de croissance et du gabarit du plant, s'avère nécessaire afin d'assurer un meilleur taux de survie et une bonne croissance des plants sur le site de reboisement. Les réserves en azote sont primordiales surtout pendant la phase d'établissement des plants, car l'azote contribue à maintenir des taux de photosynthèse nette très élevés qui favoriseront la régénération et la croissance de nouvelles racines. Ces dernières vont faciliter le contact sol-racine et permettre aux plants d'explorer un grand volume de sol afin de satisfaire ses besoins en eau et ce, surtout lorsque l'eau devient un facteur limitant.

En conséquence, le critère de concentration foliaire minimale en azote (1,5 ou 1,7 %) en vigueur au Québec pour les plants résineux en récipients destinés au reboisement, contribue à assurer une meilleure garantie de succès des performances en plantation (survie, croissance). Il s'avère donc essentiel d'optimiser la concentration foliaire en N en relation avec les exigences physiologiques spécifiques à chaque essence et la performance des plants selon les différents sites de reboisement et les variables environnementales (fertilité de sol, climat, compétition par la végétation concurrente pour les ressources : eau, éléments minéraux, lumière, etc.).

Références

- Boivin, J.R., B.D. Miller et V.R. Timmer, 2002. *Late-season fertilization of Picea mariana seedlings under greenhouse culture: biomass and nutrient dynamics*. Ann. For. Sci. 59: 255–264.
- Brix, H., 1981. *Effects of nitrogen fertilizer source and application rates on foliar nitrogen concentration, photosynthesis, and growth of Douglas-fir*. Can. J. For. Res. 11: 775–780.
- Grossnickle, S.C., 2000. *Ecophysiology of northern spruce species: the performance of planted seedlings*. NRC Research Press, Ottawa, Ont., 407 p.
- Heiskanen, J., M. Lahti, J. Luoranen et R. Rikala, 2009. *Nutrient loading has a transitory effect on the nitrogen status and growth of outplanted Norway spruce seedlings*. Silva Fenn. 43(2): 249–260.
- Lamhamedi, M. et J. Gagnon, 2002. *Comment gérer la fertilisation et l'irrigation en vue d'améliorer la tolérance au gel des plants produits en récipients?* Ministère des Ressources naturelles, Direction de la recherche forestière. 15 p. (Fichier pdf disponible).

- LAMHAMEDI, M. S., 2009. *Rappel des principes généraux sur la fertilisation des plants forestiers en pépinière forestière*. Dans : Lamhamedi, M.S. et B.-M. Gingras (eds.). Session de formation sur la nutrition minérale des plants forestiers dédiée aux pépinières forestières du Québec. Recueil des conférences [cd-rom], ISBN : 978-2-550-56289-4, 15 avril 2009, ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec, Québec, Canada. 47 p.
- Landis, T.D. et E. van Steenis, 2004. *Macronutrients - nitrogen: Part 2*. Dans : Forest Nursery Notes, Winter 2004. USDA For Serv., 8 p.
- Landis, T.D., R.W. Tinus, S.E. McDonald et J.P. Barnett, 1989. *Seedling nutrition and irrigation. The container tree nursery manual*. Vol. 4., USDA Forest Service, Washington, DC. Agric. Handbook, 674 p.
- Landis, T.D., R.K. Dumroese et D.L. Haase, 2010. *Seedling Processing, Storage, and Outplanting. The container tree nursery manual*. Vol. 7., USDA Forest Service, Washington, DC. Agric. Handbook, 200 p.
- Malik, V., et V.R. Timmer, 1996. *Growth, nutrient dynamics, and interspecific competition of nutrient-loaded black spruce seedlings on a boreal mixedwood site*. Can. J. For. Res. 26: 1651–1659.
- Morrison, I.K., 1974. *Mineral nutrition of conifer with special reference to nutrient status interpretation: a review of literature*. Can. For. Serv. Publ. 1343.
- Rikala, R., J. Heiskanen et M. Lahti, 2004. *Autumn fertilization in the nursery affects growth of Picea abies container seedlings after transplanting*. Scand. J. For. Res. 19: 409–414.
- Salifu, K.F., et V.R. Timmer, 2003. *Optimization nitrogen loading response of Picea mariana seedlings during nursery culture*. Can. J. For. Res. 33: 1287–1294.
- Swan, H.S.D., 1971. *Relationships between nutrient supply, growth and nutrient concentrations in the foliage of white and red spruce*. Pointe Claire, Quebec: Pulp and Paper Research Institute of Canada; Woodlands Paper No. 29. 27 p.
- Thiffault, N. et R. Jobidon, 2006. *How to shift unproductive Kalmia angustifolia-Rhododendron groenlandicum health to productive conifer plantation*. Can. J. For. Res. 36: 2364–2376.
- Timmer, V.R., 1997. *Exponential nutrient loading: a new fertilization technique to improved seedling performance on competitive sites*. New For. 13:279–299.
- Timmer, V.R., et A.D. Munson, 1991. *Site-specific growth and nutrition of planted Picea mariana in the Ontario Clay Belt. IV. Nitrogen loading response*. Can. J. For. Res. 21: 1058–1065.
- 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: 585–594.
- van den Driessche, R., 1988. *Nursery growth of conifer seedlings using fertilizers of different solubilities, and application time, and their forest growth*. Can. J. For. Res. 18 : 172–180.
- van den Driessche, R., 1991. *Effects of nutrients on stock performance in the forest*. Dans Mineral nutrition of conifer seedlings. Édité par R. van den Driessche. CRC Press, Boca Raton, Fla. p. 229–260.
- Veilleux, P., J.Y. Allard, F. Bart, C. Bélanger, M. Boulianne, D. Labrecque, F.N. Perreault et M. Tourigny, 2011. *GUIDE TERRAIN : Inventaire de qualification des plants résineux cultivés en récipients. Document de travail, Livraison 2011*. Direction générale des pépinières et des stations piscicoles (DGPPS). Ministère des Ressources naturelles et de la Faune (MRNF), Québec. 139 p.
- Way, D.A., S.D. Seegobin et R.F. Sage, 2007. *The effect of carbon and nutrient loading during nursery culture on the growth of black spruce seedlings: a six-year field study*. New For. 34: 307–312.

Prédiction et détermination des seuils de tolérance au gel en automne et techniques de protection contre le gel hivernal

Mohammed S. Lamhamedi^{1,2,3}, Linda Veilleux¹, Mario Renaud¹ et Pascal Desjardins¹

¹ Direction de la recherche forestière, ministère des Ressources naturelles et de la Faune, 2700 rue Einstein, Québec (Québec) G1P 3W8

² mohammed.lamhamedi@mrnf.gouv.qc.ca

³ 418 643 7994 poste 6553

La photo et la note biographique complète du 1^{er} auteur sont présentées à la page 87.

L'acquisition de la tolérance au gel varie surtout en fonction de l'espèce, du génotype, de l'âge et des stades de croissance du plant, des régions écologiques (photopériode, température, etc.), des pratiques culturales (irrigation, fertilisation) et des protections hivernales utilisées contre les gels automnal, hivernal et printanier. De plus, l'acquisition de la tolérance au gel ne se fait pas au même rythme entre les parties aériennes et les racines. Par exemple, la tolérance au gel des parties aériennes à des températures plus gélives en automne (-20 °C) se fait à un rythme plus rapide chez les parties aériennes que chez les racines. Ces dernières montrent également des différences en matière de tolérance au gel entre les vieilles et les nouvelles ou les jeunes racines, situées généralement à la périphérie des carottes. Toutefois, dès la mi-novembre, les parties aériennes et les racines des plants forestiers produits au Québec atteignent presque les mêmes seuils de tolérance au gel.

Dans ce document, la tolérance au gel se définit comme étant l'état physiologique du plant qui lui permet de tolérer des températures sous le point de congélation, sans aucun dommage apparent de ses différents organes (bourgeons, aiguilles, rameaux, tige, racines).

En plus des pratiques culturales et à cause des situations géographiques différentes entre les pépinières (photopériode, température, nombre d'heures cumulées de froid), les parties aériennes et les racines des plants produits dans les pépinières situées dans le nord de la province du Québec (par exemple Trécesson, Guyenne) commencent à tolérer tôt et de façon plus rapide les températures plus basses par comparaison aux plants produits dans les pépinières situées au sud. Les variations inter et intra-annuelles des conditions climatiques peuvent engendrer des pertes importantes de plants dans les différentes pépinières forestières du Québec à cause des différents types de gels (gel hâtif en automne, gel tardif au printemps, dessiccation hivernale, etc.) (Figure 1).

Lors des dernières années, les pépiniéristes ont été confrontés à un défi de taille en raison des conditions climatiques extrêmes reliées à l'absence d'une couverture de neige suffisante pour assurer une protection adéquate des plants en hiver. Par exemple en 2007, l'absence d'accumulation de neige jusqu'à

LAMHAMED, M.S., L. VEILLEUX, M. RENAUD et P. DESJARDINS, 2011. *Prédiction et détermination des seuils de tolérance au gel en automne et techniques de protection contre le gel hivernal*. Dans : Colas, F.; Lamhamedi, M.S. (éds.), 2011. Production de plants forestiers au Québec : la culture de l'innovation. Colloque de transfert de connaissances et de savoir-faire. Carrefour Forêt Innovations, 4-6 octobre 2011, Québec (Canada), 140 p. pp : 53 – 64.



Figure 1. Exemples de dégâts causés par les différents types de gels.
a- Gel d'automne sur des plants d'épinette rouge et b- de pin gris. c- Gel printanier. d- Dessiccation hivernale.

la mi-février a accentué les dégâts occasionnés par la dessiccation hivernale chez 339 lots de plants produits dans 22 pépinières forestières. Le gel racinaire a été également observé chez 126 lots de plants issus de 18 pépinières. Durant cette même année, le gel hivernal a été observé chez 245 lots de 21 pépinières réparties dans toutes les régions administratives du Québec.

L'absence d'une couverture de neige suffisante accentue les pertes de plants forestiers attribuées à la dessiccation hivernale (Figure 1d) dont les dommages sont plus sévères lorsque le substrat est gelé et les plants ne sont pas complètement couverts par la neige. Au début du printemps et avant la fonte nivale complète, les racines gelées n'arrivent pas à absorber et à transporter suffisamment d'eau pour satisfaire à la demande évaporative même à des températures au niveau des racines comprises entre 0 et 5 °C, surtout lorsque les plants sont exposés au vent, au soleil et à des températures relativement élevées. Ce qui explique que la dessiccation hivernale n'est pas fortement reliée à l'état de dormance ou d'endurcissement des plants.

Les objectifs assignés à ce travail consistent à i) Mettre à la disposition des pépiniéristes des seuils de tolérance au gel des parties aériennes et des racines des plants d'épinette noire (1+0) et d'épinette blanche (1+0) en automne et les modalités de leur prédiction à une échelle opérationnelle; ii) Évaluer certaines techniques opérationnelles de protection des plants en pépinière forestière contre le gel hivernal; iii) Évaluer les possibilités d'un désendurcissement rapide des plants en hiver et au début du printemps en présence de températures clémentes; et iv) Fournir des recommandations spécifiques à la protection des plants contre les gels automnal et hivernal en pépinière forestière.

Détermination des seuils de tolérance au gel en automne

Pour mettre à la disposition des pépiniéristes du Québec un outil de prévision de l'évolution graduelle de la tolérance au gel des plants d'épinette blanche et d'épinette noire surtout en automne, des seuils de tolérance au gel quotidien ont été déterminés dans plusieurs pépinières forestières situées dans des régions écologiques différentes. Ces seuils sont calculés de façon à ce qu'aucun constituant (aiguilles, racines, tige, bourgeon, etc.) du plant d'épinette blanche et d'épinette noire (1+0) ne soit endommagé (Tableaux 1 et 2, à la fin du texte, pp : 59-64).

Pour déterminer ou prédire les seuils de tolérance au gel en automne des parties aériennes et des racines,

le pépiniériste pourra utiliser des variables facilement mesurables, notamment le cumul du nombre d'heures d'exposition au froid ou le ratio de matière sèche/matière fraîche des parties aériennes (RMS). Les variations du RMS sont fortement corrélées positivement au cumul du nombre d'heures d'exposition au froid. Ainsi, les seuils indiqués dans les tableaux (1 et 2) sous-estiment les seuils réels de tolérance au gel des parties aériennes et des racines.

Les seuils propres aux racines et aux parties aériennes sont déjà ajustés pour une saison de croissance selon les différentes régions écologiques du Québec. Ces seuils pourraient être utilisés par les pépiniéristes d'une région écologique donnée, ce qui les aiderait à suivre l'évolution des taux graduels de tolérance au gel hâtif des plants durant l'automne. La détermination indirecte de ces seuils, selon l'évolution du RMS ou le cumul du nombre d'heures d'exposition au froid à une échelle quotidienne, jumelée avec celle des prévisions des températures minimales dans la pépinière, permettra d'optimiser les interventions du pépiniériste, notamment l'irrigation contre le gel. Ceci nécessitera un suivi et un calibrage à long terme de ces seuils pour tenir compte des variations interannuelles des conditions environnementales. Ainsi, l'utilisation de ces seuils comme outil de prévision de l'évolution graduelle de la tolérance au gel des plants d'épinette blanche permettra de diminuer l'ampleur des pertes de plants occasionnées par le gel, et de mieux rationaliser le coût de production des plants en pépinières forestières.

Conditions climatiques extrêmes et techniques opérationnelles de protection des plants en pépinière forestière contre le gel hivernal

L'absence de couverture de neige jusqu'à la mi-février, dans certaines pépinières forestières, contribue à l'augmentation de pertes de plants dues au gel hivernal. En effet, dans le cadre du programme de surveillance des pépinières forestières en 2007, le gel hivernal a été observé dans 245 lots de plants produits dans 21 pépinières. La gelure hivernale, à elle seule, a engendré le rejet de plus de 7 millions de plants. Sachant que les changements climatiques modifient le cycle d'occurrence d'événements climatiques extrêmes, on peut s'attendre à perdre davantage de plants en cours de production, avec ses conséquences sur les coûts de production.

Ainsi, pour quantifier la résistance au gel des plants en hiver, en simulant des conditions climatiques extrêmes (absence de couverture de neige), et tester l'utilisation de techniques d'atténuation et de protection hivernale (toiles géotextiles et neige artificielle), un dispositif expérimental a été installé à une échelle

opérationnelle à la pépinière forestière de Grandes-Piles. Quatre traitements ont été évalués et répartis de façon aléatoire dans quatre blocs aléatoires complets (Figure 2). Ces traitements (T) consistaient à :

- T1 : absence de couverture de neige jusqu'à la mi-février, sans toile [épinette noire 1+0 (67-50), épinette blanche 1+0 et 2+0 (25-310) et pin gris 1+0 (45-110)];
- T2 : absence de couverture de neige jusqu'à la mi-février, avec toile installée en automne [épinette noire 1+0 (67-50), épinette blanche 1+0 (25-310) et pin gris 1+0 (45-110)];

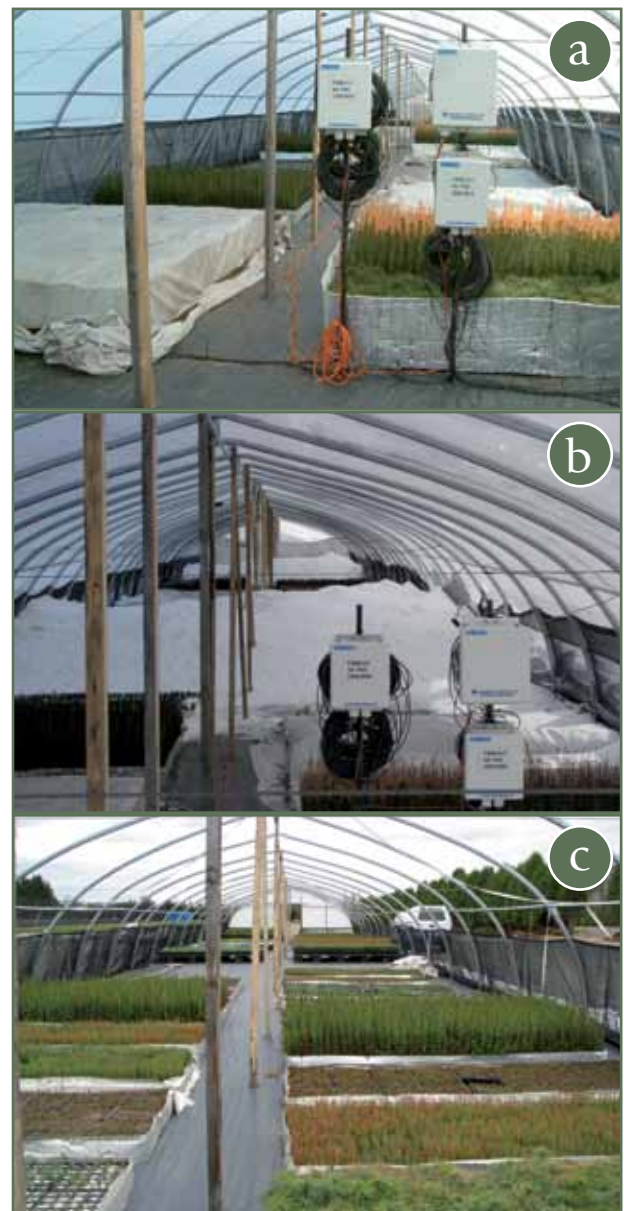


Figure 2. Vue générale du dispositif expérimental en quatre blocs aléatoires complets a- en automne à la pépinière de Grandes-Piles. b- après application de la neige artificielle. c- après la fonte nivale au printemps.

- T3 : neige artificielle appliquée dès le début décembre de façon à couvrir les apex des plants de 5 à 10 cm [épinette noire 1+0 (67-50), épinette blanche 1+0 et 2+0 (25-310) et pin gris 1+0 (45-110)];
- T4 : climat de l'année.

Nos résultats ont démontré que :

- Les moyennes des températures minimales dans les cavités (substrat et racines), en absence de neige jusqu'à la mi-février (T1), variaient entre -10 °C et -20 °C alors que celles des traitements (T3 et T4) en présence de la neige variaient entre 0 °C et -10 °C.
- L'absence de neige au début de l'hiver augmente à elle seule le pourcentage de mortalité des plants, selon les essences, de 5 à 23 % (Figure 3).
- L'épinette noire (1+0) réagit mieux que les autres essences (1+0) à l'utilisation d'une toile protectrice. Celle-ci lui confère une résistance accrue au gel hivernal.

Existe-t-il un désendurcissement rapide et réel des plants en hiver et au début du printemps en présence de températures clémentes ?

Un deuxième dispositif expérimental a également été installé pour vérifier si l'exposition des plants (épinette noire 1+0 et épinette blanche 2+0) à de courtes périodes de températures clémentes en hiver (mi-janvier) et au début du printemps (mi-mars) peut engendrer un désendurcissement rapide, et ainsi, influencer négativement la qualité morpho-physiologique des plants.

Les traitements évalués consistaient à :

- T1 : plants conservés à 4 °C;
- T2 : plants placés 1 jour en serre à 10 °C;
- T3 : plants placés 3 jours en serre à 10 °C.

Les plants sont ensuite soumis à différentes températures à l'aide d'un congélateur programmable : 4 °C, -4 °C, -12 °C et -20 °C.

Cette expérience a démontré que la durée d'exposition des plants à des températures clémentes, aussi bien en hiver qu'au printemps, n'a eu aucun effet significatif sur les variables de croissance. Cependant, les températures au début du printemps (< -12 °C) ont nui à la croissance des nouvelles racines et des parties aériennes (Figure 4).

Principales conclusions et recommandations opérationnelles

- Des seuils de tolérance au gel quotidien en automne, aussi bien pour les parties aériennes que pour les racines des plants d'épinette noire (1+0) et d'épinette blanche (1+0), ont été déterminés et cali-

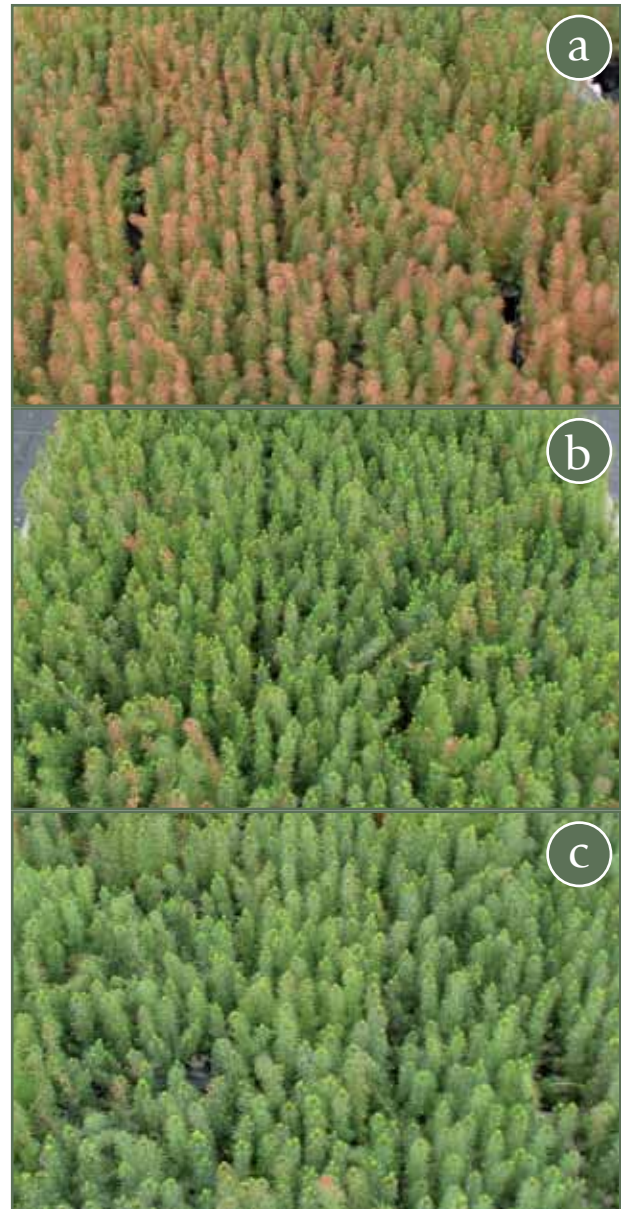


Figure 3. État des plants d'épinette noire au début du printemps. a- Sans neige sans toile (T1); b- Sans neige avec toile (T2); et c- Neige artificielle (T3).

brés pour chaque pépinière forestière de façon à ce qu'aucun constituant du plant ne soit endommagé. Ces seuils permettront aux pépiniéristes de mieux cibler les périodes de risque de gel et leur faciliteront la prédiction du degré de résistance des racines et des parties aériennes en utilisant uniquement le ratio MS/MF des parties aériennes (Tableaux 1 et 2).

- Les seuils de tolérance au gel (Tableaux 1 et 2) permettent aux pépiniéristes d'optimiser les fréquences d'irrigation pour protéger les plants contre le gel surtout en automne.
- Pour améliorer l'endurcissement des plants, le pépiniériste pourra optimiser la régie d'irrigation, selon les stades de croissance (Figure 5), afin de favoriser l'aoûtement et la formation rapide des cires épici-

ticulaires. Cependant, le maintien de zones sèches dans la carotte, pendant les périodes très chaudes en été, contribue à l'augmentation de la mortalité des racines. Ces plants seront plus sensibles à la dessiccation hivernale. Ainsi, les pépiniéristes observant, par exemple, l'absence de colonisation de la carotte par les racines ou la présence de racines mortes, auront ainsi tendance à attribuer ces manifestations à l'excès d'irrigation et au gel racinaire plutôt qu'à un manque d'irrigation en période de sécheresse.

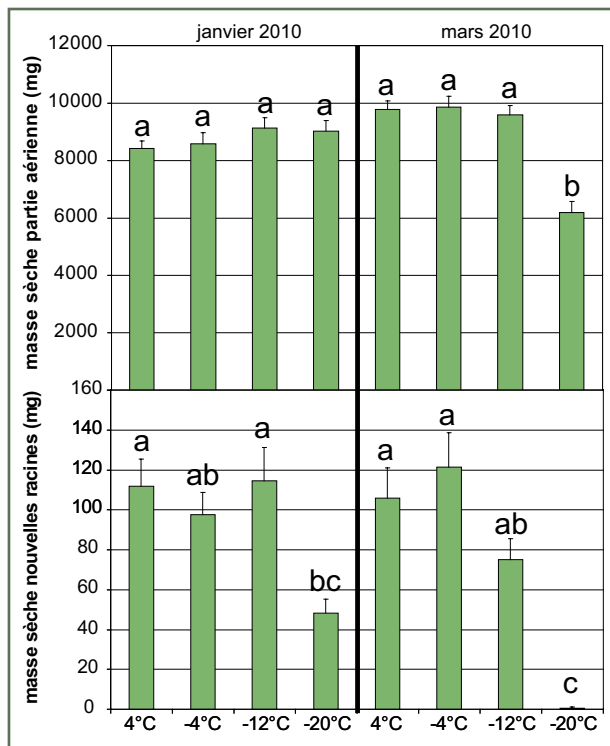


Figure 4. Évaluation des masses sèches des parties aériennes et des nouvelles racines suite au test de congélation en hiver et au printemps.

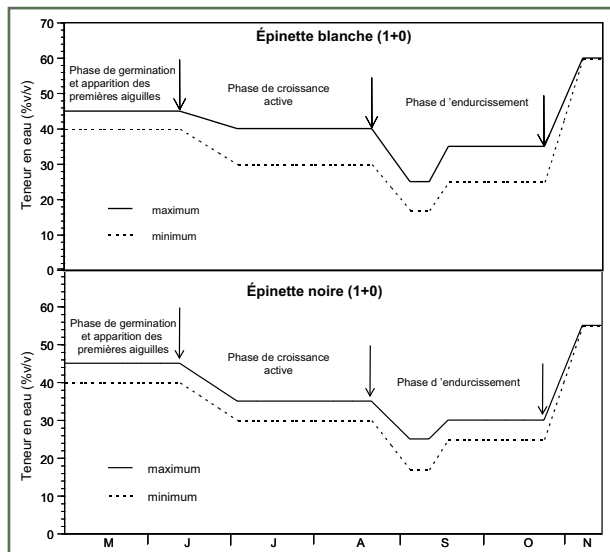


Figure 5. Seuils de régies d'irrigation spécifiques à la production des plants d'épinette blanche et d'épinette noire (1+0) sous tunnels, en fonction des stades de croissance, tout en permettant d'optimiser la croissance, l'endurcissement, la quantité d'eau d'irrigation et la diminution du lessivage des éléments minéraux (Lamhamedi *et al.* 2001, 2003).

cation hivernale. Ainsi, les pépiniéristes observant, par exemple, l'absence de colonisation de la carotte par les racines ou la présence de racines mortes, auront ainsi tendance à attribuer ces manifestations à l'excès d'irrigation et au gel racinaire plutôt qu'à un manque d'irrigation en période de sécheresse.

- L'endurcissement des plants pourra être également amélioré en utilisant du nitrate de calcium comme fertilisant dès la fin de la saison de croissance. Le calcium améliore l'endurcissement et les nitrates favorisent la croissance des racines.
- Les techniques usuelles de protection des plants contre les différents types de gels doivent être planifiées et utilisées au moment opportun (brise vent biologique ou mécanique, remblai de terre ou récipients, mise au sol des récipients, irrigation, etc.).
- L'efficacité des techniques de protection hivernale (toile, canon à neige ou perche, etc.) que nous avons démontrée dans nos travaux réalisés en conditions opérationnelles constituent des solutions tangibles et à la portée des pépiniéristes pour protéger efficacement les plants contre les extrêmes climatiques et atténuer les effets des changements climatiques dans les pépinières forestières du Québec.
- L'utilisation d'un canon à neige (Figure 6) ou de toiles de protection, selon l'âge et l'essence, protège efficacement les plants forestiers contre le gel hivernal et les variations extrêmes de températures, en hiver et au début du printemps. Si, à la mi-décembre, l'accumulation de neige est insuffisante, le pépiniériste pourra alors appliquer de la neige artificielle à l'aide d'un canon, afin de protéger ses plants contre le gel. La présence d'une couche de neige, couvrant les apex des plants de 5 à 10 cm, est un excellent isolant qui protège les plants contre les fluctuations extrêmes de températures minimales.
- Ces techniques de protection hivernale pourraient diminuer les pertes de plants occasionnées par le gel hivernal de 5 à 23 %. Ceci permettra d'améliorer la rentabilité des pépinières forestières.



Figure 6. Fabrication et application de neige artificielle à l'aide d'un canon à neige pour protéger les plants contre le gel hivernal en pépinière forestière.

- L'exposition des plants à des températures clémentes en hiver et au début du printemps n'augmente pas de façon significative la perte de plants.

Références

- BIGRAS F.J., et D. DUMAIS, 2005. *Root-freezing damage in the containerized nursery: impact on plantation site - A review*. New For 30:167-184.
- BIGRAS, F.J. et S.J. COLOMBO, (eds), 2001. *Conifer Cold Hardiness*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Pays-Bas, p. 57-88.
- CARLES, S., M.S. LAMHAMEDI, D.C. STOWE, H.A. MARGOLIS, P.Y. BERNIER, L. VEILLEUX et B. FECTEAU, 2008. *Frost tolerance of two-year-old Picea glauca seedlings grown under different irrigation regimes in a forest nursery*. Scand. J. For. Res. 23:137-147.
- CORBEIL, A., D. GÉLINAS, B.M. GINGRAS, L. LAVERGNE ET M. RIOUX, 2009. *Recherche de nouvelles méthodes de protection hivernale pour la production de plants en récipient*. Rapport d'étape et recommandations du comité technique. Direction générale des pépinières et des stations piscicoles, ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec.
- GROSSNICKLE, S.C., 2000. *Ecophysiology of northern spruce species: the performance of planted seedlings*. NRC Research Press, Ottawa, Ontario, Canada.
- LAMHAMEDI, M.S., 2011. *Détermination des seuils de tolérance au gel des plants produits dans les pépinières forestières du Québec : intégration dans la prise de décision et l'optimisation des mesures de protection*. Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Direction de la recherche forestière. Avis de recherche forestière n° 27. 2 p. <http://www.mrnf.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Lamhamed-Mohammed/Avis27.pdf>
- LAMHAMEDI, M.S., 2011. *Variabilité spatiale et variations extrêmes des teneurs en eau du substrat en pépinière forestière : facteurs aggravant de l'insuffisance racinaire*. Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Direction de la recherche forestière. Avis de recherche forestière n° 28. 2 p. <http://www.mrnf.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Lamhamed-Mohammed/Avis28.pdf>
- LAMHAMEDI, M. S., M. RENAUD, P. DESJARDINS et L. VEILLEUX, 2011. *Production de plants forestiers et changements climatiques : cas des extrêmes climatiques hivernaux*. Stand présenté au Carrefour Forêt Innovations: Inspiration, Motivation et Réussite. 4 au 6 octobre 2011, Centre des Congrès, Québec, Canada.
- LAMHAMEDI, M.S., L. VEILLEUX et M. RENAUD, 2005. *Élaboration des seuils de tolérance au gel des plants d'épinette blanche (1+0) en pépinière forestière selon les régions écologiques du Québec*. Ministère des Ressources naturelles, Direction de la recherche forestière, Sainte-Foy, Québec. Mémoire de recherche forestière n° 147, 52 p. <http://www.mrn.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Lamhamed-Mohammed/Memoire147.pdf>
- LAMHAMEDI, M.S., 2008. *Détermination des seuils de tolérance au gel des plants en hiver en relation avec les extrêmes climatiques et élaboration d'un système informatique de prédiction de l'évolution de l'état d'endurcissement des plants en pépinière forestière*. <http://www.mrn.gouv.qc.ca/publications/enligne/forets/activites-recherche/projets/description.asp?numero=371>
- LAMHAMEDI, M.S., H.A. MARGOLIS, M. RENAUD, L. VEILLEUX et I. AUGER, 2003. *Effets de différentes régies d'irrigation sur la croissance, la nutrition minérale et le lessivage des éléments nutritifs des semis d'épinette noire (1 + 0) produits en récipients à parois ajourées en pépinière forestière*. Can. J. For. Res. 33 : 279-291.
- 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 : 2200-2212.
- LANDIS, T.D. (ed.), 2010. *Seedling Processing, Storage, and Outplanting, The Container Tree Nursery Manual - Vol. 7*. U.S. Department of Agriculture, Forest service, Agric. Handbk. 674.
- LINDSTRÖM, A. et A. MATSSON, 1994. *Cultivation of containerized seedlings in Sweden-systems for forest protection and methods to detect root injuries*. Acta Hort. 361: 429-440.
- STOWE, D.C., M.S. LAMHAMEDI ET H.A. MARGOLIS, 2001. *Water relations, cuticular transpiration, and bud characteristics of air-slit containerized Picea glauca seedlings in response to controlled irrigation regimes*. Can. J. For. Res. 31 : 2200-2212.
- SNYDER, R.L. et J.P. MELO-ABREU, 2005. *Frost protection : fundamentals, practice and economics*. Volume 1 and 2. Food Agriculture Organisation of the United Nations, Rome.

Tableau 1. Seuils de tolérance au gel journaliers* des plants d'épinette blanche (1+0) dans chacune des 6 pépinières forestières

date		Pampev				Sainte-Luce				Trécesson			
		heures cumulées de froid ¹	ratio MS/MF calculé ²	tolérance au gel (°C) Tiges ³	Racines ⁴	heures cumulées de froid	ratio MS/MF calculé	tolérance au gel (°C) tiges	racines	heures cumulées de froid	ratio MS/MF calculé	tolérance au gel (°C) tiges	racines
13	sept-99	0	25.57	-4.00	-4.00	0	26.33	-4.00	-4.00	0	26.68	-4.00	-4.00
14	sept-99	0	25.83	-4.29	-4.00	0	26.52	-4.00	-4.29	0	26.91	-4.29	-4.29
15	sept-99	0	26.09	-4.57	-4.00	0	26.71	-4.57	-4.57	0	27.14	-4.57	-4.57
16	sept-99	0	26.35	-4.86	-4.00	0	26.90	-4.00	-4.86	0	27.37	-4.86	-4.86
17	sept-99	0	26.61	-5.14	-4.00	0	27.09	-5.14	-5.14	0	27.60	-5.14	-5.14
18	sept-99	0	26.87	-5.43	-4.00	0	27.28	-5.43	-5.43	3	27.83	-5.43	-5.43
19	sept-99	7	27.13	-5.71	-4.00	0	27.47	-5.71	-5.71	3	28.06	-5.71	-5.71
20	sept-99	7	27.39	-6.00	-4.00	0	27.66	-6.00	-6.00	4	28.29	-6.00	-6.00
21	sept-99	7	27.65	-6.29	-4.00	0	27.85	-6.29	-6.29	11	28.52	-6.29	-6.29
22	sept-99	7	27.91	-6.57	-4.00	0	28.04	-6.57	-6.57	18	28.75	-6.57	-6.57
23	sept-99	7	28.17	-6.86	-4.00	0	28.23	-6.86	-6.86	18	28.98	-6.86	-6.86
24	sept-99	7	28.43	-7.14	-4.00	0	28.42	-7.14	-7.14	20	29.21	-7.14	-7.14
25	sept-99	7	28.69	-7.43	-4.00	0	28.61	-7.43	-7.43	20	29.44	-7.43	-7.43
26	sept-99	13	28.95	-7.71	-4.00	0	28.80	-7.71	-7.71	25	29.67	-7.71	-7.71
27	sept-99	17	29.21	-8.00	-4.00	0	28.99	-8.00	-8.00	25	29.90	-8.00	-8.00
28	sept-99	17	29.47	-8.00	-4.27	0	29.18	-8.00	-8.00	25	30.13	-8.00	-8.00
29	sept-99	17	29.73	-8.00	-4.53	0	29.37	-8.00	-8.00	25	30.36	-9.60	-8.00
30	sept-99	17	29.99	-8.00	-4.80	0	29.56	-8.00	-8.00	29	30.59	-10.40	-8.00
1	oct-99	17	30.25	-8.00	-5.06	0	29.75	-8.00	-8.00	40	30.82	-11.20	-8.00
2	oct-99	24	30.51	-8.00	-5.33	0	29.94	-8.00	-8.00	52	31.05	-12.00	-8.00
3	oct-99	24	30.77	-8.00	-5.60	3	30.13	-8.00	-8.00	66	31.28	-12.80	-8.00
4	oct-99	29	31.03	-8.00	-5.86	14	30.32	-8.00	-8.00	79	31.51	-13.60	-8.00
5	oct-99	42	31.29	-8.00	-6.13	27	30.51	-8.00	-8.00	88	31.74	-14.40	-8.00
6	oct-99	58	31.55	-8.00	-6.40	42	30.70	-8.00	-8.00	103	31.97	-15.20	-8.00
7	oct-99	73	31.81	-8.00	-6.67	56	30.89	-8.00	-8.00	119	32.20	-16.00	-8.00
8	oct-99	83	32.07	-8.00	-6.93	71	31.08	-8.00	-8.00	129	32.43	-16.80	-8.00
9	oct-99	86	32.33	-8.00	-7.20	80	31.27	-8.00	-8.00	135	32.66	-17.60	-8.00
10	oct-99	95	32.59	-8.00	-7.47	89	31.46	-8.00	-8.00	142	32.89	-18.40	-8.00
11	oct-99	100	32.85	-8.00	-7.73	95	31.65	-8.00	-8.00	155	33.12	-19.20	-8.00
12	oct-99	115	33.11	-8.00	-8.00	110	31.84	-8.00	-8.00	165	33.35	-20.00	-8.00
13	oct-99	119	33.37	-8.92	-8.31	120	32.03	-8.92	-8.31	171	33.58	-20.00	-8.31
14	oct-99	125	33.63	-9.85	-8.62	130	32.22	-9.85	-8.62	185	33.81	-20.00	-8.62
15	oct-99	135	33.89	-10.77	-8.92	146	32.41	-10.77	-8.92	197	34.04	-20.00	-8.92
16	oct-99	140	34.15	-11.69	-9.23	155	32.60	-11.69	-9.23	199	34.27	-20.00	-9.23
17	oct-99	140	34.41	-12.62	-9.54	157	32.79	-12.62	-9.54	218	34.50	-20.00	-9.54
18	oct-99	146	34.67	-13.54	-9.85	174	32.98	-13.54	-9.85	239	34.73	-20.00	-9.85
19	oct-99	163	34.93	-14.46	-10.15	192	33.17	-14.46	-10.15	256	34.96	-20.00	-10.15
20	oct-99	174	35.19	-15.38	-10.46	208	33.36	-15.38	-10.46	275	35.19	-20.00	-10.46
21	oct-99	185	35.45	-16.31	-10.77	221	33.55	-16.31	-10.77	293	35.42	-20.00	-10.77
22	oct-99	194	35.71	-17.23	-11.08	231	33.74	-17.23	-11.08	308	35.65	-20.00	-11.08
23	oct-99	200	35.97	-18.15	-11.38	238	33.93	-18.15	-11.38	324	35.88	-20.00	-11.38
24	oct-99	214	36.23	-19.08	-11.69	252	34.12	-19.08	-11.69	348	36.11	-20.00	-11.69
25	oct-99	231	36.49	-20.00	-12.00	269	34.31	-20.00	-12.00	370	36.34	-20.00	-12.00
26	oct-99	246	36.75	-20.00	-12.57	293	34.50	-20.00	-12.57	394	36.57	-20.00	-12.57
27	oct-99	262	37.01	-20.00	-13.14	317	34.69	-20.00	-13.14	413	36.80	-20.00	-13.14
28	oct-99	277	37.27	-20.00	-13.71	341	34.88	-20.00	-13.71	434	37.03	-20.00	-13.71
29	oct-99	293	37.53	-20.00	-14.28	361	35.07	-20.00	-14.28	451	37.26	-20.00	-14.28
30	oct-99	303	37.79	-20.00	-14.86	385	35.26	-20.00	-14.86	459	37.49	-20.00	-14.86

date	Pampev				Sainte-Luce				Trécesson			
	heures cumulées de froid ¹	ratio MS/MF calculé ²	tolérance au gel (°C) Tiges ³	Racines ⁴	heures cumulées de froid	ratio MS/MF calculé	tolérance au gel (°C) tiges	racines	heures cumulées de froid	ratio MS/MF calculé	tolérance au gel (°C) tiges	racines
31 oct-99	312	38.05	-20.00	-15.43	389	35.45	-20.00	-15.43	467	37.72	-20.00	-15.43
1 nov-99	326	38.31	-20.00	-16.00	404	35.64	-20.00	-16.00	476	37.95	-20.00	-16.00
2 nov-99	335	38.57	-20.00	-16.57	410	35.83	-20.00	-16.57	489	38.18	-20.00	-16.57
3 nov-99	338	38.83	-20.00	-17.14	410	36.02	-20.00	-17.14	513	38.41	-20.00	-17.14
4 nov-99	361	39.09	-20.00	-17.72	426	36.21	-20.00	-17.72	537	38.64	-20.00	-17.72
5 nov-99	373	39.35	-20.00	-18.29	437	36.40	-20.00	-18.29	561	38.87	-20.00	-18.29
6 nov-99	384	39.61	-20.00	-18.86	453	36.59	-20.00	-18.86	585	39.10	-20.00	-18.86
7 nov-99	408	39.87	-20.00	-19.43	474	36.78	-20.00	-19.43	609	39.33	-20.00	-19.43
8 nov-99	408	40.13	-20.00	-20.00	492	36.97	-20.00	-20.00	621	39.56	-20.00	-20.00

date	CPPFQ				Normandin				Sarguin			
	heures cumulées de froid	ratio MS/MF calculé	tolérance au gel (°C) Tiges	Racines	heures cumulées de froid	ratio MS/MF calculé	tolérance au gel (°C) tiges	racines	heures cumulées de froid	ratio MS/MF calculé	tolérance au gel (°C) tiges	racines
11 sept-00	13	26.69	-4.00	-4.00	26	28.26	-4.00	-4.00	4	28.34	-4.00	-4.00
12 sept-00	13	27.00	-4.00	-4.00	26	28.49	-4.00	-4.00	4	28.52	-4.00	-4.00
13 sept-00	13	27.31	-4.00	-4.00	26	28.72	-4.00	-4.00	4	28.70	-4.00	-4.00
14 sept-00	13	27.62	-4.00	-4.00	26	28.95	-4.00	-4.00	4	28.88	-4.00	-4.00
15 sept-00	13	27.93	-4.00	-4.00	26	29.18	-4.00	-4.00	4	29.06	-4.00	-4.00
16 sept-00	13	28.24	-4.00	-4.00	26	29.41	-4.00	-4.00	4	29.24	-4.00	-4.00
17 sept-00	13	28.55	-4.00	-4.00	26	29.64	-4.00	-4.00	4	29.42	-4.00	-4.00
18 sept-00	13	28.86	-4.00	-4.00	27	29.87	-4.00	-4.00	4	29.60	-4.00	-4.00
19 sept-00	13	29.17	-4.00	-4.00	27	30.10	-4.00	-4.00	4	29.78	-4.00	-4.00
20 sept-00	13	29.48	-4.00	-4.00	27	30.33	-4.00	-4.00	4	29.96	-4.00	-4.00
21 sept-00	13	29.79	-4.00	-4.00	27	30.56	-4.00	-4.00	4	30.14	-4.00	-4.00
22 sept-00	13	30.10	-4.00	-4.00	28	30.79	-4.00	-4.00	4	30.32	-4.00	-4.00
23 sept-00	13	30.41	-4.00	-4.00	37	31.02	-4.00	-4.00	11	30.50	-4.00	-4.00
24 sept-00	13	30.72	-4.00	-4.00	37	31.25	-4.00	-4.00	11	30.68	-4.00	-4.00
25 sept-00	23	31.03	-4.00	-4.00	46	31.48	-4.00	-4.00	21	30.86	-4.00	-4.00
26 sept-00	33	31.34	-4.53	-4.00	55	31.71	-4.53	-4.00	29	31.04	-4.53	-4.00
27 sept-00	40	31.65	-5.07	-4.00	60	31.94	-5.07	-4.00	36	31.22	-5.07	-4.00
28 sept-00	54	31.96	-5.60	-4.00	74	32.17	-5.60	-4.00	45	31.40	-5.60	-4.00
29 sept-00	64	32.27	-6.14	-4.00	86	32.40	-6.14	-4.00	54	31.58	-6.14	-4.00
30 sept-00	71	32.58	-6.67	-4.00	86	32.63	-6.67	-4.00	54	31.76	-6.67	-4.00
1 oct-00	71	32.89	-7.20	-4.00	86	32.86	-7.20	-4.00	54	31.94	-7.20	-4.00
2 oct-00	71	33.20	-7.74	-4.00	86	33.09	-7.74	-4.00	54	32.12	-7.74	-4.00
3 oct-00	71	33.51	-8.27	-4.00	88	33.32	-8.27	-4.00	54	32.30	-8.27	-4.00
4 oct-00	73	33.82	-8.80	-4.00	99	33.55	-8.80	-4.00	58	32.48	-8.80	-4.00
5 oct-00	80	34.13	-9.34	-4.00	113	33.78	-9.34	-4.00	66	32.66	-9.34	-4.00
6 oct-00	89	34.44	-9.87	-4.00	135	34.01	-9.87	-4.00	77	32.84	-9.87	-4.00
7 oct-00	104	34.75	-10.41	-4.00	159	34.24	-10.41	-4.00	86	33.02	-10.41	-4.00
8 oct-00	118	35.06	-10.94	-4.00	176	34.47	-10.94	-4.00	95	33.20	-10.94	-4.00
9 oct-00	134	35.37	-11.48	-4.00	192	34.70	-11.48	-4.00	102	33.38	-11.48	-4.00
10 oct-00	154	35.68	-12.00	-4.00	216	34.93	-12.00	-4.00	115	33.56	-12.00	-4.00
11 oct-00	169	35.99	-12.62	-4.62	232	35.16	-12.62	-4.62	128	33.74	-12.62	-4.62
12 oct-00	178	36.30	-13.23	-5.23	243	35.39	-13.23	-5.23	138	33.92	-13.23	-5.23
13 oct-00	178	36.61	-13.85	-5.85	254	35.62	-13.85	-5.85	143	34.10	-13.85	-5.85
14 oct-00	178	36.92	-14.47	-6.47	265	35.85	-14.47	-6.47	154	34.28	-14.47	-6.47
15 oct-00	189	37.23	-15.08	-7.08	282	36.08	-15.08	-7.08	164	34.46	-15.08	-7.08
16 oct-00	206	37.54	-15.70	-7.70	299	36.31	-15.70	-7.70	181	34.64	-15.70	-7.70

date	CPPFQ				Normandin				Sargim			
	heures cumulées de froid	ratio MS/MF calculé	tolérance au gel (°C)		heures cumulées de froid	ratio MS/MF calculé	tolérance au gel (°C)		heures cumulées de froid	ratio MS/MF calculé	tolérance au gel (°C)	
			Tiges	Racines			tiges	racines			tiges	racines
17 oct-00	223	37,85	-16.31	-8.31	317	36,54	-16.31	-8.31	201	34,82	-16.31	-8.31
18 oct-00	231	38,16	-16.93	-8.93	341	36,77	-16.93	-8.93	212	35,00	-16.93	-8.93
19 oct-00	237	38,47	-17.55	-9.55	356	37,00	-17.55	-9.55	212	35,18	-17.55	-9.55
20 oct-00	246	38,78	-18.16	-10.16	366	37,23	-18.16	-10.16	219	35,36	-18.16	-10.16
21 oct-00	251	39,09	-18.78	-10.78	373	37,46	-18.78	-10.78	231	35,54	-18.78	-10.78
22 oct-00	269	39,40	-19.39	-11.39	391	37,69	-19.39	-11.39	248	35,72	-19.39	-11.39
23 oct-00	285	39,71	-20.00	-12.00	406	37,92	-20.00	-12.00	266	35,90	-20.00	-12.00
24 oct-00	294	40,02	-20.00	-12.57	413	38,15	-20.00	-12.57	280	36,08	-20.00	-12.57
25 oct-00	307	40,33	-20.00	-13.14	429	38,38	-20.00	-13.14	296	36,26	-20.00	-13.14
26 oct-00	310	40,64	-20.00	-13.71	433	38,61	-20.00	-13.71	305	36,44	-20.00	-13.71
27 oct-00	310	40,95	-20.00	-14.28	437	38,84	-20.00	-14.28	309	36,62	-20.00	-14.28
28 oct-00	329	41,26	-20.00	-14.85	461	39,07	-20.00	-14.85	314	36,80	-20.00	-14.85
29 oct-00	353	41,57	-20.00	-15.42	480	39,30	-20.00	-15.42	338	36,98	-20.00	-15.42
30 oct-00	377	41,88	-20.00	-15.99	497	39,53	-20.00	-15.99	354	37,16	-20.00	-15.99
31 oct-00	396	42,19	-20.00	-16.56	515	39,76	-20.00	-16.56	369	37,34	-20.00	-16.56
1 nov-00	416	42,50	-20.00	-17.13	533	39,99	-20.00	-17.13	379	37,52	-20.00	-17.13
2 nov-00	435	42,81	-20.00	-17.70	550	40,22	-20.00	-17.70	388	37,70	-20.00	-17.70
3 nov-00	451	43,12	-20.00	-18.27	568	40,45	-20.00	-18.27	403	37,88	-20.00	-18.27
4 nov-00	467	43,43	-20.00	-18.84	591	40,68	-20.00	-18.84	416	38,06	-20.00	-18.84
5 nov-00	483	43,74	-20.00	-19.41	615	40,91	-20.00	-19.41	432	38,24	-20.00	-19.41
6 nov-00	*	44,05	-20.00	-20.00	*	41,14	-20.00	-20.00	*	38,42	-20.00	-20.00

* Le pépiniériste pourra déterminer à l'avance les seuils de tolérance au gel graduels des plants d'épinette blanche (1+0) estimés à partir du ratio de matière sèche de la partie aérienne des plants d'épinette blanche (1+0) ou du nombre d'heures cumulées de froid.

¹ Le nombre d'heures cumulées de froid (n) au ras des plants d'épinette blanche (1+0) est calculé à partir des données météorologiques enregistrées dans chacune des pépinières à un intervalle régulier de 15 minutes, comme suit :

$$n = \sum_j \sum_{i=1}^{i=24} (Tr - Th), \text{ avec } (Tr - Th) > 0$$

Tr : température de référence (= 5 °C)

Th : température horaire enregistrée (°C)

i : heure de la journée (1 jour = 24 heures)

j : jour julien dont la période d'évaluation s'est étalée de la mi-septembre jusqu'au début novembre.

² Le ratio de la matière sèche journalier de la partie aérienne entière des plants d'épinette blanche (RMS) spécifique à chaque pépinière et à chaque provenance (ou lot de semences) est calculé à partir de la relation linéaire simple reliant le RMS au nombre d'heures cumulées de froid. Le RMS des parties aériennes pourra être utilisé pour prédire les seuils de tolérance au gel aussi bien des parties aériennes que des racines.

^{3,4} Les seuils de tolérance au gel journaliers des parties aériennes et des racines des plants d'épinette blanche (1+0) sont calculés à partir des pentes des chartes d'endurcissement entre deux dates d'échantillonnage consécutives. Ces seuils sont déterminés de telle façon qu'aucun constituant du plant ne soit endommagé.

Tableau 2. Seuils de tolérance au gel journaliers* des plants d'épinette noire (1+0) dans chacune des 6 pépinières forestières

date	Béchedor				Pampev				Trécesson			
	heures cumulées de froid ¹	ratio MS/MF calculé ²	tolérance au gel (°C) Tiges ³	Racines ⁴	heures cumulées de froid	ratio MS/MF calculé	tolérance au gel (°C) tiges	racines	heures cumulées de froid	ratio MS/MF calculé	tolérance au gel (°C) tiges	racines
8 sept-03	0	21.03	-4,0	-4,0	0	20.03	-4,0	-4,0	0	21.00	-4,0	-4,0
9 sept-03	5	21.18	-4,0	-4,1	2	20.37	-4,0	-4,0	2	21.02	-4,0	-4,1
10 sept-03	10	21.34	-4,0	-4,3	7	20.71	-4,0	-4,0	7	21.05	-4,0	-4,3
11 sept-03	10	21.49	-4,0	-4,4	7	21.05	-4,0	-4,0	7	21.07	-4,0	-4,4
12 sept-03	10	21.64	-4,0	-4,6	7	21.39	-4,0	-4,0	7	21.10	-4,0	-4,6
13 sept-03	10	21.79	-4,0	-4,7	7	21.72	-4,0	-4,0	7	21.12	-4,0	-4,7
14 sept-03	10	21.95	-4,0	-4,9	7	22.06	-4,0	-4,0	7	21.14	-4,0	-4,9
15 sept-03	10	22.10	-4,0	-5,0	7	22.40	-4,0	-4,0	7	21.17	-4,0	-5,0
16 sept-03	10	22.25	-4,0	-5,2	7	22.74	-4,0	-4,0	7	21.19	-4,0	-5,2
17 sept-03	10	22.41	-4,0	-5,3	7	23.08	-4,0	-4,0	7	21.22	-4,0	-5,3
18 sept-03	10	22.56	-4,0	-5,5	7	23.42	-4,0	-4,0	7	21.24	-4,0	-5,5
19 sept-03	10	22.71	-4,0	-5,6	7	23.76	-4,0	-4,0	7	21.26	-4,0	-5,6
20 sept-03	10	22.87	-4,0	-5,8	7	24.10	-4,0	-4,0	7	21.29	-4,0	-5,8
21 sept-03	10	23.02	-4,0	-5,9	7	24.44	-4,0	-4,0	7	21.31	-4,0	-5,9
22 sept-03	10	23.18	-4,0	-6,0	7	24.77	-4,0	-4,0	7	21.34	-4,0	-6,0
23 sept-03	10	23.35	-4,1	-6,0	7	25.05	-4,1	-4,3	7	21.73	-4,1	-6,0
24 sept-03	10	23.53	-4,3	-6,0	7	25.32	-4,3	-4,6	7	22.12	-4,3	-6,0
25 sept-03	10	23.70	-4,4	-6,0	7	25.60	-4,4	-4,9	7	22.51	-4,4	-6,0
26 sept-03	10	23.88	-4,6	-6,0	7	25.87	-4,6	-5,1	7	22.90	-4,6	-6,0
27 sept-03	10	24.05	-4,7	-6,0	7	26.15	-4,7	-5,4	7	23.29	-4,7	-6,0
28 sept-03	10	24.22	-4,9	-6,0	7	26.43	-4,9	-5,7	7	23.69	-4,9	-6,0
29 sept-03	10	24.40	-5,0	-6,0	7	26.70	-5,0	-6,1	7	24.08	-5,0	-6,0
30 sept-03	10	24.57	-5,1	-6,0	7	26.98	-5,1	-6,3	7	24.47	-5,1	-6,0
1 oct-03	10	24.75	-5,3	-6,0	7	27.25	-5,3	-6,7	7	24.86	-5,3	-6,0
2 oct-03	15	24.92	-5,4	-6,0	7	27.53	-5,4	-7,0	7	25.25	-5,4	-6,0
3 oct-03	20	25.09	-5,6	-6,0	13	27.81	-5,6	-7,3	13	25.64	-5,6	-6,0
4 oct-03	22	25.27	-5,7	-6,0	16	28.08	-5,7	-7,5	16	26.03	-5,7	-6,0
5 oct-03	23	25.44	-5,9	-6,0	16	28.36	-5,9	-7,7	16	26.42	-5,9	-6,0
6 oct-03	24	25.62	-6,0	-6,0	17	28.63	-6,0	-8,0	17	26.81	-6,0	-6,0
7 oct-03	28	26.31	-6,4	-6,1	22	29.04	-6,4	-8,0	22	27.23	-6,4	-6,3
8 oct-03	28	27.01	-6,9	-6,3	22	29.44	-6,9	-8,0	22	27.65	-6,9	-6,6
9 oct-03	32	27.70	-7,3	-6,4	22	29.85	-7,3	-8,0	22	28.07	-7,3	-6,9
10 oct-03	41	28.40	-7,7	-6,6	26	30.25	-7,7	-8,0	26	28.49	-7,7	-7,2
11 oct-03	46	29.09	-8,1	-6,7	26	30.66	-8,1	-8,0	26	28.91	-8,1	-7,5
12 oct-03	53	29.78	-8,6	-6,9	27	31.06	-8,6	-8,0	27	29.34	-8,6	-7,8
13 oct-03	59	30.48	-9,0	-7,0	29	31.47	-9,0	-8,0	29	29.76	-9,0	-8,0
14 oct-03	68	31.17	-9,4	-7,2	38	31.87	-9,4	-8,0	38	30.18	-9,4	-8,3
15 oct-03	69	31.87	-9,9	-7,3	38	32.28	-9,9	-8,0	38	30.60	-9,9	-8,6
16 oct-03	85	32.56	-10,3	-7,5	42	32.68	-10,3	-8,0	42	31.02	-10,3	-8,9
17 oct-03	101	33.25	-10,7	-7,6	55	33.09	-10,7	-8,0	55	31.44	-10,7	-9,2
18 oct-03	118	33.95	-11,1	-7,8	71	33.49	-11,1	-8,0	71	31.86	-11,1	-9,5
19 oct-03	135	34.64	-11,5	-7,9	87	33.90	-11,5	-8,0	87	32.28	-11,5	-9,8
20 oct-03	156	35.34	-12,0	-8,0	105	34.30	-12,0	-8,0	105	32.70	-12,0	-10,0
21 oct-03	180	35.25	-12,6	-8,6	128	34.31	-12,6	-8,4	128	32.99	-12,6	-10,7
22 oct-03	204	35.17	-13,1	-9,2	144	34.31	-13,1	-8,9	144	33.28	-13,1	-11,4
23 oct-03	228	35.08	-13,7	-9,8	162	34.32	-13,7	-9,3	162	33.57	-13,7	-12,1
24 oct-03	252	35.00	-14,3	-10,4	181	34.33	-14,3	-9,8	181	33.86	-14,3	-12,8
25 oct-03	276	34.91	-14,9	-11,0	195	34.34	-14,9	-10,2	195	34.14	-14,9	-13,5

date	Béchedor				Pampev				Trécesson			
	heures cumulées de froid ¹	ratio MS/MF calculé ²	tolérance au gel (°C)		heures cumulées de froid	ratio MS/MF calculé	tolérance au gel (°C)		heures cumulées de froid	ratio MS/MF calculé	tolérance au gel (°C)	
			Tiges ³	Racines ⁴			tiges	racines			tiges	racines
26 oct-03	288	34.82	-15,4	-11,5	201	34.34	-15,4	-10,6	201	34.43	-15,4	-14,2
27 oct-03	288	34.74	-16,0	-12,6	202	34.35	-16,0	-11,0	202	34.72	-16,0	-15,0
28 oct-03	302	34.65	-16,6	-12,6	216	34.36	-16,6	-11,5	216	35.01	-16,6	-15,7
29 oct-03	311	34.57	-17,1	-13,2	224	34.36	-17,1	-11,9	224	35.30	-17,1	-16,4
30 oct-03	323	34.48	-17,7	-13,8	229	34.37	-17,7	-12,3	229	35.59	-17,7	-17,1
31 oct-03	332	34.39	-18,3	-14,4	238	34.38	-18,3	-12,7	238	35.88	-18,3	-17,8
1 nov-03	336	34.31	-18,8	-15,0	243	34.39	-18,8	-13,2	243	36.17	-18,8	-18,5
2 nov-03	355	34.22	-19,4	-15,5	261	34.39	-19,4	-13,6	261	36.46	-19,4	-19,2
3 nov-03	365	34.13	-20,0	-16,0	271	34.40	-20,0	-14,0	271	36.74	-20,0	-20,0

date	Harrington				Somival				Sargim			
	heures cumulées de froid	ratio MS/MF calculé	tolérance au gel (°C)		heures cumulées de froid	ratio MS/MF calculé	tolérance au gel (°C)		heures cumulées de froid	ratio MS/MF calculé	tolérance au gel (°C)	
			Tiges	Racines			tiges	racines			tiges	racines
13 sept-04	0	21.52	-4,0	-4,0	9	22.73	-4,0	-4,0	0	25.03	-4,0	-4,0
14 sept-04	0	21.84	-4,0	-4,1	17	23.04	-4,0	-4,0	4	25.34	-4,0	-4,1
15 sept-04	0	22.16	-4,0	-4,3	17	23.34	-4,0	-4,0	4	25.65	-4,0	-4,3
16 sept-04	0	22.47	-4,0	-4,4	17	23.65	-4,0	-4,0	4	25.96	-4,0	-4,4
17 sept-04	0	22.79	-4,0	-4,6	17	23.95	-4,0	-4,0	4	26.27	-4,0	-4,6
18 sept-04	9	23.11	-4,0	-4,7	17	24.26	-4,0	-4,0	4	26.58	-4,0	-4,7
19 sept-04	20	23.43	-4,0	-4,9	19	24.56	-4,0	-4,0	4	26.89	-4,0	-4,9
20 sept-04	27	23.75	-4,0	-5,0	28	24.87	-4,0	-4,0	12	27.20	-4,0	-5,0
21 sept-04	27	24.06	-4,0	-5,2	38	25.17	-4,0	-4,0	16	27.51	-4,0	-5,2
22 sept-04	27	24.38	-4,0	-5,3	46	25.48	-4,0	-4,0	16	27.82	-4,0	-5,3
23 sept-04	27	24.70	-4,0	-5,5	47	25.78	-4,0	-4,0	16	28.13	-4,0	-5,5
24 sept-04	27	25.02	-4,0	-5,6	55	26.09	-4,0	-4,0	16	28.44	-4,0	-5,6
25 sept-04	27	25.34	-4,0	-5,8	55	26.39	-4,0	-4,0	16	28.75	-4,0	-5,8
26 sept-04	31	25.65	-4,0	-5,9	55	26.70	-4,0	-4,0	16	29.06	-4,0	-5,9
27 sept-04	31	25.97	-4,0	-6,0	58	27.00	-4,0	-4,0	16	29.35	-4,0	-6,0
28 sept-04	32	26.36	-4,4	-6,2	59	27.48	-4,3	-4,4	16	29.65	-4,4	-6,2
29 sept-04	44	26.76	-4,8	-6,5	68	27.95	-4,6	-4,8	21	29.95	-4,8	-6,5
30 sept-04	51	27.15	-5,2	-6,8	76	28.43	-4,8	-5,2	21	30.25	-5,2	-6,8
1 oct-04	53	27.55	-5,6	-7,0	80	28.91	-5,1	-5,6	21	30.55	-5,6	-7,0
2 oct-04	61	27.94	-6,0	-7,3	80	29.39	-5,4	-6,0	21	30.85	-6,0	-7,3
3 oct-04	73	28.33	-6,4	-7,8	83	29.86	-5,6	-6,4	21	31.15	-6,4	-7,8
4 oct-04	85	28.73	-6,8	-8,0	91	30.34	-5,9	-6,8	21	31.45	-6,8	-8,0
5 oct-04	102	29.12	-7,2	-8,3	99	30.82	-6,2	-7,2	30	31.75	-7,2	-8,3
6 oct-04	112	29.52	-7,6	-8,6	112	31.29	-6,4	-7,6	41	32.05	-7,6	-8,6
7 oct-04	122	29.91	-8,0	-8,8	122	31.77	-6,7	-8,0	49	32.35	-8,0	-8,8
8 oct-04	128	30.30	-8,4	-9,1	131	32.25	-7,0	-8,4	49	32.65	-8,4	-9,1
9 oct-04	128	30.70	-8,8	-9,4	131	32.72	-7,2	-8,8	49	32.95	-8,8	-9,4
10 oct-04	128	31.09	-9,2	-9,6	131	33.20	-7,5	-9,2	49	33.25	-9,2	-9,6
11 oct-04	132	31.49	-9,6	-9,8	131	33.68	-7,8	-9,6	49	33.55	-9,6	-9,8
12 oct-04	146	31.88	-10,0	-10,0	133	34.15	-8,0	-10,0	55	33.82	-10,0	-10,0
13 oct-04	161	32.25	-10,2	-10,1	136	34.24	-8,3	-10,1	58	34.27	-10,2	-10,1
14 oct-04	170	32.62	-10,3	-10,3	148	34.33	-8,6	-10,3	67	34.72	-10,3	-10,3
15 oct-04	170	33.00	-10,5	-10,4	154	34.41	-8,9	-10,4	70	35.17	-10,5	-10,4
16 oct-04	170	33.37	-10,6	-10,5	154	34.50	-9,2	-10,5	70	35.62	-10,6	-10,5
17 oct-04	175	33.74	-10,8	-10,7	154	34.59	-9,5	-10,7	70	36.07	-10,8	-10,7

date	Harrington				Somival				Sargim			
	heures cumulées de froid	ratio MS/MF calculé	tolérance au gel (°C)		heures cumulées de froid	ratio MS/MF calculé	tolérance au gel (°C)		heures cumulées de froid	ratio MS/MF calculé	tolérance au gel (°C)	
			Tiges	Racines			tiges	racines			tiges	racines
18 oct-04	189	34,11	-10,9	-10,8	157	34,68	-9,8	-10,8	74	36,52	-10,9	-10,8
19 oct-04	206	34,48	-11,1	-11,0	168	34,77	-10,1	-11,0	85	36,97	-11,1	-11,0
20 oct-04	223	34,86	-11,2	-11,1	185	34,85	-10,5	-11,1	100	37,42	-11,2	-11,1
21 oct-04	235	35,23	-11,4	-11,3	202	34,94	-10,8	-11,3	116	37,87	-11,4	-11,3
22 oct-04	250	35,60	-11,5	-11,4	218	35,03	-11,1	-11,4	129	38,32	-11,5	-11,4
23 oct-04	267	35,97	-11,7	-11,6	237	35,12	-11,4	-11,6	146	38,77	-11,7	-11,6
24 oct-04	284	36,34	-11,8	-11,8	252	35,21	-11,7	-11,8	163	39,22	-11,8	-11,8
25 oct-04	301	36,72	-12,0	-12,0	269	35,30	-12,0	-12,0	180	39,67	-12,0	-12,0
26 oct-04	313	36,76	-12,6	-12,6	285	35,44	-12,6	-12,6	198	39,65	-12,6	-12,6
27 oct-04	329	36,81	-13,1	-13,1	301	35,59	-13,1	-13,1	213	39,63	-13,1	-13,1
28 oct-04	347	36,85	-13,7	-13,7	322	35,73	-13,7	-13,7	232	39,62	-13,7	-13,7
29 oct-04	364	36,89	-14,3	-14,3	343	35,88	-14,3	-14,3	250	39,60	-14,3	-14,3
30 oct-04	372	36,93	-14,9	-14,9	363	36,02	-14,9	-14,9	262	39,58	-14,9	-14,9
31 oct-04	372	36,98	-15,4	-15,4	373	36,16	-15,4	-15,4	262	39,57	-15,4	-15,4
1 nov-04	387	37,02	-16,0	-16,0	388	36,31	-16,0	-16,0	278	39,55	-16,0	-16,0
2 nov-04	402	37,06	-16,6	-16,6	412	36,45	-16,6	-16,6	298	39,53	-16,6	-16,6
3 nov-04	421	37,11	-17,1	-17,1	436	36,60	-17,1	-17,1	322	39,52	-17,1	-17,1
4 nov-04	442	37,15	-17,7	-17,7	459	36,74	-17,7	-17,7	341	39,50	-17,7	-17,7
5 nov-04	465	37,19	-18,3	-18,3	483	36,88	-18,3	-18,3	365	39,48	-18,3	-18,3
6 nov-04	486	37,24	-18,8	-18,8	507	37,03	-18,8	-18,8	389	39,46	-18,8	-18,8
7 nov-04	503	37,28	-19,4	-19,4	531	37,17	-19,4	-19,4	413	39,45	-19,4	-19,4

* Le pépiniériste pourra déterminer à l'avance les seuils de tolérance au gel graduels des plants d'épinette noire (1+0) estimés à partir du ratio de matière sèche de la partie aérienne des plants d'épinette noire (1+0) ou du nombre d'heures cumulées de froid.

¹ Le nombre d'heures cumulées de froid (n) au ras des plants d'épinette noire (1+0) est calculé à partir des données météorologiques enregistrées dans chacune des pépinières à un intervalle régulier de 15 minutes, comme suit :

$$n = \sum_j \sum_{i=1}^{i=24} (Tr - Th), \text{ avec } (Tr - Th) > 0$$

Tr : température de référence (= 5 °C)

Th : température horaire enregistrée (°C)

i : heure de la journée (1 jour = 24 heures)

j : jour julien dont la période d'évaluation s'est étalée de la mi-septembre jusqu'au début novembre.

² Le ratio de la matière sèche journalier de la partie aérienne entière des plants d'épinette noire (RMS) spécifique à chaque pépinière et à chaque provenance (ou lot de semences) est calculé à partir de la relation linéaire simple reliant le RMS au nombre d'heures cumulées de froid. Le RMS des parties aériennes pourra être utilisé pour prédire les seuils de tolérance au gel aussi bien des parties aériennes que des racines.

^{3,4} Les seuils de tolérance au gel journaliers des parties aériennes et des racines des plants d'épinette noire (1+0) sont calculés à partir des pentes des chartes d'endurcissement entre deux dates d'échantillonnage consécutives. Ces seuils sont déterminés de telle façon qu'aucun constituant du plant ne soit endommagé.

La masse des racines pourrait-elle être utilisée comme un critère de qualité avant la livraison des plants en site de reboisement ?

Mohammed S. Lamhamedi^{1,2,3}

¹ Direction de la recherche forestière, ministère des Ressources naturelles et de la Faune, 2700 rue Einstein, Québec (Québec) G1P 3W8

² mohammed.lamhamedi@mrnf.gouv.qc.ca

³ 418 643 7994 poste 6553

La photo et la note biographique complète de l'auteur sont présentées à la page 87.

L'évaluation de la qualité morpho-physiologique des racines des plants forestiers, ainsi que les facteurs qui affectent cette qualité (positivement ou négativement) tout au long de la filière de reboisement, ont fait l'objet de plusieurs travaux dont l'objectif général est d'assurer une meilleure survie et une bonne croissance des plants après leur mise en terre en site de reboisement (GROSSNICKLE 2000, LAMHAMEDI et FORTIN 1994). Pour comprendre les processus physiologiques et améliorer la qualité des racines, différents travaux ont mis l'accent sur la génétique des racines, la cohésion des racines (carotte) en relation avec la survie des plants en plantation, l'architecture des racines, la viabilité des racines et la capacité d'absorption d'eau par les racines, la nutrition minérale, la masse sèche des racines, le ratio des masses sèches entre les parties aériennes et les racines, les processus écophysiologiques (relations hydriques, échanges gazeux, etc.) et la tolérance aux stress environnementaux (températures, gel, stress hydrique) (BIGRAS et DUMAIS 2005, BIGRAS et COLOMBO 2001).

La masse sèche des racines est un critère quantitatif dont l'évaluation est non subjective. Ainsi, lorsque les variables environnementales et les conditions de croissance (régies de culture, absence de stress environnementaux : gel, stress hydrique et thermique) sont bien contrôlées, la masse des racines pourra être utilisée pour comparer des traitements, ou de la corréler à certaines variables ciblées. **Par contre, à mon avis, la masse sèche des racines des plants forestiers produits dans les conditions écologiques des pépinières forestières spécifiques au Québec ne peut pas être utilisée à elle seule comme critère de qualification du système racinaire des plants destinés au reboisement.** L'utilisation de la masse sèche des racines à elle seule ne permet pas de porter un jugement sur la viabilité et la qualité des racines soumises, par exemple, à la sécheresse ou aux différents types de gels (Figures 1 et 2). En effet, après la mise en terre, la survie et la croissance des plants sont fortement dépendantes de la viabilité des racines, de la cohésion de la carotte, de l'architecture et de la distribution des racines (jeunes racines blanches ou vieilles racines subérisées), ainsi que des conditions du site (teneur en eau du sol, température, fertilité, etc.) (MARGOLIS et BRAND 1990).

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.; Lamhamedi, M.S. (éds.), 2011. Production de plants forestiers au Québec : la culture de l'innovation. Colloque de transfert de connaissances et de savoir-faire. Carrefour Forêt Innovations, 4-6 octobre 2011, Québec (Canada), 140 p. pp : 65 – 69.



Figure 1. Photos montrant les mêmes plants qui ont donc les mêmes masses de racines. a- Sur cette photo, les racines d'épinette blanche au début de la 2^e saison de croissance sont vivantes et montrent une activité racinaire normale, b- ces mêmes plants ont subi un dessèchement, la qualité du système racinaire s'est détériorée (mortalité des apex, etc.) et la reprise de la croissance des racines sera retardée de façon significative. Si on veut reboiser, il serait important d'utiliser les plants qui montrent une activité racinaire normale.

Tout au long de chaque saison de croissance, les plants sont soumis à une succession et à une interaction de différents stress environnementaux, parfois très sévères, dont les effets affectent négativement la qualité des racines et celle des plants (gels hâtif et tardif, gel hivernal, absence de couverture de neige en début d'hiver, été très pluvieux, été très sec avec des températures de l'air très élevées, etc.). Avec les changements climatiques qui sont devenus une réalité, l'intensité et la variabilité inter et intra-annuelle de ces stress ne peut qu'être accentuée dans l'avenir. Dans ces conditions, les pépiniéristes font face à un défi de taille. Les mesures d'atténuation, à caractère opérationnel, de ces stress commencent actuellement à faire partie des nouvelles techniques culturales appliquées ou expérimentées dans certaines pépinières forestières.



Figure 2. a- Plants d'épinette blanche qui montrent des différences en matière de cohésion de la carotte et d'activité racinaire vers la mi-juin. b et c- Plants d'épinette blanche (2+0) qui montrent tous les deux une bonne cohésion de la carotte, mais différent en matière d'activité racinaire. Le plant doté d'une bonne activité racinaire et de racines vivantes (cas du plant c) a une meilleure chance de performer en site de reboisement par comparaison au plant b. Lorsque les dates de qualification et de livraison des plants sont hâtives, il se peut que certains plants soient livrés avec une partie du système racinaire affecté par le gel mais dont le diagnostic reste très difficile.

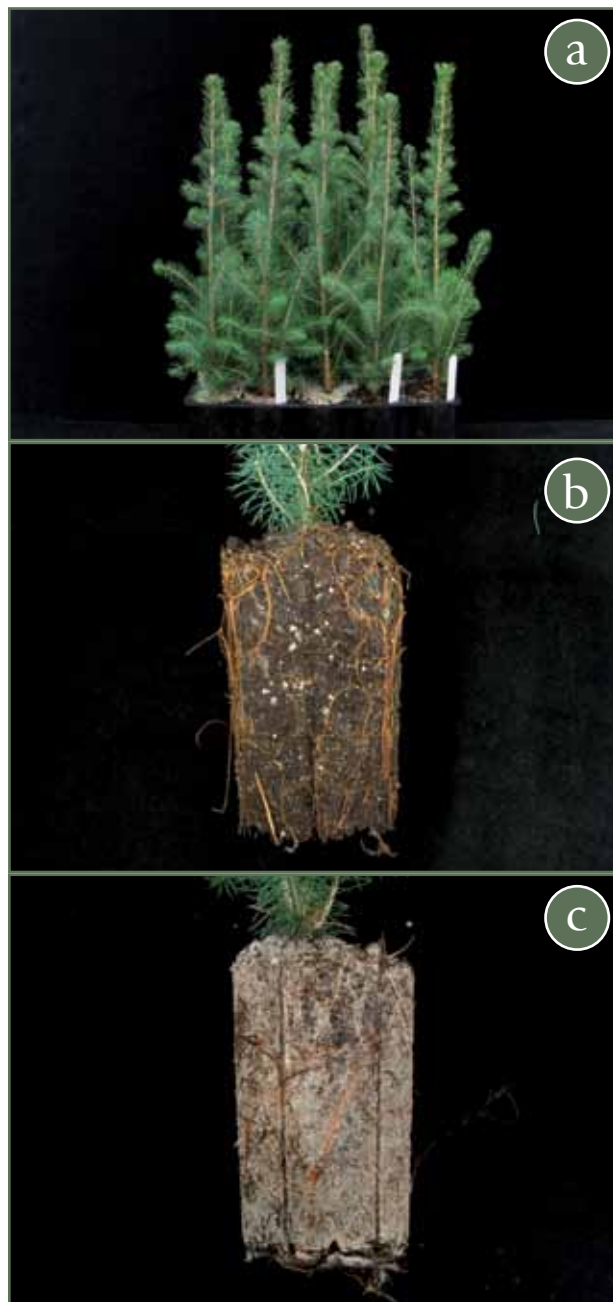


Figure 3. a- Plants d'épinette blanche (2+0) produits dans le récipient 25-310. b- Plant d'épinette blanche (2+0) non mycorhizé. c- Plant d'épinette blanche (2+0) mycorhizé dont la cohésion de la carotte est assurée par la phase extramatrice. La présence du champignon favorise la sécrétion des hormones de croissance qui améliorent de façon significative l'initiation de racines courtes. La phase extramatrice du champignon (hyphes fins et cordons mycéliens) confère également au plant une résistance accrue à la sécheresse.

Après la mise en terre, l'installation et l'acclimatation des plants forestiers aux conditions environnementales et aux différents stress environnementaux du site de reboisement est une phase cruciale et déterminante pour la survie et la croissance des plants. Ainsi,

pour augmenter la probabilité de survie des plants, la carotte doit être dotée d'une bonne cohésion après extraction de la cavité du récipient, afin de faciliter les manipulations, d'éviter les bris racinaires et d'assurer une grande surface de contact entre le sol et les **racines vivantes** après la mise en terre. Cette cohésion est généralement assurée par l'architecture des racines et le développement de la phase extramatrice des champignons ectomycorhiziens (Figure 3). La colonisation des racines par ces champignons se fait soit de façon naturelle ou artificielle. Après deux ans de croissance en site de reboisement, des travaux ont montré que les plants de *Pinus ponderosa* dotés d'une bonne cohésion de la carotte présentaient un meilleur taux de survie (92%) et une bonne croissance par comparaison aux plants ayant des carottes de faible cohésion (taux de survie : 15%) (TINUS 1974). **En plus de la cohésion des racines, la présence de racines vivantes fonctionnelles, mycorhizées ou non, à la périphérie de la carotte sont primordiales pour la reprise des plants après la mise en terre.** En effet, la présence de racines vivantes à la périphérie améliore de façon rapide le contact à l'interface sol-racines, ce qui permet aux racines d'explorer un grand volume du sol du site de reboisement afin d'assurer un bon approvisionnement en eau et en éléments minéraux. La colonisation de la carotte par des champignons ectomycorhiziens va améliorer davantage le contact sol-racines car les hyphes et les cordons mycéliens du champignon peuvent pénétrer dans des micropores où les racines ne peuvent pas accéder (LAMHAMEDI *et al.* 1992, GAGNON et LAMHAMEDI 2011). Ainsi, les champignons ectomycorhiziens peuvent transporter des quantités importantes d'eau pour satisfaire une grande partie des besoins en eau du plant et en lui conférant en même temps une résistance accrue à la sécheresse.

La croissance des racines des différentes essences forestières produites dans les pépinières forestières du Québec ne se fait pas au même rythme (LANGLOIS *et al.* 1983). De récents travaux ont démontré l'absence d'une relation significative entre la masse sèche des racines et l'insuffisance racinaire des plants d'épinette blanche (2+0) produits en récipients en pépinière forestière (PAIEMENT 2011). Chaque étape de la filière de production de plants (choix du substrat, date d'ensemencement, régies de culture, protection des plants contre les gels, insectes et maladies, etc.) affecte directement la qualité morpho-physiologique des plants. Ainsi, par exemple, l'absence d'apports de fertilisants pendant une longue période jusqu'à ce que les plants soient chlorosés (Figure 4) et le recours à des stress hydriques épisodiques très sévères (carotte complètement sèche) pour contrôler la crois-



Figure 4. a- Récipients de plants de pin gris au début de la 2^e saison de croissance chlorosés (à gauche) et verts, normaux, (à droite). b- Excellente initiation de nouvelles racines blanches chez les plants verts normaux (à gauche, flèche) et absence de reprise et de croissance des racines chez les plants chlorosés (à droite, double flèche).

sance en hauteur, peuvent avoir des conséquences négatives sur la croissance des racines. Les plants chlorosés ont une concentration foliaire en azote très faible, ce qui limite la photosynthèse et l'initiation de nouvelles racines. Cependant, le démarrage de l'activité racinaire peut être retardée au printemps selon les essences. Ce retard d'activité racinaire observé au printemps pourrait être également dû au gel racinaire ou à une toxicité induite par un apport massif de fertilisants azotés riches en ammonium lorsque le pépiniériste veut rapidement atteindre le critère de concentration foliaire minimale en azote.

Les racines en périphérie de la carotte sont plus sensibles aux manipulations et aux différents stress (température, stress hydrique, etc.). En absence de soins et de précautions lorsque les plants quittent la pépinière, la qualité des racines peut se détériorer rapidement selon la durée et les conditions de transport et de stockage en site de reboisement, et les modalités de leur manipulation avant la mise en

terre (Figure 1). La présence de racines vivantes non subérisées à la périphérie de la carotte permettent aux plants d'absorber plus d'eau et d'éléments minéraux à cause de leur conductivité hydraulique élevée par comparaison aux racines subérisées, ce qui facilite l'installation et l'acclimatation rapide des plants aux conditions du site de reboisement.

Références

BERNIER, P.Y., M. S. LAMHAMEDI et D.G. SIMPSON, 1995. *Shoot: root ratio is of limited use in evaluating the quality of container conifer stock*. Tree Planters' Notes. 43: 102-106.

BIGRAS F.J., et D. DUMAIS, 2005. *Root-freezing damage in the containerized nursery: impact on plantation site - A review*. New For 30:167-184.

BIGRAS, F.J. et S.J. COLOMBO, (eds), 2001. *Conifer Cold Hardiness*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Pays-Bas, p. 57-88.

CARLES, S., M.S. LAMHAMEDI, D.C. STOWE, H.A. MARGOLIS, P.Y. BERNIER, L. VEILLEUX et B. FECTEAU, 2008. *Frost tolerance of two-year-old Picea glauca seedlings grown under different irrigation regimes in a forest nursery*. Scand. J. For. Res. 23:137-147.

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.; Lamhamed, M. S (éds.). 2011. Production de plants forestiers au Québec : la culture de l'innovation. Colloque de transfert de connaissances et de savoir faire. Carrefour Forêt Innovations, 4-6 octobre 2011, Québec (Canada). pp : 27-32.

GROSSNICKLE, S.C., 2000. *Ecophysiology of northern spruce species: the performance of planted seedlings*. NRC Research Press, Ottawa, Ontario, Canada. pages 340-347 p.

LAMHAMEDI, M.S., 2011. *Détermination des seuils de tolérance au gel des plants produits dans les pépinières forestières du Québec : intégration dans la prise de décision et l'optimisation des mesures de protection*. Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Direction de la recherche forestière. Avis de recherche forestière n° 27. 2 p. <http://www.mrnf.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Lamhamed-Mohammed/Avis27.pdf>

LAMHAMEDI, M.S., 2011. *Variabilité spatiale et variations extrêmes des teneurs en eau du substrat en pépinière forestière : facteurs aggravant de l'insuffisance racinaire*. Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Direction de la recherche forestière. Avis de recherche forestière n° 28. 2 p. <http://www.mrnf.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Lamhamed-Mohammed/Avis28.pdf>

LAMHAMEDI, M. S., M. RENAUD, P. DESJARDINS et L. VEILLEUX, 2011. *Production de plants forestiers et changements climatiques : cas des extrêmes climatiques hivernaux*. Stand présenté au Carrefour Forêt Innovations: Inspiration, Motivation et Réussite. 4 au 6 octobre 2011, Centre des Congrès, Québec, Canada.

LAMHAMED, M.S., L. VEILLEUX et M. RENAUD, 2005. *Élaboration des seuils de tolérance au gel des plants d'épinette blanche (1+0) en pépinière forestière selon les régions écologiques du Québec*. Ministère des Ressources naturelles, Direction de la recherche forestière, Sainte-Foy, Québec. Mémoire de recherche forestière n° 147, 52 p. <http://www.mrn.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Lamhamed-Mohammed/Memoire147.pdf>

LAMHAMED, M.S., H.A. MARGOLIS, M. RENAUD, L. VEILLEUX et I. AUGER, 2003. *Effets de différentes régies d'irrigation sur la croissance, la nutrition minérale et le lessivage des éléments nutritifs des semis d'épinette noire (1 + 0) produits en récipients à parois ajourées en pépinière forestière*. Can. J. For. Res. 33 : 279-291.

LAMHAMED, 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 : 2200-2212.

LAMHAMED, M. S. et J.A. FORTIN, 1994. *La qualité des plants forestiers: critères d'évaluation et performances dans les sites de reboisement*. Dans: Actes de la première journée nationale sur les plants forestiers. Abourouh M. (ed.). Centre de Recherche et d'Expérimentation Forestières, Rabat, Maroc, pp 35-50.

LAMHAMED, 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. 10:231-244.

LANDIS, T.D. (ed.), 2010. *Seedling Processing, Storage, and Outplanting, The Container Tree Nursery Manual - Vol. 7*. U.S. Department of Agriculture, Forest service, Agric. Handbk. 674.

LANGLOIS, C.G., L. GODBOUT et J.A. FORTIN, 1983. *Seasonal variation of growth and development of the roots of five second year conifer species in the nursery*. Plant and Soil 71: 55-62.

LINDSTRÖM, A. et A. MATSSON, 1994. *Cultivation of containerized seedlings in Sweden-systems for forest protection and methods to detect root injuries*. Acta Hort. 361: 429-440.

MARGOLIS, H.A. et D.G. BRAND, 1990. *An ecophysiological basis for understanding plantation establishment*. Can. J. For. Res. 20: 375-390.

PAIEMENT, I., 2011. *Effets des propriétés physiques et chimiques du substrat sur la croissance racinaire et la nutrition minérale des plants d'épinette blanche*. RÉSUMÉ DU séminaire de fin d'études (BVG-7014), Faculté des sciences de l'agriculture et de l'alimentation, Département de phytologie, Université Laval. 17 mars 2011. 2p.

SIMPSON, D. G. ET G.A. RITCHIE, 1996. *Does RGP predict field performance? A debate*. New Forests 13: 249-273

TINUS, R.W., 1974. *Characteristics of seedlings with high survival potential*. Dans : Tinus, R.W.; W.I. Stein et W.F. Balmer (eds.). Proceedings, North American Containerized Forest Tree Seedling Symposium; 1974, August 26-29; Denver, CO. Pub. 68. Great Plains Agricultural Council: 276-282.

L'enrichissement en CO₂ est-il envisageable pour améliorer la croissance des plants forestiers dans les pépinières forestières du Québec ?

Delphine Boyer-Groulx^{1,3}, Mohammed S. Lamhamed² et Hank A. Margolis¹

¹ Centre d'études de la forêt (CEF), Faculté de foresterie, de géographie et de géomatique, Pavillon Abitibi-Price, Université Laval, 2405 rue de la Terrasse, Québec (Québec) G1V 0A6

² Direction de la recherche forestière, ministère des Ressources naturelles et de la Faune, 2700 rue Einstein, Québec (Québec) G1P 3W8

³ delphine.boyer-groulx.1@ulaval.ca
418-656-2131 poste 3950

La photo et la note biographique complète du 1^{er} auteur sont présentées à la page 107.

Mise en contexte

Les changements climatiques sont une préoccupation mondiale croissante. Il s'agit d'un phénomène maintenant bien reconnu, dont une des principales origines est l'émission de gaz à effet de serre (GES) anthropiques, notamment le dioxyde de carbone (CO₂), le méthane (CH₄) et l'oxyde nitreux (NO₂) (GIEC, 2007). En 2005, la concentration en CO₂ atmosphérique (379 ppm) a été la plus élevée depuis les 650 000 dernières années, augmentant de 1 à 2 ppm/an depuis le milieu des années 1800 (LANDIS 1993). Les prévisions indiquent que la concentration en CO₂ atmosphérique continuera à augmenter dans les prochaines années et, selon le scénario A₁, défini par le groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, celle-ci pourrait doubler d'ici 2100 (GIEC 2007). Cette augmentation pourrait être bénéfique notamment pour les arbres, puisque le CO₂ est un des principaux facteurs limitant pour la photosynthèse, processus physiologique de production des sucres nécessaires à la croissance. En agriculture, les avantages de l'enrichissement en CO₂ dans les serres sont reconnus depuis déjà plusieurs années (KHOSLA 2002). L'amélioration de la productivité concerne principalement la floraison hâtive, l'augmentation de la production des fruits ainsi que l'amélioration de la vigueur des tiges et de la taille des fleurs, dans une courte période de temps. Par contre, l'enrichissement en CO₂ pour la production de plants forestiers est peu fréquent, même si plusieurs études en montrent les effets positifs (LANDIS 1992, 1993; LAMHAMED et BERNIER 1994, tableau 1), et ce principalement au début de la saison de croissance (LANDIS 1992). Les réponses morpho-physiologiques à un enrichissement en CO₂ varient selon les espèces, mais cet enrichissement contribue à réduire relativement la durée de production. Une augmentation de la concentration en CO₂ entre 350 et 1000 ppm a tendance à accroître le taux de croissance, alors que les bénéfices sont marginaux entre 1000 et 2500 ppm et que les effets peuvent être néfastes au-delà de 2500 ppm (LANDIS 1993).

Boyer-Groulx, D., M.S. Lamhamed et H.A. Margolis, 2011. *L'enrichissement en CO₂ est-il envisageable pour améliorer la croissance des plants forestiers dans les pépinières forestières du Québec ?* Dans : Colas, F.; Lamhamed, M.S. (éds.), 2011. Production de plants forestiers au Québec : la culture de l'innovation. Colloque de transfert de connaissances et de savoir-faire. Carrefour Forêt Innovations, 4-6 octobre 2011, Québec (Canada), 140 p. pp : 71 – 74.

Synthèse de quelques travaux sur l'enrichissement en CO₂ des essences forestières en conditions contrôlées

Tableau 1 : Résultats de différentes études sur l'enrichissement en CO₂ sur la production de semis

Référence	Production	Effets d'un enrichissement en CO ₂
AMBEBE <i>et al.</i> 2009	Semis de bouleau blanc (<i>Betula papyrifera</i> Marsh.) exposés à deux teneurs en CO ₂ (360 et 720 ppm), trois températures du sol (5, 15 et 25 °C et 7, 17 et 27 °C un mois plus tard) et trois régimes nutritifs (concentrations de N-P-K faibles, moyennes et élevées) durant quatre mois.	• Effet positif sur la hauteur (seulement lorsque combiné à une température du sol moyenne ou élevée). • Effet positif sur le diamètre au collet (seulement lorsque combiné à une température du sol moyenne ou élevée). • Effet positif sur la biomasse de la tige (seulement lorsque combiné à une température du sol et un régime nutritif élevés ou encore lorsque combiné à une température du sol moyenne et un régime nutritif moyen ou élevé). • Aucun effet sur la biomasse des feuilles, des racines et totale.
BOYER-GROULX <i>et al.</i> 2011	Semis (3+0) d'épinette blanche (<i>Picea glauca</i> (Moench) Voss) exposés à deux traitements de CO ₂ (CO ₂ actuel = 380 ppm et CO ₂ élevé = 760 ppm) lors de leur deuxième et troisième saison de croissance en chambre de croissance.	• Effet positif sur le diamètre au collet (9 %) ainsi que sur la masse sèche des racines (16 %). • Aucun effet sur la hauteur, la masse sèche des parties aériennes, la photosynthèse, la transpiration ainsi que la conductance stomatique.
CAMPAGNA <i>et</i> MARGOLIS 1989	Semis (1+0) d'épinette noire (<i>Picea mariana</i> Mill.) exposés à des concentrations en CO ₂ élevée (1000 ppm) et faible (340 ppm) pour une période de 3 ou 6 semaines, à partir de 34, 78, 120 ou 207 jours après germination (correspondant respectivement aux stades de croissance des mois de mars, avril, mai et août).	• Augmentation de la biomasse totale pour les mois de mars (47 %), avril (47 %) et mai (24 %) quand les plants sont exposés durant 3 semaines et 6 semaines. • Augmentation du taux de croissance relatif (RGR) pour les mois de mars (13 %), avril (18 %) et mai (11 %) quand les plants sont exposés durant 6 semaines. • Augmentation de la hauteur totale pour les mois de mars (15 %) et avril (15 %) quand les plants sont exposés durant 6 semaines. • Augmentation du ratio masse sèche des parties aériennes/hauteur totale pour les mois de mars, avril et mai quand les plants sont exposés durant 3 et 6 semaines. • Augmentation de la biomasse totale (30-14 %) et de la biomasse des parties aériennes conservée lors de la récolte en septembre pour les semis exposés à 1000 ppm de CO₂ durant 6 semaines aux mois d'avril ou mai et remis dans des conditions de [CO₂] actuelle pour le reste de leur saison de croissance (augmentation de biomasse des racines conservée seulement pour les semis exposés au mois d'avril).
CAMPAGNA 1989	Semis (1+0) de pin gris (<i>Pinus banksiana</i> Lamb.) exposés à des concentrations en CO ₂ élevée (1000 ppm) et faible (340 ppm) pour une période de 3 ou 6 semaines, à partir de 57 et 99 jours après germination (correspondant respectivement aux stades de croissance des mois de mars et avril) ainsi qu'après 2 saisons de croissance (correspond au mois d'août).	• Effet positif d'une exposition de 3 semaines sur la biomasse totale pour les mois d'avril (14 %) et d'août (8 %), sur la biomasse des feuilles pour les mois d'avril (13 %) et d'août (9 %) et sur la biomasse de la tige pour le mois d'avril (13 %). • Effet positif d'une exposition de 3 semaines sur le taux de croissance relatif pour les mois d'avril (22 %) et d'août (30 %). • Aucun effet d'une exposition de 3 semaines sur la biomasse des racines et la hauteur. • Aucun effet sur la biomasse totale, des feuilles et des racines ainsi que sur la hauteur pour une exposition de 6 semaines.
CARLES <i>et al.</i> 2010	Semis (2+0) d'épinette blanche exposés à deux traitements de CO ₂ (CO ₂ actuel = 380 ppm et CO ₂ élevé = 760 ppm) lors de leur deuxième saison de croissance en chambre de croissance.	• Effet positif sur la hauteur (8 %). • Aucun effet sur le débourrement.
CEULEMANS <i>et</i> MOUSSEAU 1994	Revue de littérature : effets de l'augmentation de la [CO ₂] sur le taux de photosynthèse d'espèces de conifères.	Augmentation du taux de photosynthèse (de 4 à 184 %) sur les aiguilles des plants (1+0) ainsi que sur la biomasse totale (de 9 à 95 %) de ces plants.
GRONINGER <i>et al.</i> 1996	Semis de pin à encens (<i>Pinus taeda</i> L.) soumis, en serre, à deux traitements de CO ₂ (CO ₂ actuel = 401 ppm et CO ₂ élevé = 798 ppm) au cours des deux premières saisons de croissance.	Augmentation de 43 % de la biomasse totale, de 14 % de la hauteur totale ainsi que de 303 % du taux de photosynthèse (après 2 saisons de croissance).

JOHNSON 1993	Semis (1+0) d'épinette noire exposés à deux concentrations en CO ₂ (340-360 et 700 ppm) en chambre de croissance.	• Augmentation de la masse sèche de 54 % après 35 jours de croissance. • Augmentation de 18,4 % du taux de croissance relatif moyen après 35 jours de croissance et de 5,8 % après 79 à 155 jours de croissance. • Diminution de 12,3 % du taux de croissance relatif moyen après 36 à 78 jours de croissance. • Effet positif sur la photosynthèse nette.
LORD <i>et al.</i> 1993	Semis (1+0) d'épinette noire exposés à deux concentrations en CO ₂ (ambiant et 1000 ppm) durant 115 jours en serre.	Effet positif sur la hauteur de la tige, le diamètre de l'hypocotyle ainsi que la biomasse sèche des parties aériennes, des racines et totale.
TJOELKER <i>et al.</i> 1998	Semis (1+0) d'épinette noire, de mélèze laricin (<i>Larix laricina</i> (Du Roi) K. Koch) et de pin gris exposés à des concentrations en CO ₂ élevée (580 ppm) et faible (370 ppm) pour une période de 91 jours, à partir de 18 jours après germination.	• Augmentation du taux de photosynthèse nette (sur la base de masse et de surface) pour les 3 espèces. • Diminution de la conductance stomatique pour l'épinette noire et le mélèze. • Meilleure efficacité d'utilisation de l'eau (de 40 à 80 %) pour l'épinette noire, le mélèze laricin et le pin gris.
ZHANG et DANG 2007	4 espèces boréales (pin gris, épinette noire, épinette blanche et bouleau blanc) soumises à 2 concentrations en CO ₂ (360 et 720 ppm) durant 4 mois au cours de leur deuxième saison de croissance.	• Augmentation du diamètre au collet, de la biomasse foliaire et de la biomasse totale pour les 4 espèces. • Augmentation moyenne de la hauteur de 11 % pour les épinettes noire et blanche ainsi que pour le bouleau blanc.

Installations spécifiques pour réussir un enrichissement en CO₂

Pour assurer la réussite d'un enrichissement en CO₂ en serre, quelques installations sont nécessaires (LANDIS 1992; LANDIS 1993) : une serre étanche, un bon système de ventilation pour permettre la disponibilité du CO₂ à la surface des feuilles ainsi qu'un système d'enrichissement en CO₂. Par contre, avant de considérer enrichir l'atmosphère d'une serre en CO₂, il est important de prendre en compte les coûts d'achat, d'installation, d'opération, de même que la dépréciation de l'équipement (HICKLENTON 1988). Selon FREEMAN (1985, cité par LANDIS 1992), le coût d'enrichissement en CO₂ dans les serres dans le milieu des années 1980 était en moyenne de 1 à 2 \$ par m² de culture annuellement. Par contre, selon l'espèce et l'endroit, les coûts peuvent changer considérablement (LANDIS 1992). Dans une étude réalisée en Ontario, KHOSLA (2002) a montré que le coût spécifique à l'enrichissement en CO₂ varie également selon la source du CO₂ (propane, gaz naturel et CO₂ liquide). En effet, pour un hectare et pour une durée d'application de 12 h, le coût du CO₂ varie entre 33 et 100 \$ Can/jour.

Principales recommandations

- Avant que le pépiniériste opte pour un projet d'enrichissement en CO₂, il s'avère nécessaire d'optimiser les différentes techniques culturales (substrat, fertilisation, irrigation, endurcissement, techniques de protection contre le gel hivernal, etc.) qui permettent d'assurer la production de plants forestiers qui répondent aux normes et critères de qualité morpho-physiologique.

- Le choix de l'intégration de l'enrichissement en CO₂, comme technique culturale lors de la première saison de croissance de la production de plants forestiers revient au pépiniériste.
- Avant de commencer l'achat des installations spécifiques à l'enrichissement, il s'avère nécessaire de faire une étude de faisabilité et une analyse technico-économique approfondie afin que le pépiniériste soit bien éclairé sur les coûts réels des installations, de l'entretien, de la formation du personnel ou du recrutement d'une main d'œuvre spécialisée, de la marge bénéficiaire (s'il y en a), etc..
- Les tunnels utilisés dans la majorité des pépinières forestières du Québec pendant la première saison de croissance, ne permettraient pas, à notre avis, d'assurer une bonne étanchéité pour maintenir de façon stable les concentrations de CO₂ souhaitées pendant la journée.
- En plus de l'apport en CO₂ et pour assurer un rendement optimal de l'enrichissement, il s'avère nécessaire de modifier l'environnement lumineux des tunnels aussi bien en quantité qu'en qualité afin que la photosynthèse des plants soit maximale.

Références

AMBEBE, T.F., Q.-L. DANG et J. MARFO, 2009. *Low soil temperature reduces the positive effects of high nutrient supply on the growth and biomass of white birch seedlings in ambient and elevated carbon dioxide concentrations*. Botany 87 : 905-912.

BOYER-GROULX, D., S. CARLES, M.S. LAMHAMED, J. BEAULIEU, D.C. STOWE, A. RAINVILLE, P.Y. BERNIER, J. BOUSQUET et H.A. MARGOLIS, 2011. *Morpho-physiological responses of (3+0) white spruce full-sib families to climate change*. Canadian Institute of Forestry - Annual General meeting. Canada's Forest Conference. Huntsville, ON, 18-21 September 2011.

CAMPAGNA, M.A. et H.A. MARGOLIS, 1989. *Influence of short-term atmospheric CO₂ enrichment on growth, allocation patterns, and chemistry of black spruce seedlings at different stages of development*. Canadian Journal of Forest Research **19** : 773-782.

CAMPAGNA, M.A., 1989. *Les effets de l'enrichissement en CO₂ de courte durée sur la croissance, l'allocation du carbone et la biochimie d'épinette noire et de pin gris produits en récipients*. Mémoire de maîtrise. Université Laval. 75 p.

CARLES, S., M.S. LAMHAMED, J. BEAULIEU, D.C. STOWE, H.A. MARGOLIS, A. RAINVILLE, P.Y. BERNIER et J. BOUSQUET, 2010. *Genetic variation in budbreak and height growth of (2+0) white spruce full-sib families in response to interactions of elevated CO₂ and temperature*. Eastern CANUSA Conference - En quête de nouvelles solutions pour la foresterie. Edmunston, N.B., 14-16 Octobre 2010.

CEULEMANS, R. et M. MOUSSEAU, 1994. *Tansley review no. 71. Effects of elevated atmospheric CO₂ on woody plants*. New Phytologist **127** : 425-446.

GIEC, 2007. *Bilan 2007 des changements climatiques*. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat.

GRONINGER, J.W., J.R. SEILER, S.M. ZEDAKER et P.C. BERRANG, 1996. *Effects of CO₂ concentration and water availability on growth and gas exchange in greenhouse-grown miniature stands of loblolly pine and red maple*. Functional Ecology **10** : 708-716.

HICKLENTON, P. R., 1988. *CO₂ enrichment in the greenhouse*. Timber Press. Portland. Oregon. 58 p.

JOHNSEN, K.H., 1993. *Growth and ecophysiological responses of black spruce seedlings to elevated CO₂ under varied water and nutrient additions*. Can. J. For. R. **23** : 1033-1042.

KHOSLA, S., 2002. *Fiche technique – Le gaz carbonique dans les serres*. Ministère de l'agriculture, de l'alimentation et des affaires rurales. Ontario. Consulté au <http://www.omafra.gov.on.ca/french/crops/facts/00-078.htm>

LAMHAMED, M.S. et P.-Y. BERNIER, 1994. *Ecophysiology and field performance of black spruce (Picea mariana): a review*. Ann Sci For **51** : 529-551.

LANDIS, T. D., R. W. TINUS, S. E. McDONALD et J. P. BARNETT, 1992. *Atmospheric environment, Vol. 3, the Container Tree Nursery Manual Agric.* 674. Washington, DC: U.S. Department of Agriculture, Forest Service. 145 p.

LANDIS, T. D., 1993. *Forest nursery notes*. USDA Forest Service. Portland. USA. 37 p.

LORD, D., S. MORISSETTE et J. ALLAIRE, 1993. *Influence de l'intensité lumineuse, de la température nocturne de l'air et de la concentration en CO₂ sur la croissance de semis d'épinette noire (Picea mariana) produits en récipients en serres*. Can. J. For. Res. **23** : 101-110.

TJOELKER, M.G., J. OLEKSYN et P.B. REICH, 1998. *Seedlings of five boreal tree species differ in acclimation of net photosynthesis to elevated CO₂ and temperature*. Tree Physiology **18** : 715-726.

ZHANG, S. et Q.-L. DANG, 2007. *Interactive effects of soil temperature and [CO₂] on morphological and biomass traits in seedlings of four boreal tree species*. Forest Science **53**(3): 453-460.

Comment éviter la moisissure nivale dans les pépinières forestières ?

Louise Innes¹ et Julie Bouchard¹



Louise Innes a obtenu, de l'Université Laval, un B.Sc. – Biologie – et un diplôme de M.Sc. (1979) en biologie végétale. En 1981, Louise a accepté un poste au laboratoire de diagnostic des insectes et des maladies des arbres du Ministère des ressources naturelles et de la faune, du Québec, Direction de la protection des forêts. À titre de pathologiste forestier au Service

de la gestion des ravageurs, ses fonctions spécifiques concernent la détection, l'identification et la lutte contre les maladies des arbres, tant dans les forêts naturelles que dans les pépinières forestières et les plantations.

Elle collabore aussi à des projets menés par des professionnels et des chercheurs de d'autres services des Gouvernements provinciaux et fédéral et d'institutions différentes. Elle est responsable de la production occasionnelle de livres sur les maladies des arbres dont « Principales maladies des arbres au Québec » et du rapport annuel « Insectes, maladies et feux dans les forêts québécoises ». Elle a collaboré également à l'élaboration d'un site Web présentant les maladies des arbres du Québec. Louise est membre de la SPPQ, dans le cadre duquel elle a participé à la rédaction de « Noms des maladies des plantes du Canada », 4^{ème} Édition, 2003.

¹ Direction de la protection des forêts, Service de la gestion des ravageurs forestiers, Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, 2700, rue Einstein, Québec (Québec) G1P 3W8
418 643-9679
dpf@mrmf.gouv.qc.ca

Dans le but d'éviter la dissémination des insectes et des maladies à caractère épidémique et d'assurer la bonne santé des plants mis en terre sur les sites de reboisement, la Direction de la protection des forêts a la responsabilité d'effectuer des inspections phytosanitaires dans les cultures de plants forestiers. Au cours des inspections phytosanitaires de certification, un certificat phytosanitaire est délivré pour chaque lot de plants exempts d'insectes ou de maladies susceptibles de causer une épidémie. En 2010, des lots totalisant quelques 191,5 millions de plants ont été inspectés dont 94,3 %, regroupés en 736 lots, étaient cultivés en récipients et 5,7 %, répartis dans 344 lots, étaient produits à racines nues.

La moisissure nivale est une maladie qui endommage régulièrement les plants produits en pépinière forestière. Elle est causée par plusieurs espèces de champignons qui infectent le feuillage des plants en présence d'une couverture de neige ou de glace qui persiste au printemps. Les dommages sont généralement plus prononcés dans les endroits où la neige tarde à fondre au printemps. En principe, plus la neige demeure longtemps sur les plants, plus la probabilité d'infection devient grande. Toutes les essences résineuses peuvent être infectées par cette maladie qui apparaît sous forme d'une épaisse toile de mycélium entremêlés.

Les champignons responsables de la maladie sont des organismes qui se développent à des températures près du point de congélation et qui survivent dans les résidus de plantes ou dans le sol au printemps et à l'été. Les principaux champignons associés à cette maladie sont : *Botrytis cinerea* Pers.:Fr., *Fusarium* spp., *Cylindrocarpon* spp., *Pestalotiopsis* spp. et *Phoma* spp.

Les premiers symptômes de la moisissure nivale peuvent être décelés dès la fonte de la neige, car les pousses sont alors couvertes d'un mycélium brun-noir (Figure 1) et leur feuillage est souvent brunâtre (Figure 2). Si l'infection est bénigne, le feuillage meurt, mais les tissus des pousses latérales et de la tige restent vivants. Par contre, si l'infection est sévère, les plants atteints meurent. Dans les pépinières, la maladie est souvent circonscrite à certaines zones. De ce fait, la moisissure nivale ne représente habituellement pas une problématique importante et dans aucun cas, le certificat ne pourrait être retenu avec la présence de cette maladie dans un lot.

INNES L. et J. BOUCHARD, 2011. *Comment éviter la moisissure nivale dans les pépinières forestières?* Dans : Colas, F.; Lamhamedi, M.S. (éds.), 2011. Production de plants forestiers au Québec : la culture de l'innovation. Colloque de transfert de connaissances et de savoir-faire. Carrefour Forêt Innovations, 4-6 octobre 2011, Québec (Canada), 140 p. pp : 75– 76.



Figure 1. Le mycélium brun-noir qui affecte ces épinettes blanches est attribuable à la moisissure nivale. Photo : J. Arseneault.



Figure 2. La moisissure nivale a fait brunir quelques aiguilles de cette épinette. Photo : L. Breton.

Moyens de lutte

Il est fortement recommandé aux pépiniéristes d'arracher les plants atteints et de les détruire, soit par brûlage ou par enfouissement, pour éviter la propagation de la maladie.

Également, pour enrayer cette moisissure, il existe aussi des moyens qui réduisent grandement la présence de cette maladie :

- éviter de répandre la neige sur les plants au printemps lors du déblaiement des voies de circulation,
- enlever rapidement la couverture de glace au printemps,
- éviter de compacter la neige par le piétinement,
- éviter de produire des plants dans des endroits très ombragés.

Pour de plus amples informations sur les inspections phytosanitaires et les fiches techniques de certaines maladies, nous vous invitons à consulter le site suivant : <http://www.mrnf.gouv.qc.ca/forets/fimaq/controle/index.jsp>

The background of the page features a series of thin, light green lines that originate from the top left corner and fan out towards the right edge, creating a sense of movement and depth. The lines are closely spaced and vary in length, creating a textured, wave-like effect.

Résumés longs des conférences

Les propriétés physiques des substrats affectent-elles la croissance racinaire des plants d'épinette blanche (2+0) en pépinière forestière?

Steeve Pépin^{1,3,4}, Simon Boudreault¹, Ian Paiement¹, Jean Caron¹ et Mohammed S. Lamhamedi²



Steeve Pépin est ingénieur forestier, diplômé de l'Université Laval depuis 1989. Il obtient une maîtrise en sciences forestières en 1991 à la même institution, puis complète un doctorat en biologie forestière à l'Université de Victoria (Colombie-Britannique) en 1998. Après un stage postdoctoral de deux ans et demi (1999–2001) à l'Institut

botanique de l'Université de Bâle en Suisse, il travaille à la Direction de la recherche forestière comme chargé de projet en sylviculture des résineux. Il est depuis 2004 professeur de bioclimatologie à la Faculté des sciences de l'agriculture et de l'alimentation de l'Université Laval. Ses travaux portent sur les principaux facteurs qui contrôlent les échanges gazeux chez les arbres, plus précisément les réactions physiologiques aux stress abiotiques, aux traitements sylvicoles et à l'augmentation du CO₂ atmosphérique, ainsi que sur les propriétés physico-chimiques des principaux substrats utilisés par les pépinières forestières du Québec.

Introduction

Environ 25 millions de plants d'épinette blanche (*Picea glauca* (Moench) Voss) sont produits en réceptifs à chaque année dans les pépinières forestières du Québec. De ce nombre, près de 60 % sont des plants de fortes dimensions (PFD) cultivés pendant deux saisons de croissance (2+0) en vue de reboiser les sites forestiers où la compétition végétale est importante. Parmi l'ensemble des critères et normes de qualité morpho-physiologiques auxquels sont soumis tous les plants forestiers avant leur livraison, l'insuffisance racinaire constitue présentement la principale cause de rejet des plants produits en réceptif, PFD inclus (taux moyen de rejet ≈ 14 % avant tri automnal; DGPSP, MRNF 2009). Cette insuffisance racinaire se caractérise par une croissance insatisfaisante des racines et par une absence de cohésion de la carotte, compromettant la survie du plant lors de la plantation (MRNF 2006; LANDIS *et al.* 1989). De nombreux travaux de recherche ont permis d'améliorer la croissance et l'architecture des racines en mettant l'accent sur le contrôle et l'optimisation des méthodes culturales, notamment l'irrigation, la fertilisation et le modèle du réceptif (forme et volume de la cavité, nombre de plants/m²; GIRARD *et al.* 2001; LAMHAMEDI *et al.* 2001, 2006). Néanmoins, l'insuffisance racinaire demeure à ce jour responsable du rejet annuel de millions de plants forestiers. Ces pertes ont évidemment un impact considérable sur la rentabilité des pépinières.

Il est d'usage commun dans les pépinières forestières du Québec d'utiliser comme substrat de base une tourbe blonde peu humifiée, celle-ci possédant une capacité de rétention d'eau et une teneur en air (θ_a) élevées. L'approvisionnement en tourbe peu humifiée est toutefois précaire en raison de l'augmentation de la durée d'exploitation des tourbières et de la raréfaction de celles en exploitation près des pépinières (HAMANN 2003). Or, les propriétés physicochimiques de la tourbe peuvent varier considérablement selon son degré d'humification et sa provenance (CARON et RIVIÈRE 2003). De plus, les différentes étapes de manutention de la tourbe, de la récolte jusqu'à l'empotage, peuvent modifier les propriétés physiques de celle-ci. Une humification et des manipulations inappropriées de la tourbe auront

¹ Département des sols et de génie agroalimentaire, Centre de recherche en horticulture, Université Laval, Pavillon de l'Environnement, 2480 boulevard Hochelaga, Québec (Québec) G1V 0A6, Canada.

² Direction de la recherche forestière, ministère des Ressources naturelles et de la Faune, 2700 rue Einstein, Québec (Québec) G1P 3W8, Canada.

³ steeve.pepin@fsaa.ulaval.ca

⁴ 418 656 2131 poste 16238

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.; Lamhamedi, M.S. (éds.), 2011. Production de plants forestiers au Québec : la culture de l'innovation. Colloque de transfert de connaissances et de savoir-faire. Carrefour Forêt Innovations, 4-6 octobre 2011, Québec (Canada), 140 p. pp : 79 – 85.

pour effet (i) d'accroître la proportion de particules fines et la capacité de rétention en eau du substrat, et (ii) de réduire sa teneur en air augmentant ainsi les risques d'asphyxie des racines (HEISKANEN 1993).

D'importants effets d'asphyxie racinaire ont été observés sur la croissance de plusieurs espèces végétales (CARON *et al.* 2001; CARON et NKONGOLO 2004), et ce, même dans des substrats ayant une porosité d'air élevée (ALLAIRE *et al.* 1996). En effet, une aération adéquate des substrats ne dépend pas uniquement des caractéristiques de stockage de l'air, telle la porosité d'air (θ_a), mais surtout des caractéristiques de transfert des gaz dans le milieu, telle la diffusion gazeuse (D_g/D_o) ou la tortuosité des pores (τ). Alors que les particules plus grossières augmentent fortement la porosité d'air du milieu, la géométrie de ces particules grossières peut aussi créer de fortes barrières aux échanges gazeux et à la biodisponibilité des gaz dans la rhizosphère (CARON *et al.* 2005, 2010).

Plusieurs études expérimentales ont mis en évidence l'effet des propriétés physicochimiques de la tourbe sur la croissance et la physiologie des plants forestiers, en particulier la photosynthèse, le développement racinaire et la nutrition minérale (FOLK *et al.* 1992; BERNIER et GONZALEZ 1995; HEISKANEN 1995a, 1995b; LAMHAMED *et al.* 2001). Toutefois, peu d'études ont examiné, à l'échelle opérationnelle, l'effet des propriétés physiques du substrat sur la croissance des racines de l'épinette blanche. L'apparition, sous certaines conditions, de stress hypoxiques rapides et marqués dans les milieux artificiels justifie une optimisation des propriétés physiques des substrats de culture qui tiennent compte à la fois des zones de stress gazeux et hydrique (NAASZ *et al.* 2009).

Objectifs de notre étude

Nous supposons que l'optimisation des propriétés du substrat contribuera à l'amélioration de la croissance des racines en vue de diminuer le taux d'insuffisance racinaire.

Les objectifs spécifiques de cette étude consistent à (i) caractériser les propriétés physiques de différents substrats à base de tourbe et leur évolution au cours de la première (1+0) et de la deuxième (2+0) saison de croissance de PFD d'épinette blanche cultivés en récipient 25-310; (ii) établir les relations entre les propriétés physiques du substrat et la croissance des plants et (iii) évaluer la capacité de croissance des racines selon la composition des substrats en conditions contrôlées chez les plants d'épinette blanche (2+0).

Méthodologie

Deux dispositifs expérimentaux distincts d'épinettes blanches en récipient 25-310 ont été installés en pépinière forestière pour évaluer douze substrats de composition (tourbe, vermiculite, perlite) et de textures (granulométrie fine, grossière) différentes. Onze de ces substrats ont été conçus en laboratoire afin d'obtenir une gamme de propriétés physiques couvrant l'ensemble des valeurs observées chez les pépinières forestières du Québec (BOUDREAU 2010). Le douzième substrat fut celui de la pépinière où les essais ont eu lieu (Pampev Inc., Saint-Louis-de-Blandford, Québec). Les quantités des composantes de chacun des substrats ont été déterminées par volume lors de leur confection (Tableau 1).

Les six substrats du premier dispositif expérimental

Tableau 1. Composition volumique ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) des substrats utilisés lors des productions 2008-2009 (S1 à S7) et 2009-2010 (S8 à S13) de plants d'épinette blanche de fortes dimensions à la pépinière Pampev Inc.

Substrat	Tourbe blonde ¹ fine ($< 0,5 \text{ mm}$)	Tourbe blonde ¹ grossière ($> 0,5 \text{ mm}$)	Tourbe brune ² grossière ($> 0,5 \text{ mm}$)	Vermiculite fine ($0,1-1,2 \text{ mm}$)	Vermiculite grossière ($0,6-4,7 \text{ mm}$)	Tourbe blonde ^{1s}	Tourbe blonde ³	Perlite
S1	—	0,86	0,14	—	—	—	—	—
S2	—	0,50	0,50	—	—	—	—	—
S3	0,10	0,45	0,45	—	—	—	—	—
S4	0,50	0,25	0,25	—	—	—	—	—
S5	—	0,35	0,35	—	0,30	—	—	—
S6	—	0,35	0,35	0,30	—	—	—	—
S7	Pampev : $0,75 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$ de tourbe blonde ⁴ légère et $0,25 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$ de vermiculite							
S8	—	—	—	—	0,15	—	0,75	0,10
S9	—	—	—	—	—	1,00	—	—
S10	—	—	—	—	—	—	1,00	—
S11	0,20	—	—	—	—	—	0,80	—
S12	0,40	—	—	—	—	—	0,60	—
S13	Pampev : $0,75 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$ de tourbe blonde ⁴ légère et $0,25 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$ de vermiculite							

¹Les tourbes Nirom inc., Rivière-du-Loup, QC; ²Les tourbières Lambert inc., Rivière-Ouelle, QC; ³BP-F, Les tourbières Berger ltée, Saint-Modeste, QC; ⁴BP-P, Les tourbières Berger ltée, Saint-Modeste, QC; ⁵non-tamisée.

(2008-2009) ont été confectionnés à partir de tourbes préalablement tamisées pour séparer les particules de dimension inférieure à 0,5 mm des particules plus grossières. Chaque substrat fut confectionné à quatre reprises (une fois pour chacun des blocs du dispositif expérimental) et mélangé manuellement jusqu'à ce que la texture soit uniforme. L'empotage des récipients a été fait à la main et ceux-ci ont été légèrement frappés contre le sol lors de leur remplissage afin d'éliminer les discontinuités dans le mélange. Contrairement aux substrats de la première culture, les tourbes ayant servi à la confection des cinq substrats de la deuxième culture (2009-2010) n'ont pas été tamisées et un agent mouillant horticole fut utilisé pour humecter les mélanges (Aqua-Gro G; Scotts, Marysville, Ohio, États-Unis; 100 ml m⁻³ de substrat). Les récipients ont été arrosés après l'empotage, puis frappés contre le sol afin d'homogénéiser la masse volumique apparente des différents substrats (CPVQ 1997). Le substrat de la pépinière Pampev Inc. était composé de tourbe blonde professionnelle (Berger, BP-P) et de vermiculite et présentait une composition similaire en 2008 et 2009 (Tableau 1). Ce substrat fut préparé à l'aide d'un mélangeur à vis et les récipients ont été empotés mécaniquement.

Les cultures des dispositifs, d'une durée de deux ans chacun, ont débuté respectivement le 12 mai 2008 et le 27 mai 2009. Tous les récipients ($n = 12$ et 28 par substrat en 2008 et 2009, respectivement) furent ensemencés mécaniquement à la pépinière puis recouverts d'une couche de silice. Les semences utilisées pour les deux cultures provenaient du même verger à graines (provenance EPB-V2-PBE-1-0; lot dominant 2006-027-1-1). Les différents substrats ont ensuite été agencés en quatre blocs aléatoires complets et protégés des effets de bordure par une zone tampon. Les plants des deux essais ont été cultivés selon les méthodes usuelles : sous un tunnel de polyéthylène (sans chauffage ni éclairage artificiel) au cours de la première saison de croissance et à l'extérieur durant la seconde année.

Les irrigations furent appliquées à l'aide d'un robot mobile sous tunnel et d'asperseurs rotatifs à l'extérieur, en fonction des besoins en eau des plants (régie établie par le pépiniériste) et de façon identique pour tous les substrats d'une même culture. Des irrigations d'appoint ont été apportées à tous les substrats au cours de l'été 2008 pour éviter que la teneur en eau des substrats les plus drainants soit inférieure à 30% v v⁻¹. De plus, afin d'obtenir une irrigation plus uniforme, un robot mobile fut utilisé pour irriguer les plants de la deuxième culture lorsque ceux-ci étaient à l'extérieur (mai à octobre 2010). La régie

de fertilisation utilisée au cours de cette étude fut établie par le pépiniériste conformément aux normes et connaissances acquises pour la production des PFD d'épinette blanche. La température et la tension matricielle dans les substrats ont été suivies de façon continue à l'aide de thermocouples et de tensiomètres insérés à mi-hauteur des récipients (6 cm) et reliés à un système d'acquisition de données. Les principales variables environnementales (humidité relative, température de l'air, précipitations, intensité lumineuse) furent également mesurées à l'extérieur et sous tunnel.

Les propriétés physiques des substrats S1 à S13 (texture, diamètre moyen des particules, masse volumique apparente, capacité de rétention en eau, conductivité hydraulique saturée, porosité d'air, tortuosité des pores et diffusivité relative des gaz) ont été évaluées au début et à la fin de chacune des deux saisons de croissance. Les mesures ont été effectuées sur trois cavités d'un même récipient par substrat par bloc selon les procédures décrites par le CPVQ (1997) et par CARON *et al.* (2005, 2010). La hauteur, le diamètre au collet, les masses sèches des parties aériennes et racinaires, ainsi que la concentration en N, P, K, Ca et Mg dans les racines, les tiges et les aiguilles des plants ont également été évalués à la fin de chaque saison de croissance. Neuf plants (1+0) et douze plants (2+0) ont été sélectionnés aléatoirement par substrat et par bloc pour réaliser ces mesures. Le taux de rejet des plants dû à l'insuffisance racinaire a été évalué le 30 octobre 2009 et le 22 octobre 2010 par un inspecteur du ministère des Ressources naturelles et de la Faune (MRNF) sans recourir à un tri. La capacité de croissance des racines a été évaluée après 28 jours de croissance en conditions contrôlées sur les plants (2+0) issus des substrats du premier essai seulement ($n = 20$ plants par substrat; pots de 3,8 litres contenant de la tourbe tout usage BM1 de Berger ltée).

Les analyses statistiques ont été effectuées en utilisant la procédure GLM de SAS (v9.2, SAS Institute, Cary, C.N., États-Unis). Un test de PPDS (plus petite différence significative) protégé a été utilisé pour comparer les propriétés physiques des différents substrats, les variables de croissance et les concentrations en éléments minéraux. Les hypothèses de normalité et d'homogénéité des variances ont été vérifiées et certaines variables ont dû être transformées (logarithme, racine carrée). Les relations entre les propriétés physiques et les variables de croissance des plants ont aussi été mises en évidence à l'aide de régressions multiples par étapes. La normalité des résidus fut alors vérifiée visuellement.

Résultats et discussion

L'ajout de vermiculite ou de particules fines ou humifiées de tourbe à la tourbe blonde professionnelle a modifié plusieurs propriétés physiques du substrat (Tableau 2). La masse volumique initiale des substrats de la culture 2008-2009 (excepté S7) était inférieure à celle des substrats du deuxième essai et à la valeur recommandée ($0,1 \text{ g cm}^{-3}$) pour la production de plants résineux en récipient. Toutefois, la porosité d'air, la diffusivité relative des gaz et l'efficacité porale des substrats S1-S7 suggèrent que ces mélanges étaient, en début de culture, moins propices à l'asphyxie racinaire que ceux de la seconde production.

Les propriétés physiques des différents substrats ont cependant évolué au cours de l'étude (Figure 1). En effet, la masse volumique apparente a augmenté en moyenne de 20 % durant les deux années de production, une hausse qui fut similaire lors des deux essais en pépinière. Parallèlement, une diminution importante ($\sim 33 \%$) de la porosité d'air fut observée chez tous les substrats, à l'exclusion de S4 et S6. Nous avons également noté une nette amélioration de la diffusivité relative des gaz, en particulier dans les substrats de la deuxième culture où les conditions initiales limitaient considérablement le transport des gaz (Figure 1). Cette variation des propriétés d'aération et de rétention en eau des substrats est principalement attribuable à la décomposition et à la compaction de la tourbe, ainsi qu'à la croissance des racines. Une diminution du diamètre moyen des particules observée en fin de culture chez la plupart des substrats corrobore en partie cette explication.

Les meilleures croissances racinaires des plants (2+0) ont été observées chez les substrats dont le coefficient de diffusivité relative des gaz se situait entre $0,005$ et $0,015 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1} / \text{m}^2 \text{ s}^{-1}$ (Figure 2) et dont la masse volumique apparente se trouvait entre $0,10$ et $0,11 \text{ g cm}^{-3}$. Ces valeurs permettraient ainsi un compromis approprié entre les mouvements d'eau et de gaz dans les substrats. Une augmentation de la perméabilité des substrats a engendré une meilleure porosité d'air (c'est-à-dire une proportion plus élevée de macropores : Figure 1, S1-S7), mais peut également entraîner une perte de croissance des racines et des parties aériennes des plants lorsque la fréquence d'irrigation n'est pas pleinement ajustée. Les propriétés physiques du substrat initial ont significativement influencé la masse racinaire des plants (2+0) ainsi que la croissance de nouvelles racines après la mise en terre dans des pots en conditions contrôlées (Figure 3). L'évaluation de la masse sèche des nouvelles racines après transplantation a toutefois révélé un effet des substrats différent de celui observé sur la masse racinaire des plants (2+0) alors que le substrat S7 était le plus performant. La masse sèche des nouvelles racines 28 jours après plantation était 15 %, 32 % et 22 % plus élevée chez les substrats S1, S4 et S7 respectivement que la moyenne des substrats S2, S3, S5 et S6 (Figure 3). Étonnamment, le taux d'insuffisance racinaire des plants (2+0) était inférieur à 4 % pour la plupart des substrats du premier dispositif, à l'exception des substrats S1 et S2 (taux de rejet de 20 % et 11 %, respectivement) (Tableau 3).

Tableau 2. Propriétés physiques initiales des substrats confectionnés pour les productions 2008-2009 (S1 à S7) et 2009-2010 (S8 à S13) de plants d'épinette blanche de fortes dimensions

Substrat	Masse volumique apparente (g cm^{-3})	Porosité d'air ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$)	Conductivité hydraulique saturée (cm s^{-1})	Coefficient d'efficacité porale (m m^{-1})	Diffusivité relative des gaz ($\text{m}^2 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ s}$)
S1	0,064 <i>h[†]</i>	0,253 <i>a</i>	0,459 <i>a</i>	0,142 <i>ab</i>	0,035 <i>a</i>
S2	0,069 <i>gh</i>	0,254 <i>a</i>	0,370 <i>ab</i>	0,091 <i>bcd</i>	0,021 <i>bc</i>
S3	0,072 <i>g</i>	0,228 <i>a</i>	0,259 <i>c</i>	0,063 <i>cde</i>	0,014 <i>cd</i>
S4	0,084 <i>f</i>	0,132 <i>b</i>	0,073 <i>d</i>	0,115 <i>bc</i>	0,014 <i>cd</i>
S5	0,081 <i>f</i>	0,258 <i>a</i>	0,308 <i>bc</i>	0,010 <i>bc</i>	0,024 <i>b</i>
S6	0,086 <i>ef</i>	0,217 <i>a</i>	0,390 <i>ab</i>	0,133 <i>ab</i>	0,027 <i>b</i>
S7	0,105 <i>b</i>	0,109 <i>bc</i>	0,031 <i>d</i>	0,105 <i>bc</i>	0,012 <i>cd</i>
S8	0,106 <i>b</i>	0,060 <i>de</i>	0,039 <i>d</i>	0,026 <i>e</i>	0,002 <i>e</i>
S9	0,091 <i>de</i>	0,109 <i>bc</i>	0,054 <i>d</i>	0,011 <i>e</i>	0,002 <i>e</i>
S10	0,099 <i>cd</i>	0,070 <i>cde</i>	0,047 <i>d</i>	0,035 <i>e</i>	0,002 <i>e</i>
S11	0,107 <i>b</i>	0,043 <i>de</i>	0,026 <i>d</i>	0,042 <i>de</i>	0,001 <i>e</i>
S12	0,114 <i>a</i>	0,037 <i>e</i>	0,016 <i>d</i>	0,037 <i>de</i>	0,001 <i>e</i>
S13	0,099 <i>c</i>	0,090 <i>bcd</i>	0,072 <i>d</i>	0,176 <i>a</i>	0,007 <i>de</i>

[†]Les valeurs d'une même colonne présentant une lettre similaire ne sont pas significativement différentes selon un test de PPDS (plus petite différence significative; $P < 0,05$).

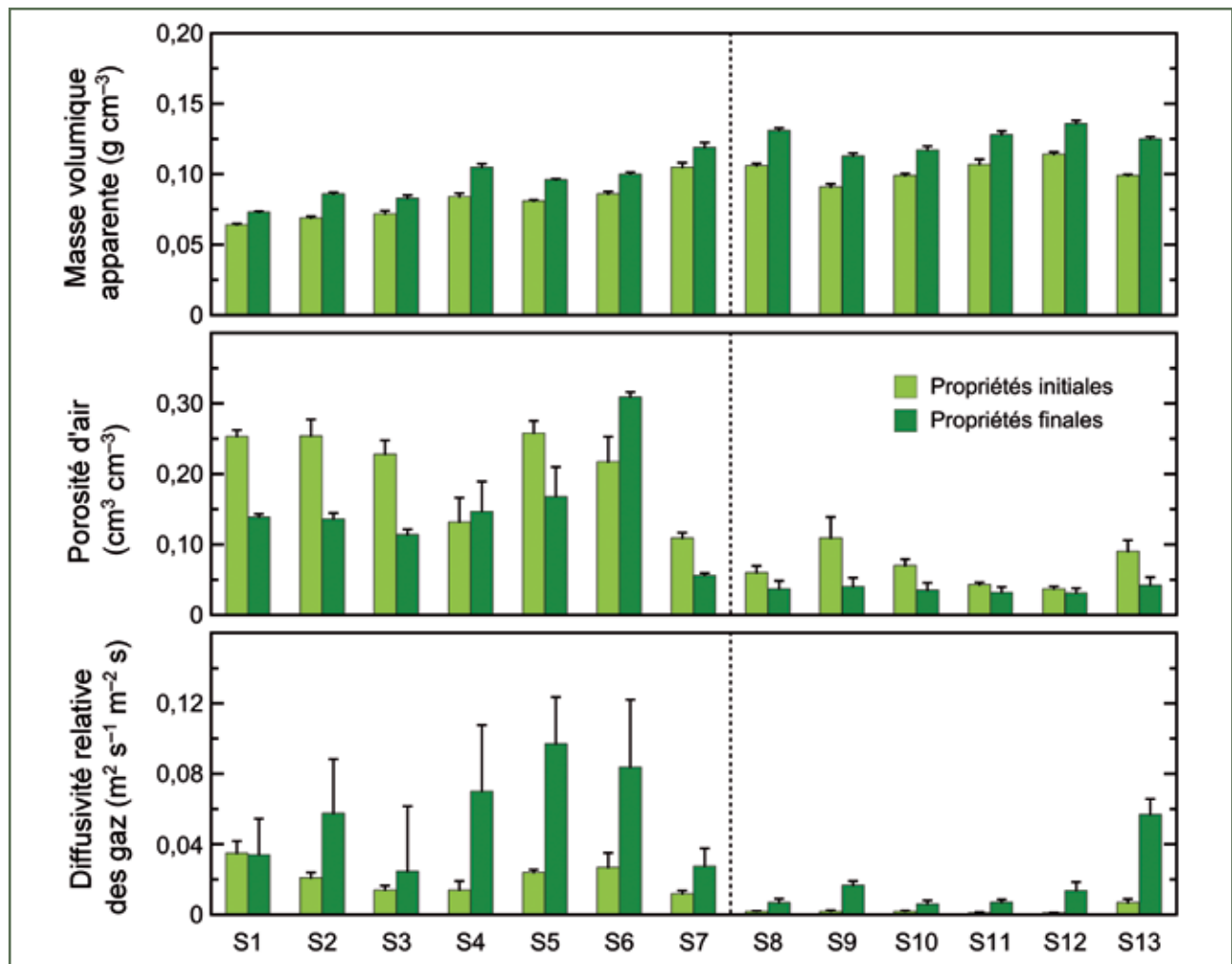


Figure 1. Masse volumique apparente (ρ_b), porosité d'air (θ_a) et diffusivité relative des gaz ($D_s D_o^{-1}$) des différents substrats au début et à la fin des productions 2008-2009 (S1 à S7) et 2009-2010 (S8 à S13) de plants d'épinette blanche de fortes dimensions en récipients 25-310.

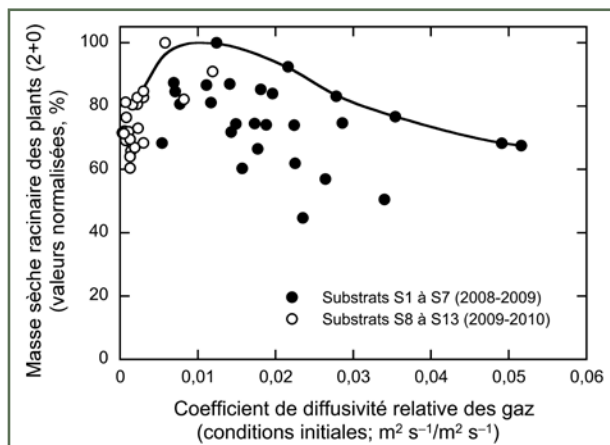


Figure 2. Relation entre la masse sèche racinaire des plants d'épinette blanche (2+0) et le coefficient de diffusivité relative des gaz ($D_s D_o^{-1}$) chez les différents substrats en début de culture. Une analyse des points contours (ligne courbe) indique la zone optimale de $D_s D_o^{-1}$ pour la croissance racinaire.

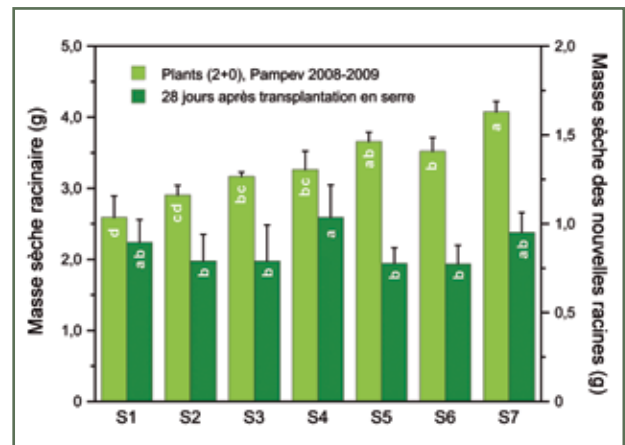


Figure 3. Masse sèche racinaire des plants (2+0) provenant de la production 2008-2009 chez Pampev (substrats S1 à S7) et masse sèche des nouvelles racines présentes à l'extérieur de la carotte 28 jours après transplantation des plants (2+0) en conditions contrôlées.

Chez les substrats ayant une faible perméabilité et porosité d'air (deuxième culture), une forte corrélation positive a été observée entre l'efficacité porale (un indice de la tortuosité des pores) et les masses sèches des parties aériennes et des racines. Toutefois, aucune relation significative ne fut observée entre la masse sèche racinaire des plants (2+0) du deuxième essai et le critère d'insuffisance racinaire, ce qui laisse supposer un rôle important de la cohésion, laquelle serait probablement favorisée par la présence de symbioses mycorhiziennes, la composition du substrat et la teneur en eau de la tourbe au moment de l'évaluation. Le taux d'insuffisance racinaire des plants (2+0) se situait, dans ce cas-ci, entre 9 % et 30 %, et seuls les plants issus du substrat S8 étaient conformes, avant tri, aux critères du MRNF (Tableau 3). Par ailleurs, un examen du statut nutritionnel des plants à l'aide d'analyses vectorielles (HAASE et ROSE 1995) a montré que, outre une augmentation de la capacité de rétention en eau dans les substrats, la présence de vermiculite permet d'améliorer le statut nutritif en magnésium des PFD d'épinette blanche.

Conclusion

Les propriétés physiques influençant la disponibilité de l'eau et l'aération des substrats ont été identifiées comme les plus importantes pour la croissance racinaire chez l'épinette blanche. Selon les résultats de cette étude, il serait judicieux d'utiliser des substrats ayant une masse volumique apparente entre 0,10 et 0,11 g cm⁻³ et dont le coefficient de diffusivité relative des gaz se situe entre 0,005 et 0,015 m² s⁻¹/m² s⁻¹. Ceci permettra d'améliorer la croissance des racines des

PFD d'épinette blanche et de réduire le taux d'insuffisance racinaire. Ces résultats démontrent également que la tourbe blonde et la tourbe brune peuvent être utilisées dans la confection d'un substrat qui possède les propriétés physiques recommandées, puisque la distribution relative du diamètre des particules (granulométrie) a une plus grande influence sur la disponibilité de l'eau et de l'oxygène dans le substrat que le degré d'humification de la tourbe.

Références

- ALLAIRE, S., J. CARON, I. DUCHESNE, L.E. PARENT et J.A. RIOUX, 1996. *Air-filled porosity, gas relative diffusivity and tortuosity: indices of *Prunus x cistena* growth in peat substrate*. J. Am. Soc. Hort. Sci. 121 : 236-242.
- BERNIER, P.Y. et A. GONZALEZ, 1995. *Effects of the physical properties of Sphagnum peat on the nursery growth of containerized Picea mariana and Picea glauca seedlings*. Scand. J. For. Res. 10 : 176-183.
- BOUDREAU, S., 2010. *Effets des propriétés physiques et chimiques des substrats sur la croissance et le développement de plants d'épinette blanche en récipient après une saison de culture*. Mémoire de maîtrise. Faculté des sciences de l'agriculture et de l'alimentation, Université Laval, Québec. 80 p.
- CARON, J. et N.V. NKONGOLO, 2004. *Assessing gas diffusion coefficients in growing media from in situ water flow and storage measurements*. Vadose Zone J. 3 : 300-311.
- CARON, J. et L.M. RIVIÈRE, 2003. *Quality of peat substrates for plants grown in containers*. Dans L.E. Parent et P. Ilnicki, éditeurs. Organic soils and peat materials for sustainable agriculture. Boca Raton CRC Press LLC, Florida. p. 67-93.
- CARON, J., P. MOREL et L.M. RIVIÈRE, 2001. *Aeration in growing media containing large particles*. Acta Hort. 548 : 229-234.

Tableau 3. Taux de rejet des plants d'épinette blanche de fortes dimensions pour les productions 2008-2009 (S1 à S7) et 2009-2010 (S8 à S13)

Substrat	Taux de rejet (%) en fonction des critères suivants			
	Hauteur (H) [†]	Diamètre (D) [†]	Ratio H/D [†]	Insuffisance racinaire [§]
S1	33	13	0	20
S2	6	2	0	11
S3	0	2	0	3
S4	0	2	0	4
S5	4	2	0	2
S6	4	4	0	4
S7	4	0	0	4
S8	2	4	0	9
S9	8	2	0	30
S10	4	0	0	15
S11	4	0	0	15
S12	6	2	0	14
S13	2	0	0	11

[†]n = 48 plants ont été mesurés; [§]n = 125 à 150 plants furent évalués.

CARON, J., L.M. RIVIÈRE et G. GUILLEMAIN, 2005. *Gas diffusion and air-filled porosity: Effect of some oversize fragments in growing media*. Can. J. Soil Sci. 85 : 57-65.

CARON, J., P. MOREL, L.M. RIVIÈRE et G. GUILLEMAIN, 2010. *Identifying appropriate methodology to diagnose aeration limitations with large peat and bark particles in growing media*. Can. J. Soil Sci. 90 : 481-494.

CPVQ, 1997. *Méthodes d'analyse des sols, des fumiers et des tissus végétaux, 2^e mise à jour*. Conseil des productions végétales du Québec. Québec. 74 p.

DGPSP, 2009. *Inventaire de qualification des plants résineux cultivés en récipients*. Direction générale des pépinières et des stations piscicoles, MRNF. 141 p.

FOLK, R.S., V.R. TIMMER et J.B. SCARRATT, 1992. *Evaluating peat as a growing medium for jack pine seedlings. 1. Conventional quality indices*. Can. J. For. Res. 22 : 945-949.

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 et de la Faune, Forêt Québec, Direction de la recherche forestière. Note de recherche forestière n° 111. 8 p.

HAMANN, J., 2003. *Mission tourbières : les tourbières à l'état naturel se font de plus en plus rares car elles sont largement exploitées*. Contact 17.

HAASE, D.L. et R. ROSE, 1995. *Vector analysis and its use for interpreting plant nutrient shifts in response to silvicultural treatments*. For. Sci. 41 : 54-66.

HEISKANEN, J., 1993. *Favourable water and aeration conditions for growth media used in containerized tree seedling production: a review*. Scan. J. For. Res. 8 : 337-358.

HEISKANEN, J., 1995a. *Irrigation regime affects water and aeration conditions in peat growth medium and the growth of containerized Scots pine seedlings*. New Forests 9 : 181-195.

HEISKANEN, J., 1995b. *Physical properties of two-component growth media based on Sphagnum peat and their implications for plant-available water and aeration*. Plant and Soil 172 : 45-54.

LAMHAMED, 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 : 1968-1980.

LAMHAMED, 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 : 108-120.

LANDIS, T.D., R.W. TINUS et J.P. BARNETT, 1989. *Containers and growing media. Vol 2. The container tree nursery manual*. Agric. Handbook, 674. USDA Forest Service, Washington, DC.

NAASZ, R., J. CARON, J. LEGAULT et A. PICHETTE, 2009. *Efficiency factors for bark substrates: biostability, aeration, or phytotoxicity*. Soil Sci. Soc. Am. J. 73 : 780-791.

L'utilisation des toiles claires peut-elle augmenter la croissance des racines des plants d'épinette blanche (1+0) en pépinière forestière ?

Mohammed S. Lamhamedi^{1,2}, Mario Renaud¹, Pascal Desjardins¹ et Linda Veilleux¹



Mohammed S. Lamhamedi a obtenu son diplôme d'agronomie générale à l'Institut agronomique et vétérinaire Hassan II (IAV Hassan II) du Maroc en 1983. En 1985, ce même établissement lui décernait le diplôme d'ingénieur agronome d'État spécialisé en sciences forestières (M. Sc.). En 1991, l'Université Laval (Québec, Canada) lui décerne son doctorat en sciences forestières (Ph.D.). Après avoir été enseignant-chercheur en écophysiologie et en

plantations forestières à l'IAV Hassan II de 1986 à 1991, il effectue un stage postdoctoral à l'Institut de recherche en biologie végétale de l'Université de Montréal. Il devient ensuite chercheur visiteur au Centre de foresterie des Laurentides du Service canadien des forêts en 1993-1995, puis en 1996-1997, directeur scientifique dans le cadre du projet d'installation de pépinières modernes financé par la Banque mondiale en Tunisie [Pamtev Internationale - Direction générale des forêts, Tunisie]. De plus, M. Lamhamedi a été attaché de recherche au Centre de recherche en biologie forestière (Université Laval) en 1998-1999. En 1999, M. Lamhamedi est devenu membre de l'Ordre des ingénieurs forestiers du Québec (OIFQ) après avoir complété la formation universitaire en sciences forestières exigée par cet ordre. Chercheur émérite à la Direction de la recherche forestière du ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec depuis juin 1999, il est aussi chercheur associé au Centre d'étude de la forêt (CEF) et professeur associé à la Faculté de foresterie, de géographie et de géomatique, de même qu'à la Faculté des sciences de l'agriculture et de l'alimentation de l'Université Laval. Il agit à titre de rédacteur adjoint à la revue canadienne de recherche forestière depuis janvier 2006 et de membre permanent du comité de lecture de la revue *Nature et Technologie* depuis novembre 2010. Il est l'auteur de plusieurs publications scientifiques et techniques, et dirige ou codirige des étudiants diplômés à la maîtrise et au doctorat. Son expertise porte sur l'optimisation des régies de culture, la conception des standards de tolérance au gel des plants dans les pépinières forestières, la variabilité clonale des feuillus et des résineux, l'embryogenèse somatique des conifères, le bouturage des feuillus et des résineux et la production de plants dans les pépinières forestières. M. Lamhamedi s'occupe également de transfert d'expertise, de connaissances et de savoir-faire auprès des 21 pépinières forestières (6 gouvernementales et 15 privées) du Québec. De plus, sa participation à différents projets de modernisation des pépinières forestières et de lutte contre l'ensablement dans des pays en développement (Tunisie, Ghana, Nicaragua, Maroc, etc.) lui a valu une renommée mondiale pour l'adaptation de l'expertise québécoise et canadienne à la production de plants.

Introduction

Avant leur mise en terre, les plants produits dans les pépinières forestières du Québec, en moyenne entre 150 et 160 millions annuellement, sont assujettis à une évaluation de la qualité selon une série de critères et normes morpho-physiologique spécifiques aux plants forestiers. Parmi ces critères, à chaque année, l'insuffisance racinaire contribue à un rejet important de plants. Pour diminuer les rejets des plants produits selon différentes modalités (essence, semences, boutures, récipient, volume de la cavité, âge à la livraison, etc.) et améliorer la croissance des racines lors des différents stades de développement en pépinière forestière, plusieurs techniques culturales ont été optimisées et ajustées, à l'échelle opérationnelle, pour améliorer la croissance et la cohésion des racines. Citons notamment, le récipient, les propriétés physico-chimiques des substrats, la date d'ensemencement, le traitement de jours courts, l'imposition d'un stress hydrique, ainsi que l'optimisation des régies d'irrigation et de fertilisation^{3-5, 7-8, 10-14}.

Nos récents travaux ont démontré l'existence de différences très marquées, durant la saison de croissance, entre les besoins en eau, par exemple, des plants d'épinette blanche et d'épinette noire^{2, 11, 12, 21}. Ainsi, l'optimisation des teneurs en eau du substrat et de sa fertilité selon les stades de croissance contribue de façon significative à améliorer la croissance et l'architecture des racines de ces deux essences. Lors de la deuxième saison de croissance des plants à l'extérieur, c'est-à-dire en absence de tunnel et où les plants sont soumis aux conditions environnementales naturelles, la fréquence des sécheresses épisodiques en été, même de courtes durées, contribue à augmenter la mortalité des racines blanches et retarder de façon significative l'initiation de nouvelles racines^{6, 9}.

Pour l'épinette blanche, afin de favoriser significativement l'allocation du carbone, nécessaire à la croissance des racines, nous proposons une technique culturale simple et à la portée du pépiniériste. Notre approche consiste, lors de la première année en tunnel, à augmenter l'intensité de la lumière dès le début de l'aoûtement, ou lorsque les plants ont atteint la hauteur ciblée par le pépiniériste. En effet, la durée, l'intensité et la qualité de la lumière ont un effet direct sur la croissance et le développement des

¹ Direction de la recherche forestière, ministère des Ressources naturelles et de la Faune, 2700 rue Einstein, Québec (Québec) G1P 3W8, Canada

² mohammed.lamhamedi@mrfn.gouv.qc.ca

³ 418 643 7994 poste 6553

Lamhamedi, M.S., M. Renaud, P. Desjardins, L. Veilleux, 2011. *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.; Lamhamedi, M.S. (éds.), 2011. Production de plants forestiers au Québec : la culture de l'innovation. Colloque de transfert de connaissances et de savoir-faire. Carrefour Forêt Innovations, 4-6 octobre 2011, Québec (Canada), 140 p. pp : 87 - 95.

plants, notamment sur les variables des échanges gazeux, la régulation de l'ouverture et la fermeture des stomates, et la translocation des produits de la photosynthèse vers les racines, surtout après l'arrêt de croissance en hauteur^{1, 20, 23}.

Des travaux antérieurs ont porté sur les effets de la qualité et de l'intensité de lumière générées par les lampes à halogène et au sodium à haute pression en serre sur la croissance, la déformation des tiges et l'allocation du carbone chez les plants d'épinette noire¹⁵. Cependant, la croissance des racines serait fortement influencée, non seulement par la durée, l'intensité et la qualité de la lumière, mais par la sommation ou l'intégrale des variations journalières de l'intensité de lumière (I_n) (400-700 nm) sous tunnel. Cette (I_n) reçue par les plants, tout au long de la saison de croissance, est fortement corrélée aux caractéristiques optiques de la toile du tunnel.

À cet effet, nous émettons l'hypothèse que des modifications des propriétés optiques du tunnel (toile ombragée de couleur blanche) non chauffé, couramment utilisé dans les pépinières forestières du Québec, vers la fin de la saison de croissance (début août) permettront d'augmenter la sommation des variations journalières de l'intensité de lumière reçue par les plants, ainsi que l'allocation des produits de la photosynthèse vers les racines.

L'originalité de cette approche proposée dans ce projet consiste à remplacer la toile ombragée par une toile claire dès le début du mois d'août. Ceci permet d'augmenter la durée d'exposition et l'intensité de lumière transmise dans l'environnement immédiat des plants durant la période d'endurcissement des plants (août-octobre). À notre connaissance, jusqu'à présent, aucun travail n'a été effectué, à une échelle opérationnelle, quant à l'évaluation des effets de l'(I_n) sur la cinétique de croissance des racines et la quantification de l'allocation de la matière sèche ou du carbone vers les racines des plants de l'épinette blanche (1+0) produits sous tunnel.

Objectifs généraux

- i) Vérifier l'hypothèse que l'augmentation des variations journalières de l'intensité de lumière (I_n) engendrée par une succession de toiles [ombragée-claire : OC] est supérieure à celle de la succession [ombragée-ombragée OO] et qu'elle confère une meilleure croissance des racines aux plants d'épinette blanche (1+0);
- ii) Quantifier, à l'aide de modèles allométriques de croissance, les effets des deux successions de toiles [OO et OC], sur les patrons d'allocation du carbone entre les racines et les parties aériennes.

Méthodologie

Production de plants et installation du dispositif expérimental

Le dispositif de ce projet a été installé à une échelle opérationnelle dans des tunnels de la production régulière de l'épinette blanche (1+0) de la pépinière privée Somival Inc. (Lac-au-Saumon, latitude : 48° 24' 30" N.; longitude : 67° 17' 35" O). L'ensemencement des graines d'épinette blanche (source de semences : EPB-V1-EST-1-0) et la mise en place des récipients dans les tunnels ont été effectués au début du mois de mai 2007. Les cavités du récipient 25-310 (IPL, Saint-Damien, Québec, Canada; 25 cavités, 310 cm³/cavité) ont été remplies d'un substrat constitué de tourbe (84 %), de perlite (8 %) et de vermiculite (8 %). La densité moyenne d'empotage du substrat est de 0,09 g/cm³. Par la suite, les récipients ont été installés dans quatre tunnels. Ainsi, pour augmenter l'intensité de lumière (I_n) reçue par les plants d'épinette blanche tout au long de la phase d'endurcissement, une succession de deux combinaisons de toiles (OO et OC) sera évaluée à l'aide d'un dispositif en quatre blocs aléatoires. Chaque bloc sera constitué d'un tunnel qui sera subdivisé en deux parties. Les plants de chaque partie (moitié du tunnel) seront soumis de façon aléatoire à une des deux combinaisons de toiles. Ainsi, la toile ombragée de couleur blanche, couramment utilisée dans les pépinières forestières du Québec, sera utilisée lors des phases de germination, de croissance active et d'endurcissement (mai-octobre) alors que la toile claire, spécifique à la succession « ombragée-claire », ne sera installée que lors de la phase d'endurcissement (début d'août – fin octobre).

Les quantités d'azote, de phosphore et de potassium appliquées tout au long de la saison de croissance (7 juin – 27 septembre 2007) ont respectivement atteint 107, 26 et 82 mg/plant. La solution fertilisante utilisée contenait également les éléments minéraux secondaires et les oligo-éléments.

Variables environnementales, intégrale des variations journalières de la lumière et irrigation

Pour l'évaluation des variables environnementales, plusieurs sondes branchées à un système d'acquisition de données (modèle CR10X, Campbell Scientific, Edmonton, Alberta, Canada) ont été utilisées pour enregistrer de façon continue, dans chacun des deux traitements (OO et OC), la température du substrat (2 sondes/ traitement), la température à la surface de la silice (2 sondes/ traitement; modèle 107B, Campbell Scientific, Edmonton, Alberta, Canada) et l'intensité de lumière (3 quantum/ traite-

ment; modèle LI-190SB Quantum, LI-COR, Lincoln, Nebraska, États-Unis). Pour cette dernière variable, les sondes de lumière ont été installées dans des récipients non ensemencés, c'est-à-dire en absence de plants d'épinette blanche, afin d'éviter l'atténuation de la lumière par les parties aériennes des plants. La température et l'humidité relative de l'air ont été enregistrées à l'aide d'une sonde/ traitement (modèle HMP35C, Campbell Scientific, Edmonton, Alberta, Canada), dans la section centrale de chaque traitement, à l'intérieur du tunnel à 2 m au-dessus du sol et également à l'extérieur des tunnels.

Ces différentes variables ont été enregistrées de façon continue à chaque 5 min à l'aide du système d'acquisition de données tout en calculant la moyenne de chaque variable environnementale à chaque heure.

Pour déterminer les quantités d'eau reçues par les plants lors des irrigations tout au long de la saison de croissance, deux pluviomètres ont été installés de façon aléatoire dans chacun des deux traitements. Pour le contrôle de l'irrigation, l'évaluation des teneurs en eau a été effectuée par gravimétrie en utilisant huit récipients/traitement. Ces récipients ont été choisis aléatoirement dans des endroits représentatifs des conditions de croissance.

L'intégrale ou la sommation des variations journalières de l'intensité de lumière (I_n ; $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) à la hauteur des plants sera calculée en utilisant les données enregistrées pendant la durée de croissance des plants, de façon continue, par chacune des sondes d'enregistrement de lumière. L'intégrale ou la sommation exprime l'aire sous la courbe des variations des moyennes journalières de l'intensité de lumière (I) et elle a été calculée comme suit :

$$I_n = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{I_i + I_{i+1}}{2} (j_{i+1} - j_i)$$

I_i : moyenne de l'intensité de lumière journalière qui correspond au $i^{\text{ème}}$ jour;

j_i : jour i où l'intensité de lumière a été mesurée.

La notion d'intégrale a été utilisée pour mieux cerner l'effet de la photosynthèse, le statut hydrique du plant et les effets des variations des teneurs en eau du substrat sur la croissance des plants en pépinière^{9, 18}.

Évaluation des variables morpho-physiologiques des plants d'épinette blanche (1+0)

Les variables morpho-physiologiques des plants (croissance, nutrition minérale, substrat, etc.) ont été mesurées, tout au long de la saison de croissance, à

l'aide de huit échantillonnages destructifs effectués à chaque deux semaines du 30 juillet au 12 novembre 2007. Les échanges gazeux ainsi que l'élongation maximale des aiguilles ont été mesurés à la fin de la saison de croissance après la formation des bourgeons.

Pour chaque date d'échantillonnage, huit récipients ont été choisis de façon aléatoire et systématique à raison d'un récipient/traitement/bloc avant et après traitement, soit 25 plants/traitement/ bloc. Les variables mesurées englobent la hauteur et le diamètre (25 plants), les masses sèches des parties aériennes et des racines (échantillon composite : 5 plants/échantillon/traitement/bloc), la nutrition minérale des plants (25 plants/échantillon composite/traitement/bloc), la fertilité du substrat (25 carottes/échantillon composite/traitement/bloc; 4 échantillons composites/traitement), la conductivité électrique et le pH du substrat.

Analyses statistiques

Après avoir déterminé les modèles statistiques appropriés, les analyses sont effectuées en utilisant la procédure mixte de la nouvelle version du logiciel SAS. Les variables de croissance ont été ajustées à des modèles logistiques. Par contre, les modèles de l'allocation du carbone entre les parties aériennes et les racines ont été ajustés à des modèles allométriques^{8, 16}. Les comparaisons entre les différents modèles logistiques et allométriques spécifiques aux deux traitements (OO et OC) ont été effectuées en comparant les différents paramètres des modèles générés.

Résultats et discussion

L'enregistrement continu des variables environnementales a montré que l'utilisation de la toile claire à la fin de la saison de croissance n'engendre pas des augmentations hautement significatives de la température de l'air par rapport à celle de la toile ombragée (blanche) couramment utilisée par les pépiniéristes (Figure 1). Cependant, dès la mise en place de la toile claire (30 juillet), les écarts de température entre les deux traitements [OO et OC] à la surface de la silice étaient supérieurs à ceux enregistrés au niveau du substrat et dans l'air du tunnel à 2 m (Figure 1). En effet, les températures moyennes du substrat pour le traitement OO variaient entre 7,8 et 22,6 °C alors que celles du traitement OC variaient entre 7,8 et 24,4 °C. Dès l'installation de la toile claire, l'intensité de lumière journalière reçue par les plants du traitement OC était largement supérieure à celle reçue par les plants du traitement OO (Figure 1). L'intensité de lumière maximale journalière du traitement OC était presque le double de celle du traitement OO (Figure 1).

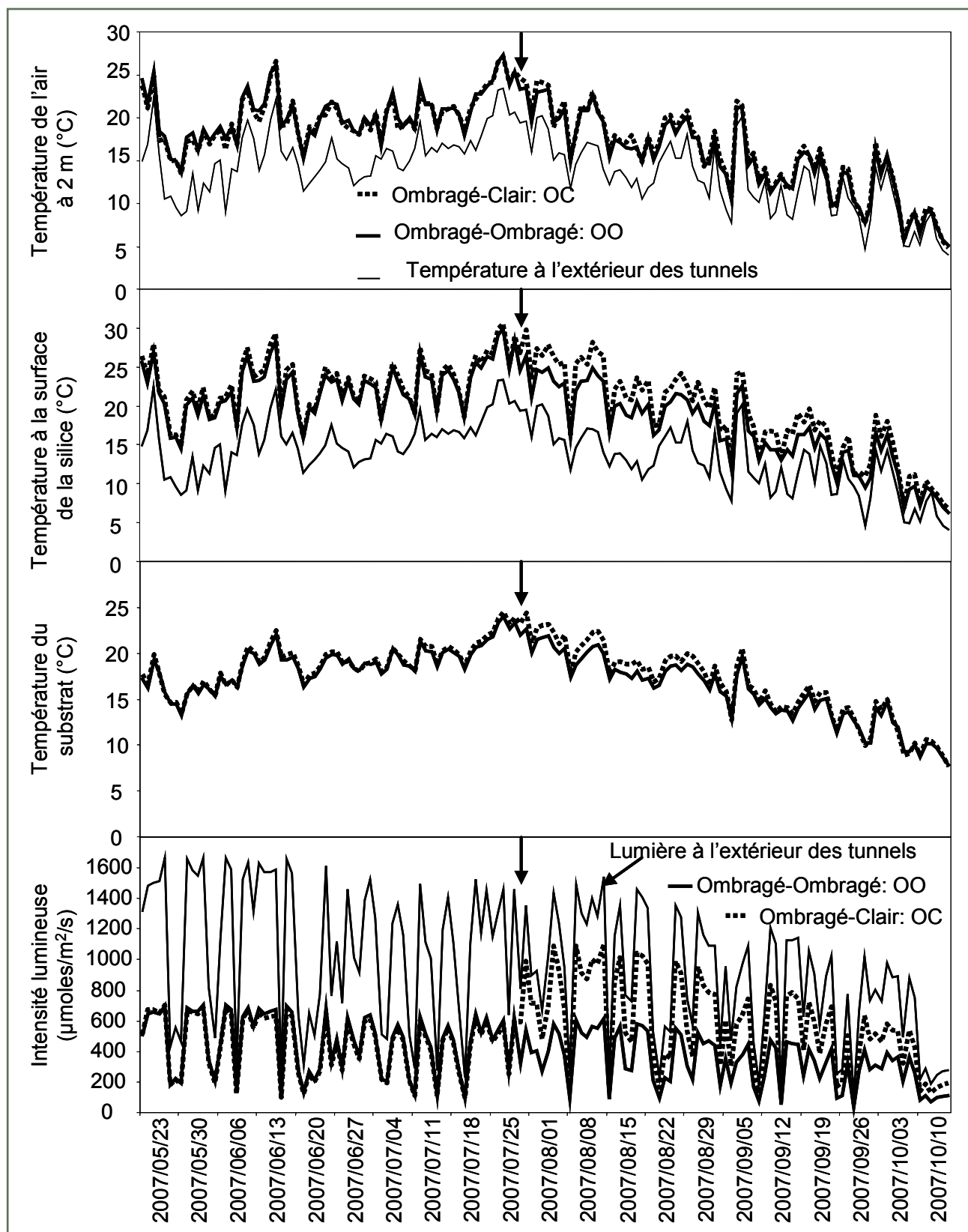


Figure 1. Variations des variables environnementales (températures moyennes de l'air, à la surface de la silice, du substrat et intensité de lumière) selon les traitements lors de la production de plants d'épinette blanche (1+0) sous tunnel. Les flèches droites indiquent la date du changement de la toile ombragée (blanche) par la toile claire.

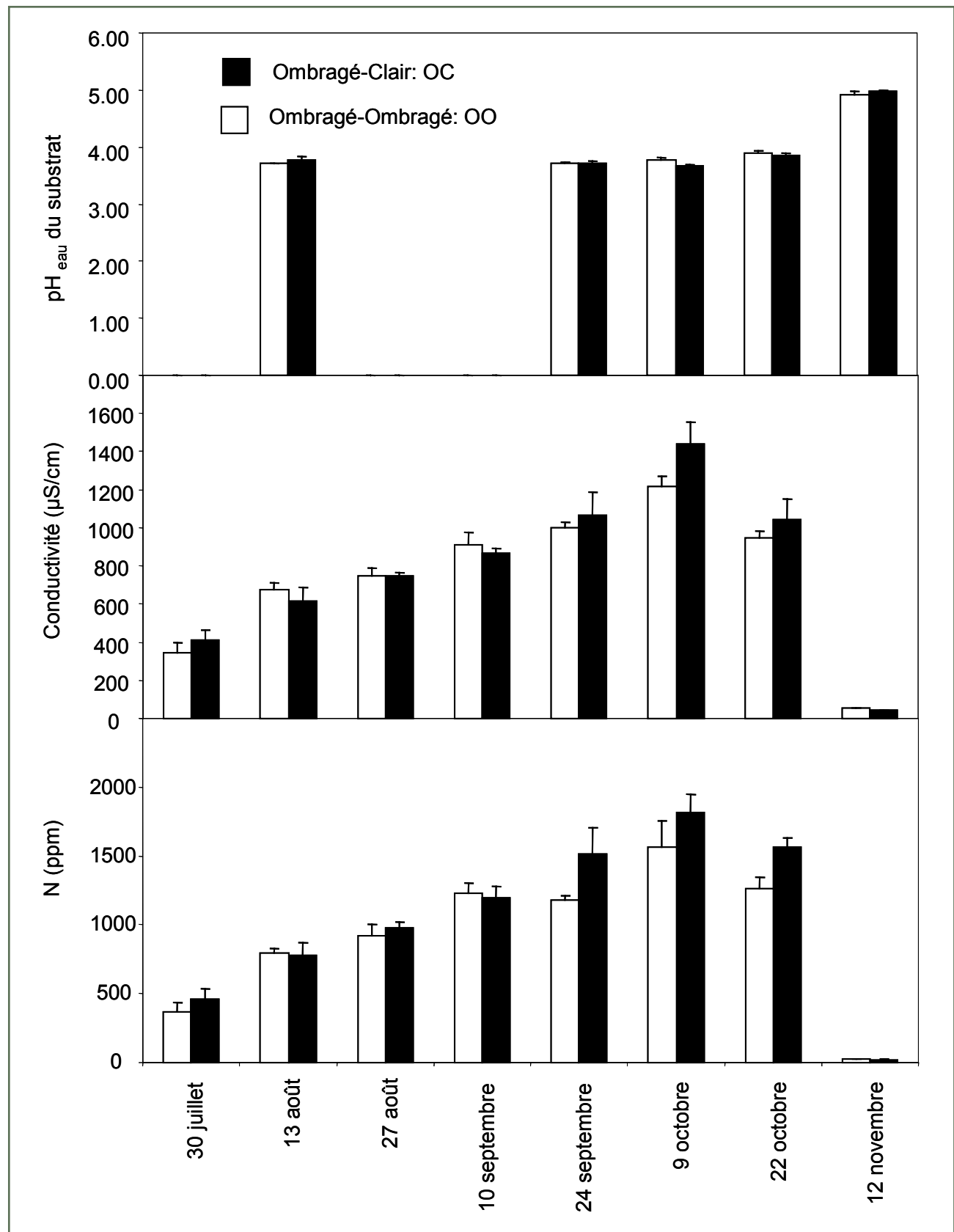


Figure 2. Variations du pH à l'eau, de la conductivité électrique et de la fertilité du substrat (N) tout au long de la saison de croissance des plants d'épinette blanche (1+0) produits sous tunnel selon les deux traitements (ombragé-ombragé : OO et ombragé-clair : OC).

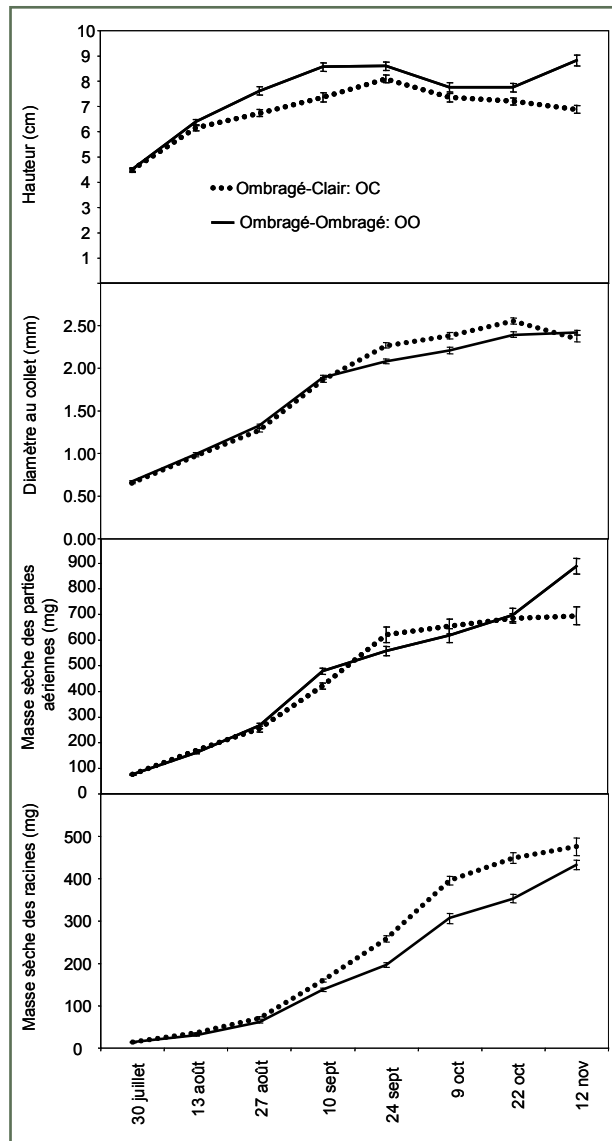


Figure 3. Évolution des variables de croissance (hauteur, diamètre, masse des parties aériennes, masse des racines) des plants d'épinette blanche (1+0) selon les deux traitements (ombragé-ombragé : OO et ombragé-clair : OC).

Le pH à l'eau du substrat pour les deux traitements a varié tout au long de la saison de croissance entre 3,71 et 4,97 alors que la conductivité électrique du substrat a varié entre 20 et 1565 mS/cm (Figure 2). Malgré l'accumulation de sels observée au début du mois d'octobre, la conductivité électrique reste faible par comparaison à la salinité critique (> 2500 mS/cm) qui réduit significativement la croissance des plants²². La fertilité en azote du substrat des deux traitements a varié tout au long de la saison de croissance entre 20 et 1814 ppm. Les valeurs observées du pH, de la conductivité électrique, de la fertilité du substrat et des concentrations en azote des parties aériennes (OO : 2,43 – 2,84 %; OC : 2,48 – 2,90 %) des deux

traitements s'avèrent optimales pour la croissance des plants.

L'augmentation significative de l'intensité de lumière reçue par les plants dans le cas du traitement OC a contribué à augmenter la température à la surface des cavités du récipient (e.g. au niveau de la silice) par comparaison au traitement OO. Cette augmentation de la température a favorisé l'évaporation de l'eau et une baisse des teneurs en eau du substrat du traitement OC par comparaison au traitement OO. En moyenne, après l'installation de la toile claire, les teneurs en eau du substrat du traitement OC étaient inférieures de 5,7 % (v/v) par comparaison au traitement OO durant le mois d'août.

À cet effet, le pépiniériste doit porter une attention particulière à l'évolution des variations des teneurs en eau du substrat et à la gestion de l'irrigation suite à l'utilisation des toiles claires. L'absence d'un contrôle rigoureux de l'irrigation pourra entraîner le dessèchement rapide du substrat et la mortalité des apex des racines blanches surtout pendant les journées très chaudes^{6,9}.

En utilisant toutes les données des huit dates d'échantillonnage, l'analyse de variance a montré que le remplacement de la toile ombragée par la toile claire à la fin de la saison de croissance (août - octobre 2007) a affecté de façon significative la hauteur ($p < 0,0001$) (Figure 3), le rapport hauteur/diamètre ($p < 0,0001$) et la masse sèche des racines ($p < 0,0001$) (Figure 3), mais n'a eu aucun effet significatif sur le diamètre ($p = 0,1875$), la masse sèche des parties aériennes ($p = 0,2610$) et la masse sèche totale ($p = 0,4193$) des plants d'épinette blanche (1+0) (Figure 3). L'interaction date d'échantillonnage x traitement est significative pour la hauteur ($p = 0,0161$) et la masse sèche des racines ($p = 0,0017$). À la fin de la saison, le remplacement de la toile ombragée par la toile claire a permis d'augmenter la masse sèche des racines, en moyenne, de 14 % (Figure 4). Les modèles mathématiques développés pourraient être utilisés et appliqués immédiatement à une échelle opérationnelle, comme standards de croissance, dans le cadre des suivis de culture effectués par les pépiniéristes.

Le maintien de ces intensités lumineuses relativement élevées (traitement OC) après la formation des bourgeons, a probablement contribué à préserver des taux de photosynthèse relativement élevés et à favoriser une allocation accrue du carbone vers les racines. En effet, les modèles allométriques d'allocation du carbone entre les parties aériennes et les racines ont montré que, pour une même masse des parties aériennes, l'allocation du carbone vers les

racines, engendrée par le traitement OC, était significativement supérieure ($p = 0,0009$) à celle du traitement OO (Figure 5). De plus, la masse des racines était fortement corrélée à la sommation ou l'intégrale de l'intensité de lumière (I_n) selon un modèle quadratique. Des travaux ont démontré que le maintien d'intensité de lumière ($> 45\%$ de la lumière natu-

relle) pendant neuf ans a affecté de façon positive la croissance des plants d'épinette blanche par rapport aux intensités de lumière relativement faibles (15% et 25%)¹⁷. L'intégrale de la lumière commence à être utilisée pour optimiser la croissance des plants de différentes espèces en horticulture¹⁹.

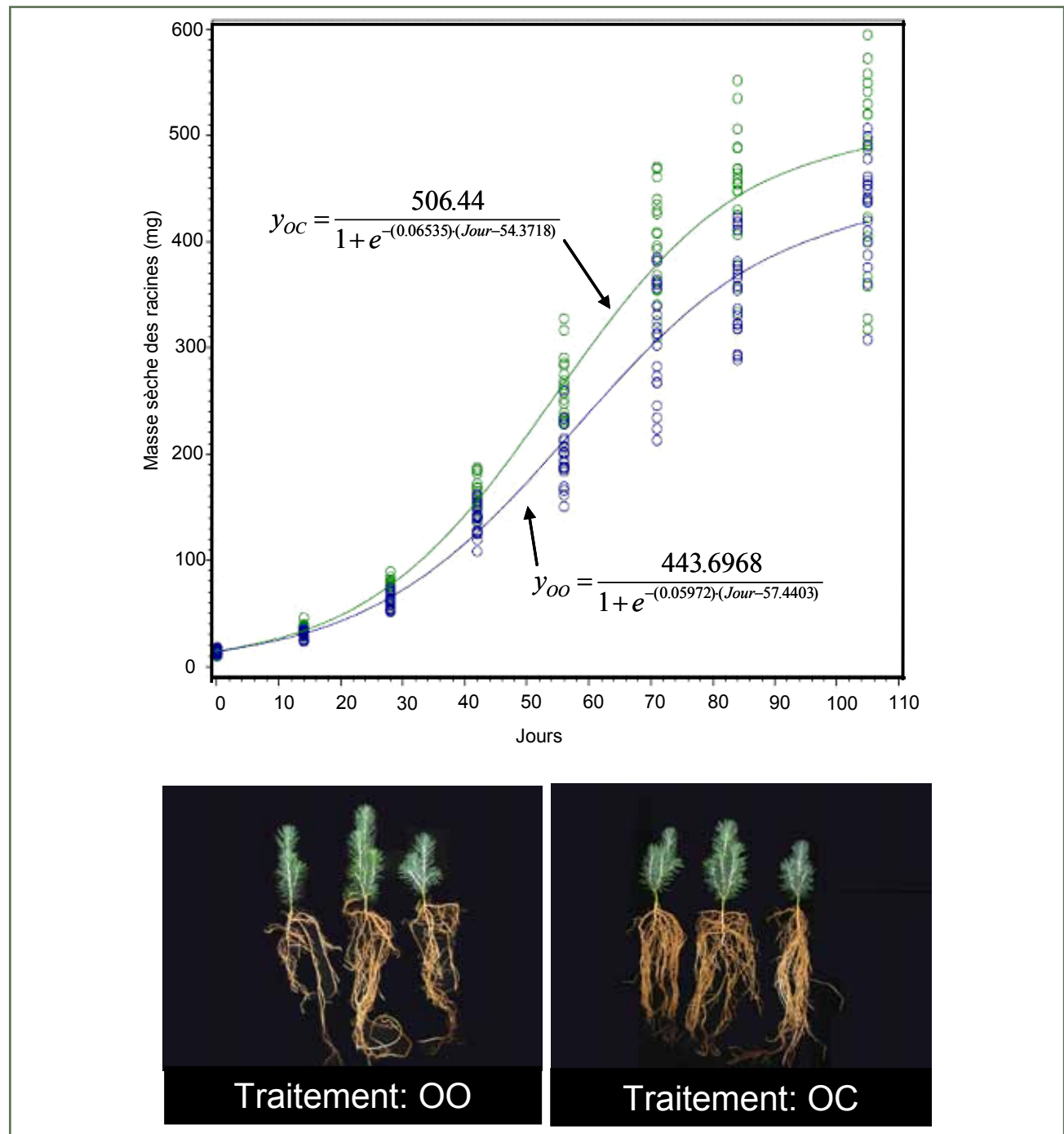


Figure 4. Modèles logistiques montrant une bonne accumulation de la masse sèche des racines du traitement ombragé-clair (OC) par rapport au traitement ombragé – ombragé (OO). Les photos montrent également une meilleure croissance des racines du traitement OC par comparaison au traitement OO.

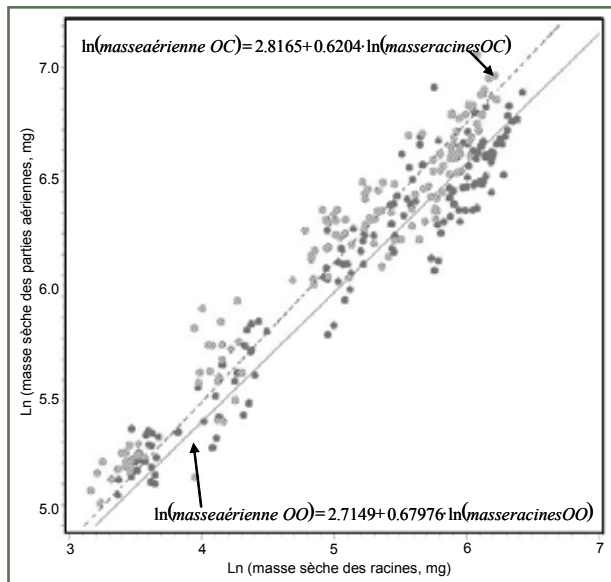


Figure 5. Modèles allométriques montrant que pour une même masse sèche des parties aériennes, le traitement OC assure une allocation du carbone aux racines significativement supérieure par comparaison à celle du traitement OO.

Conclusion et portée opérationnelle des résultats

- Les résultats de ce projet ont clairement démontré que l'augmentation de l'intensité de lumière générée par le remplacement de la toile blanche (ombragée), couramment utilisée par les pépinières forestières du Québec, par une toile claire a permis d'améliorer de façon significative la croissance des racines des plants d'épinette blanche (1+0).
- Ce remplacement, réalisé dès le début du mois d'août, a permis une augmentation significative de la sommation ou de l'intégrale de l'intensité de lumière et de l'allocation de la matière sèche (carbone) vers les racines.
- L'utilisation des toiles claires augmente la température à la surface des cavités du récipient, ce qui diminue les teneurs en eau du substrat. À cet effet, le pépiniériste doit porter une attention particulière à la gestion de l'irrigation pour éviter le dessèchement rapide du substrat et la mortalité des apex des racines blanches, notamment pendant les journées très chaudes.
- À la fin de la saison de croissance, la toile claire a permis, en moyenne, une augmentation significative de la masse des racines de 14 % par rapport à la toile blanche. Cette augmentation a atteint parfois pour certaines dates d'échantillonnage, par exemple à la fin octobre, l'équivalent de 27 %.
- Les modèles mathématiques développés pour les différentes variables de croissance (hauteur, diamètre, masses sèches des racines, des parties

aériennes et totales) pourraient être utilisés et appliqués immédiatement à une échelle opérationnelle, comme standards de croissance, dans le cadre des suivis de culture effectués par les pépiniéristes.

- Pour faciliter la mise en application de la succession [toiles ombragée (blanche) - toile claire] et pour diminuer les coûts lors de l'installation des tunnels, le pépiniériste pourra opter pour la mise en place de la toile claire qui sera couverte par une ombrière. Cette dernière atténue l'intensité de lumière de la même façon qu'une toile blanche. Ainsi, après l'atteinte des standards de croissance cibles, le pépiniériste pourra ensuite enlever facilement l'ombrière et ne laisser que la toile claire pour augmenter l'intensité de lumière.

Remerciements

Nous tenons à remercier M. Dany Paquet, directeur, et M. Réjean Perron de la pépinière Somival, pour leur aide technique exceptionnelle tout au long de la durée de ce projet. Nous remercions tout le personnel du laboratoire de chimie organique et inorganique de la Direction de la recherche forestière (DRF) du ministère des Ressources naturelles et de la Faune (MRNF) du Québec pour les analyses minérales des échantillons.

Nous remercions Mme Josianne DeBlois (DRF, MRNF), ainsi que M. Richard Vermette (stagiaire à la DRF) pour leur aide précieuse lors des analyses statistiques.

Le financement de ce projet de recherche (salaires : chercheur et trois techniciens, coût des analyses, frais de déplacement, etc.) a été assuré par la DRF (MRNF) accordé au Dr. Mohammed S. Lamhamedi (n° projet : 1120551-112310094). Un complément de financement a été assuré par le MRNF, l'Office de producteurs de plants forestiers du Québec et la pépinière de Somival Inc.

Références

- 1- ARNIM, A. V. et X.-W. DENG, 1996. *Light control of seedling development*. Ann. Rev. Plant Physiol. Mol. Biol. 47: 215-43.
- 2- BERGERON, O., M.S. LAMHAMED, H.A. MARGOLIS, P.Y. BERNIER et D.C. STOWE, 2004. *Irrigation control and physiological responses of nursery-grown black spruce seedlings (1+0) cultivated in air-slit containers*. Hort. Sci. 39 : 599-605. <http://www.mrnf.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Lamhamedi-Mohammed/Hortscience-39-3.pdf>
- 3- BOUDREAU, S., 2010. *Effets des propriétés physiques et chimiques des substrats sur la croissance et le développement de semis d'épinette blanche en récipient après une saison de culture*. Mémoire de maîtrise. Faculté des sciences de l'agriculture et de l'alimentation. Université Laval. 73 p.

- 4- GINGRAS, B.-M., et S. RICHARD, 1999. *Bilan du développement des récipients à parois ajourées : culture des semis en pépinière et performance en plantation comparative*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles, Forêt Québec, Direction de la recherche forestière, Sainte-Foy, Québec. Mémoire de recherche forestière n° 130. 74 p.
- 5- 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, Sainte-Foy, Québec. Note de recherche forestière n° 111. 8 p. <http://www.mrnf.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Gagnon-Jean/Note111.pdf>
- 6- LAMHAMEDI, M.S., 2011. *Variabilité spatiale et variations extrêmes des teneurs en eau du substrat en pépinière forestière : facteurs aggravant de l'insuffisance racinaire*. Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Direction de la recherche forestière. Avis de recherche forestière n° 28. 2 p. <http://www.mrnf.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Lamhamed-Mohammed/Avis28.pdf>
- 7- LAMHAMEDI, M.S., 2010. *Amélioration tangible de la croissance des racines des plants d'épinette noire par le traitement de jours courts en pépinière forestière*. Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Direction de la recherche forestière. Avis de recherche forestière n° 24. 2 p. <http://www.mrnf.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Lamhamed-Mohammed/avis24.pdf>
- 8- LAMHAMEDI, M.S., M. RENAUD; P. DESJARDINS et L. VEILLEUX, 2009. *Mise à l'échelle opérationnelle du traitement hâtif de jours courts sur la morpho-physiologie et l'insuffisance racinaire des plants d'épinette noire (1+0) produits en tunnel*. Mémoire de recherche forestière n° 154. 28 p. <http://www.mrnf.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Lamhamed-Mohammed/Memoire154.pdf>
- 9- 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: 108-120. <http://www.mrnf.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Lamhamed-Mohammed/Soil-Sci-Soc-Am-J-70-108-120.pdf>
- 10- 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 : 4^e atelier sur la production de plants forestiers au Québec - Facteurs et techniques culturales influençant le développement racinaire des plants en pépinière forestière. Gouvernement du Québec - Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Sainte-Foy, Québec, p. 4-5. <http://www.mrnf.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Lamhamed-Mohammed/4e-atelier-principaux-facteurs.pdf>
- 11- LAMHAMEDI, M.S., H.A. MARGOLIS, M. RENAUD, L. VEILLEUX et I. AUGER, 2003. *Effets de différentes régies d'irrigation sur la croissance, la nutrition minérale et le lessivage des éléments nutritifs des semis d'épinette noire (1 + 0) produits en récipients à parois ajourées en pépinière forestière*. Can. J. For. Res. 33 : 279-291. <http://www.mrnf.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Lamhamed-Mohammed/Can-J-For-Res-33-279-291.pdf>
- 12- 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 : 1968-1980. <http://www.mrnf.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Lamhamed-Mohammed/Can-J-For-Res-31-1968-1980.pdf>
- 13- LAMHAMEDI, M.S., P.Y. BERNIER, C. HÉBERT et R. JOBIDON, 1998. *Physiological and growth responses of three types of containerized Picea mariana seedlings outplanted with and without vegetation control*. For. Ecol. Manage. 110 : 13-23.
- 14- LAMHAMEDI, M.S., P.Y. BERNIER et C. HÉBERT, 1997. *Effect of shoot size on the gas exchange and growth of containerized Picea mariana seedlings under different watering regimes*. New Forests. 13 (1-3) : 209-223.
- 15- MARGOLIS, H. A., J. BÉGIN, R. BEESON et P. BELLEFLEUR, 1988. *The influence of metal halide and high-pressure sodium lamps during photoperiod extension on the allocation of carbon between lignin and cellulose in black spruce seedlings*. Can. J. For. Res. 18: 962-964.
- 16- LEDIG, F.T., F.H. BORMANN et K.F. WENGER, 1970. *The distribution of dry matter growth between shoot and roots in loblolly pine*. Bot. Gaz. 131: 349-359.
- 17- LOGAN, K.T., 1969. *Growth of tree seedlings as affected by light intensity. IV. Black spruce, white spruce, balsam fir, and eastern white cedar*. Department of Fisheries and forestry. Canadian Forestry service. Publication n° 1256. 12 p.
- 18- MYERS, B.J., 1988. *Water stress-integral – a link between short-term stress and long-term growth*. Tree Physiol. 4: 315-323.
- 19- PARBST, K., 2006. *Manage shade curtains based on accumulated light*. Greenhouse management and production. 26 (4): 49-52.
- 20- SHIMAZAKI, K., M. DOI, S.M. ASSMANN et T. KINOSHITA, 2007. *Light regulation of stomatal movement*. Ann. Rev. Plant Biol. 58: 219-247.
- 21- 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 Forests 40: 185-204.
- 22- TIMMER, V.R. et G. PARTON, 1982. *Monitoring nutrient status of containerized seedlings*. Dans : Proceedings, Ontario Ministry of Natural Resources Nurseryman's Meeting; 1982 June, Thunder Bay, Ontario. p: 48-58.
- 23- WASSINK, E. C. et J.A.J. STOLWIJK, 1956. *Effects of light quality on plant growth*. Ann. Rev. Plant. Physiol. 7 : 373-400.

Évaluation de l'efficacité de la fertilisation foliaire d'urée sur la concentration foliaire en azote des plants d'épinette noire en récipients 2+0

Jean Gagnon^{1,2,3}



Jean Gagnon est ingénieur forestier, diplômé de l'Université Laval depuis 1984 (il a en outre fait la troisième année de son baccalauréat à l'Université de la Colombie-Britannique [UBC]). En 1987, il obtient sa maîtrise en sciences forestières (M. Sc.) de l'Université Laval. Depuis 1987, Jean Gagnon est chargé de recherche à la Direction de la

recherche forestière (DRF) du ministère des Ressources naturelles et de la Faune (MRNF) du Québec. Ses recherches visent à élaborer et mettre en place des mesures efficaces d'atténuation (régies d'irrigation et de fertilisation testées à l'aide de logiciels) du lessivage des éléments minéraux (N : nitrate, ammonium, urée; P, K, Ca et Mg), en vue d'assurer une protection accrue de la qualité des eaux souterraines des pépinières forestières du Québec. Il étudie également les différents processus de transformations biochimiques des sources d'azote (ammonium, nitrate, urée) appliquées en pépinières, et leurs effets sur le lessivage des éléments minéraux et la croissance des plants cultivés en récipients et à racines nues. Il transfère les connaissances et l'expertise acquises auprès des pépinières forestières gouvernementales et privées du Québec, notamment comme membre de divers groupes techniques du MRNF et du Comité environnement des pépinières du MRNF, depuis sa création en 2002.

Soulignons qu'en 1988, Jean Gagnon a été choisi pour effectuer un stage de huit mois en France au Centre INRA (Institut National de la Recherche Agronomique) de recherche forestière de Nancy, dans le cadre d'un programme de coopération franco-québécois. Ce stage portait sur la fertilisation et la mycorhization du chêne rouge cultivé en récipients.

¹ Direction de la recherche forestière, ministère des Ressources naturelles et de la Faune, 2700 rue Einstein, Québec (Québec) G1P 3W8

² jean.gagnon@mrnf.gouv.qc.ca

³ 418-643-7994, poste 6566

Gagnon, J., 2011. *Évaluation de l'efficacité de la fertilisation foliaire d'urée sur la concentration foliaire en azote des plants d'épinette noire en récipients 2+0*. Dans : Colas, F.; Lamhamedi, M.S. (éds.), 2011. Production de plants forestiers au Québec : la culture de l'innovation. Colloque de transfert de connaissances et de savoir-faire. Carrefour Forêt Innovations, 4-6 octobre 2011, Québec (Canada), 140 p. pp : 97- 106.

Introduction

Chaque année, plus de 150 millions de plants sont produits dans les 21 pépinières forestières du Québec (6 publiques et 15 privées). Les pépiniéristes doivent produire des plants qui répondent non seulement à différentes normes et critères de qualité morphologiques (ex : hauteur, diamètre, rapport hauteur/diamètre), mais aussi au critère physiologique de concentration foliaire minimale en azote (N). Selon ce critère en vigueur depuis 1999, la concentration foliaire minimale en N des plants des essences résineuses en récipients doit être de 1,5 % pour les plants conventionnels (volumes de cavités < 300 cm³, ex : réc. 45-110, 67-50) et de 1,7 % pour les plants de fortes dimensions (PFD), dont le volume des cavités est supérieur à 300 cm³ (ex : réc. 25-310) (VEILLEUX *et al.* 2011).

L'atteinte de ces différentes normes et critères de qualité morphologiques et physiologiques est grandement facilitée par l'approche de nutrition minérale développée au Québec au début des années 80 (LANGLOIS et GAGNON 1993, GIRARD *et al.* 2001). Cette approche de nutrition consiste à fertiliser les plants chaque semaine durant la saison de croissance de façon à combler leurs besoins hebdomadaires en minéraux (N, P, K) nécessaires pour atteindre, en fin de saison, les objectifs de hauteur, de masses sèches et de concentrations tissulaires ciblés en début de saison. Une fois ces objectifs atteints en fin de saison, le pépiniériste peut alors initier la formation du bourgeon terminal des plants (aoûtement) en réduisant les apports d'eau et d'azote (stress hydrique et nutritionnel) à ses cultures.

Puisque la diminution des apports d'azote (N) durant la période d'aoûtement peut entraîner une diminution importante de la concentration foliaire en N des plants, une fois que leur bourgeon terminal est formé, la fertilisation foliaire devient alors une pratique très intéressante pour augmenter la concentration foliaire en azote au niveau désiré. La fertilisation foliaire peut ainsi permettre au plant résineux en récipient de constituer une réserve suffisamment élevée en N pour que le printemps suivant, il puisse satisfaire au critère de concentration foliaire minimale en N (1,5 ou 1,7 %) au moment de l'inventaire de qualification qui précède la livraison des plants

pour le reboisement. Cette pratique peut aussi être utilisée à n'importe quel moment de la saison pour corriger rapidement une carence en micro élément (ex : Fe, Cu, Zn, Mn, Mo). Puisqu'avec la fertilisation foliaire, les applications de fertilisants sont beaucoup plus localisées que celles faites au sol, cette pratique a aussi l'avantage de réduire le lessivage de l'azote (N) et des autres minéraux sous les cultures en récipients.

Pour toutes ces raisons, la fertilisation foliaire en azote (N) et autres minéraux (ex : oligoéléments) a beaucoup été utilisée et étudiée en horticulture et en agriculture au cours des 50 dernières années (WITTWER et TEUBNER 1959, WITTWER *et al.* 1963, WITTWER 1964, HANDRECK et BLACK 1984, ALEXANDER et SCHROEDER 1987, GOODING et DAVIES 1992, MARSCHNER 1995, RAWLUK *et al.* 2000, MENGEL et KIRKBY 2001). Par contre, peu d'études sur ce sujet ont été publiées avec les essences résineuses en récipients produites en pépinières forestières (COKER *et al.* 1987, LANDIS *et al.* 1989, MONTVILLE et WENNY 1990, MONTVILLE *et al.* 1996). Cela pourrait s'expliquer par la surface d'absorption très réduite des aiguilles en comparaison avec celle des feuilles et aussi par la présence d'une cuticule cireuse à la surface des aiguilles des résineux (MARSCHNER 1995, MENGEL et KIRKBY 2001, LAMHAMEDI *et al.* 2003). En effet, en raison de sa nature hydrophobe (imperméable), la cuticule cireuse, qui protège les aiguilles contre les pertes d'eau par évaporation et les blessures, ralentit aussi l'absorption des éléments minéraux à la surface des aiguilles (LANDIS *et al.* 1989). Le développement de la cuticule cireuse devient aussi plus important sur les aiguilles après la formation des bourgeons et lorsqu'elles ont atteint leur croissance maximale en fin de saison. Durant cette période, la cuticule devient en effet plus épaisse et plus cireuse à la surface des aiguilles, ce qui permet au plant de mieux tolérer la dessiccation au cours de l'hiver (LANDIS *et al.* 2010).

Les résultats des différentes études de fertilisation foliaire en N réalisées jusqu'à maintenant en horticulture, en agriculture et en foresterie ont démontré que parmi les trois sources de N [ammonium : NH_4^+ , nitrate : NO_3^- , urée : $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$] pouvant être utilisées (GAGNON 1992, 2009), l'urée est celle à privilégier. En effet, en plus d'être hautement soluble (dans l'eau et l'huile), l'urée a l'avantage de pouvoir être appliquée à des concentrations relativement élevées sans causer des dommages aux aiguilles en raison de son faible potentiel de phytotoxicité. Cela pourrait être dû à son faible indice de salinité, qui permet de réduire la dessiccation des cellules des feuilles causée par un stress osmotique (GOODING et DAVIES 1992). Étant une molécule neutre, l'urée est aussi absorbée plus rapidement par les aiguilles que les deux autres sources

de N (NH_4^+ et NO_3^-) car sa diffusion à travers la cuticule cireuse est plus rapide (WITTWER *et al.* 1963). Une étude de fertilisation foliaire avec ces trois sources d'azote, de plants de *Pinus radiata* en récipients (COKER *et al.* 1987), a en effet montré que l'urée a été absorbée 10 fois plus rapidement que le nitrate (NO_3^-) et 3 fois plus vite que l'ammonium (NH_4^+).

Puisque la cuticule cireuse sur la surface des aiguilles nuit à la diffusion du fertilisant appliqué lors de la fertilisation foliaire, l'utilisation d'un surfactant est souvent nécessaire pour assurer une meilleure diffusion des minéraux à travers cette cuticule cireuse (MENGEL et KIRKBY 2001). De plus, certains surfactants, comme l'Agral 90, favorisent même la décomposition de la cuticule cireuse à la surface des aiguilles, ce qui améliore ainsi l'absorption du fertilisant appliqué. Le principal avantage d'un surfactant est qu'en réduisant la tension superficielle des gouttelettes d'eau et leur écrasement sur la feuille, il permet au fertilisant de s'étendre sur une plus grande surface et d'être réparti uniformément sur la surface des aiguilles (LANDIS *et al.*, 1989).

Il est important de noter que le succès de la fertilisation foliaire ne dépend pas seulement de l'ajout d'un surfactant à la solution fertilisante, mais aussi d'un ensemble d'autres facteurs : système de pulvérisation (forme des gouttelettes), dose de N et du produit, concentration de la solution fertilisante, moment de l'application dans la journée, période de la saison. Selon LANDIS *et al.* (1989), le système de pulvérisation doit idéalement produire une fine brume pour permettre au maximum de fertilisant d'atteindre et de demeurer sur la surface des aiguilles ou des feuilles. Pour éviter des brûlures foliaires, des concentrations de solution fertilisantes entre 20 et 50 g/L sont recommandées (MENGEL et KIRKBY, 2001).

La fertilisation foliaire des plants est une pratique utilisée dans les pépinières forestières pour corriger une carence en un élément particulier (macro ou micro élément). Puisqu'au Québec, les pépiniéristes sont tenus de produire des plants résineux en récipients qui répondent au critère de concentration foliaire minimale en N (1,5 ou 1,7 %) au moment de l'inventaire de qualification, la fertilisation foliaire d'urée peut s'avérer un outil intéressant pour leur permettre d'augmenter la concentration foliaire en azote (N) au niveau désiré.

Au Québec, la majorité des analyses de concentrations foliaires en N réalisées pour vérifier si ces cultures répondent ou non à ce critère de 1,5 ou 1,7 % sont effectuées au Laboratoire de chimie organique et inorganique (ISO/CEI 17025) du Service du soutien

scientifique de la Direction de la recherche forestière (DRF) du ministère des Ressources naturelles et de la Faune (MRNF). Avant de procéder à ces analyses d'azote, le laboratoire d'analyse chimique de la DRF effectue un rinçage (15 sec.) des échantillons foliaires à l'aide d'un lave-légume pour enlever les résidus de fertilisants qui pourraient être présents sur la surface des aiguilles des plants. Dans le cadre de cette étude, un traitement additionnel de lavage (trempage de 5 min.) de ces échantillons a été ajouté à la méthode actuelle de lavage (rinçage de 15 sec.) pour vérifier si cette dernière permet d'enlever tous les résidus de fertilisant.

Puisqu'au moment où cette expérience a été réalisée, le Laboratoire de chimie organique et inorganique de la DRF prévoyait déjà de rendre disponible dès 2011, une nouvelle méthode plus précise d'analyse de l'azote dans les tissus et sols (azote total : N_{tot}), cette méthode a été utilisée dans cette étude dans le but de comparer les résultats d'analyses de N dans les aiguilles des plants avec ceux obtenus avec la méthode disponible en 2010 pour les pépiniéristes (azote Kjeldahl : N_k).

Objectifs

1. Vérifier si l'apport foliaire d'urée, combiné à l'ajout ou non d'un surfactant, entraîne une augmentation rapide de la concentration (%) foliaire en azote (N) en fin de saison, lorsque le plant est en dormance;
2. Évaluer si la méthode actuelle de lavage des aiguilles des plants, utilisée par le Laboratoire de chimie organique et inorganique de la DRF, permet d'éliminer tous les résidus d'azote sur les aiguilles;
3. Établir la relation entre deux méthodes d'analyse de l'azote (N) du Laboratoire de chimie organique et inorganique de la DRF, soit celle disponible en 2010 (azote Kjeldahl : N_k) et une nouvelle méthode plus précise (azote total : N_{tot}), disponible dès la saison 2011.

Matériel et méthodes

Cette expérience préliminaire de fertilisation foliaire d'urée a été réalisée du 13 au 18 octobre 2010 à la pépinière forestière de Normandin (latitude : 48° 49' N.; longitude : 72° 45' O sur des plants de fortes dimensions (PFD) d'épinette noire 2+0 produits dans le récipient 25-310. Il est important de noter que le 12 octobre 2010, soit une journée avant le début de cette étude, les plants ont reçu une fertilisation de 20-8-20 correspondant à un apport d'azote (N) de 13,8 mg N/plant.

Fertilisation foliaire d'urée au jour 0

Le 13 octobre 2010, un dispositif complètement aléatoire, constitué de deux facteurs (fertilisation

foliaire d'urée, lavage des aiguilles des plants) à trois niveaux de traitements chacun et de trois répétitions, a été installé à cette pépinière. Il comprenait un total de 18 récipients 25-310 d'épinette noire 2+0, qui ont reçu aléatoirement un des trois traitements de fertilisation foliaire d'urée (premier facteur) à raison de six récipients par traitement : 1) AS : avec surfactant; 2) SS : sans surfactant; et 3) NF : non fertilisé (témoin). Le surfactant utilisé est l'*Agral 90* (Norac Concepts Inc. 2009, Guelph, Ontario, Canada), un surfactant non ionique renfermant 90 % de NPE (nonylphénoxy polyéthoxy éthanol). Il a été mélangé à la solution fertilisante d'urée à raison de 1 mL d'*Agral 90* par litre de solution fertilisante. Puisqu'il est non ionique, ce surfactant a l'avantage de ne renfermer aucun ion positif ou négatif qui pourrait faire compétition ou réagir avec le fertilisant utilisé lors de la fertilisation foliaire. Le choix de ce dernier repose aussi sur le fait que l'ajout d'un surfactant à base de NPE, comme l'*Agral 90*, a permis de doubler l'absorption de l'urée par le feuillage dans une étude de fertilisation foliaire d'urée d'une culture agricole (RAWLUK *et al.* 2000). Après avoir reçu les traitements de fertilisation, les plants des six récipients 25-310 de chaque traitement (AS, SS, NF) ont été apportés dans un garage non chauffé (mêmes conditions de température qu'à l'extérieur) pour qu'ils soient protégés des précipitations.

Les traitements de fertilisation foliaire d'urée AS et SS ont été appliqués à l'aide d'un tracteur (Multi-Tool Carrier, modèle Multi 33, Timm Enterprises Inc., Oakville, Ontario, Canada), muni d'un réservoir de 50,1 L et de deux rampes d'irrigation (Figure 1) ayant chacune neuf buses (Modèle Teejet XR 11004, TeeJet Technologies, Spraying Systems Co., Wheaton, Illinois, États-Unis). La solution fertilisante d'urée (46-0-0 : 46 % de N-urée) a été appliquée à un taux de 937 litres à l'hectare (L/ha) et sa concentration était de 42,7 g/L d'urée (2,137 kg de 46-0-0 dans 50 L d'eau). Pour ces deux traitements de fertilisation (AS, SS), une dose d'azote de 8,47 mg/plant a été appliquée et elle correspondait à 17,6 kg N/ha et à 38,2 kg/ha d'urée (46-0-0). Au moment des fertilisations foliaires le matin du 13 octobre, la température extérieure de l'air était de 8 °C alors que l'humidité relative de l'air était de 80 %. Aucune irrigation n'a été effectuée pour rincer les aiguilles des plants après ces fertilisations foliaires.

Tout de suite après la fertilisation (jour 0), de même qu'après un, trois, cinq et sept jours (jours 1, 3, 5 et 7), un total de 54 plants a été prélevé dans les récipients 25-310, soit 18 plants par traitement de fertilisation (AS, SS, NF). Puisque chacune des trois répétitions de chaque traitement était constituée de

deux récipients et que deux plants étaient prélevés par répétition, un plant a donc été sélectionné au hasard dans une cavité de chacun des deux récipients de chaque répétition. Il est important de noter que les récoltes de plants effectuées 1, 3, 5 et 7 jours après la fertilisation initiale ont toujours eu lieu à la même heure que celle de la récolte initiale de plants au jour 0.



Figure 1. Fertilisation foliaire d'urée, effectuée le 13 octobre 2010 (jour 0) sur des plants de fortes dimensions (PFD) d'épinette noire 2+0 produits en récipients 25-310 à la pépinière forestière de Normandin.

Lavage des plants 0, 1, 3, 5 et 7 jours après la fertilisation

Une fois les 54 plants prélevés (18 plants par traitement de fertilisation x 3 traitements) à chacune des cinq dates de récoltes (jours 0, 1, 3, 5 et 7), ils ont été sectionnés au collet à l'aide d'un sécateur, et les parties aériennes de ces 54 plants ont été placées dans des sacs bruns en papiers (*Kraft*) à raison de deux par sac (chaque sac de deux plants représente une répétition d'un traitement). Les 54 plants prélevés par date de récolte ont ensuite été amenés au laboratoire de la pépinière pour procéder aux trois traitements de lavage des plants. Pour ce faire, les 18 plants prélevés pour chaque traitement de fertilisation (AS, SS, NF) ont été divisés en trois groupes de six plants et chacun de ces groupes s'est vu attribuer aléatoirement un des trois traitements de lavage des parties aériennes des plants (deuxième facteur du dispositif) : 1) *Lav* : lavage de 15 sec. des parties aériennes. au lavé-légume = témoin (méthode utilisée actuellement par le laboratoire de chimie organique et inorganique de la DRF); 2) *Tremp* : trempage de 5 min. (nouvelle méthode testée) après le lavage de 15 sec.; et 3) *Rien* : aucun lavage ni trempage des parties aériennes des plants.

Une fois ces traitements de lavage effectués, les parties aériennes des plants ont été séchées au four durant 48 heures à 65 °C et par la suite, leur tamisage a été effectué pour séparer les aiguilles des tiges.

Ensuite, les sacs d'échantillons foliaires ont été expédiés pour analyses de leurs concentrations en azote au Laboratoire de chimie organique et inorganique de la Direction de la recherche forestière (DRF).

Analyses de l'azote dans les aiguilles des plants

Dans le cadre de cette étude réalisée en 2010, une nouvelle méthode d'analyse plus précise de l'azote dans les aiguilles (azote total : N_{tot}), disponible à l'échelle opérationnelle seulement en 2011, a été utilisée. C'est pourquoi, toutes les concentrations (%) foliaires en N présentées dans les tableaux de résultats sont des valeurs d'azote total (N_{tot}) et non celles de la méthode d'analyse de N disponible pour les pépiniéristes en 2010 (azote Kjeldahl : N_K). Par contre, puisqu'un des objectifs de cette étude visait aussi à établir la relation entre ces deux méthodes d'analyses, des analyses d'azote Kjeldahl (N_K) ont aussi été effectuées et les résultats de N_K ne sont présentés qu'à la figure 2.

Ainsi, avant l'analyse de l'azote dans les aiguilles des plants, tous les échantillons foliaires ($n =$ trois échantillons composites, chaque échantillon composite est constitué des aiguilles de deux plants) ont été broyés et homogénéisés au Laboratoire de chimie organique et inorganique de la DRF. Alors que l'analyse de l'azote total (N_{tot}) a été effectuée à l'aide d'un analyseur d'azote par combustion (LECO Corporation. *TruMac N, Nitrogen Determinator*), celle de l'azote Kjeldahl (digestion à l'acide sulfurique) a été faite en utilisant un spectrophotomètre à flux continu.

Analyses statistiques

Afin de déterminer les effets des différents traitements de fertilisation foliaire d'urée et de lavage des aiguilles des plants, deux types d'analyses de variance ont été réalisés :

1. Analyse de la variance à mesures répétées (jours 0 à 7) :
 - Le but principal de cette analyse était de déterminer l'effet dans le temps des différents traitements de fertilisation sur la concentration foliaire en azote des plants. Plusieurs structures de covariance ont été testées afin de tenir compte de la corrélation existant entre les mesures prélevées sur une même unité expérimentale. La sélection finale de la structure a été basée sur la valeur de la vraisemblance obtenue ($-2 \text{ Res Log Likelihood}$), la structure sélectionnée étant celle minimisant cette valeur, tout en ayant le moins de paramètres possibles;
 - Le modèle retenu inclut deux facteurs à effets fixes, soit les traitements de fertilisation et les jours, ainsi que l'interaction entre ces deux facteurs. Il inclut aussi le facteur à effets aléatoires correspondant aux

répétitions des traitements de fertilisation. Les différents traitements de lavage ont ici été considérés comme des répétitions (effets aléatoires), donc trois « sous-répétitions » de chaque répétition de traitements de fertilisation, afin de pouvoir obtenir une conclusion globale à propos des traitements de fertilisation et non pas une par traitement de lavage.

2. Analyses de la variance par jour :

- Une analyse de la variance a été effectuée sur la concentration en azote total (N_{tot}) à chaque jour, afin de comparer les traitements de lavage et de déterminer s'ils interagissent avec les traitements de fertilisation. Le modèle utilisé comprenait deux facteurs à effets fixes, soit les traitements de fertilisation et de lavage, de même que l'interaction entre ces deux facteurs, ainsi qu'un facteur à effets aléatoires, soit les répétitions des traitements de fertilisation.

Pour toutes ces analyses, la procédure MIXED de SAS (version 9.2, LITTELL *et al.* 2006) a été utilisée. L'hypothèse de normalité des résidus a été testée à l'aide de la statistique de Shapiro-Wilk alors que l'homogénéité des variances a été vérifiée de façon graphique. Un test de comparaisons multiples basé sur des simulations (*simulate*) a été effectué, lorsque requis, pour déterminer où se situaient les différences entre les traitements. Le seuil de significativité a été fixé à 5 % ($\alpha = 0,05$).

Une régression linéaire a également été effectuée, à l'aide de la procédure REG de SAS (version 9.2), pour déterminer la relation entre les deux méthodes d'analyses de l'azote (N) dans les aiguilles (azote total : N_{tot} , azote Kjeldahl : N_k) à partir des 135 observations disponibles pour chaque méthode d'analyse.

Résultats

1) Effets, dans le temps, de la fertilisation foliaire d'urée sur la concentration (%) foliaire en N des plants

Puisque l'interaction entre les traitements de fertilisation et les jours était significative ($p = 0,0016$), des comparaisons ont été faites en fixant les jours pour déterminer où se situaient les différences entre les traitements de fertilisation (AS, SS, NF) à chacune des cinq dates de récoltes de plants (jours 0, 1, 3, 5 et 7).

Le tableau 1 montre que 0, 1, 3 et 7 jours après l'application des trois traitements de fertilisation foliaire d'urée (SS, AS, NF), aucune différence significative (seuil de 5 %) entre ces trois traitements n'a été observée. Par contre, après cinq jours, la concentration (%) en azote total (N_{tot}) dans les aiguilles des plants fertilisés avec le mélange de surfactant et d'urée (AS) était significativement supérieure à celle des plants des deux autres traitements (SS et NF), avec 2,3 % comparée à 1,9 %. Ces résultats du Tableau 1

montrent que l'ajout d'un surfactant (Agral 90) à la solution fertilisante d'urée (traitement AS) a permis d'obtenir des plants avec une concentration foliaire en N significativement plus élevée que ceux n'ayant pas reçu le surfactant (SS).

Tableau 1. Évolution de la concentration (%) foliaire en azote total (N_{tot}) des plants en fonction des jours après la fertilisation foliaire d'urée

Traitements de fertilisation	Jours après la fertilisation foliaire d'urée				
	0	1	3	5	7
Sans surfactant (SS)	1,9 a *	2,1 a *	2,1 a *	1,9 a *	2,0 a *
Avec surfactant (AS)	2,2 a	2,1 a	2,1 a	2,3 b	1,9 a
Non fertilisé (NF)	2,1 a	2,1 a	2,2 a	1,9 a	2,0 a

* Verticalement, par jour, les moyennes suivies de lettres différentes présentent des différences significatives au seuil de 5 % (différences entre les traitements de fertilisation).

(n = trois échantillons composites, chaque échantillon composite est constitué des aiguilles de deux plants).

Il est important de noter qu'au moment de l'application des trois traitements de fertilisation foliaire d'urée (jour 0), les plants de fortes dimensions (PFD) d'épinette noire 2+0 (récipients 25-310) des trois traitements présentaient déjà une concentration foliaire moyenne élevée de 2,1 % (Tableau 1). En effet, dès le début de cette expérience, la concentration en N dans les aiguilles des plants était déjà supérieure au critère de concentration foliaire minimale en N de 1,7 % pour les PFD de résineux produits en récipients.

Comme le montre le tableau 1, des différences significatives entre les trois traitements de fertilisation foliaires d'urée (SS, AS, NF) sont apparues seulement cinq jours après la fertilisation. Bien qu'une interaction significative entre les traitements de fertilisation et de lavage ait été obtenue après trois ($p = 0,0079$) et cinq jours ($p = 0,0063$), seuls les résultats de l'interaction obtenue au « jour 5 » seront présentés dans les sections 2 et 3.

2) Comparaison, après cinq jours, des méthodes de lavage pour chaque traitement de fertilisation foliaire

Les résultats des comparaisons, après cinq jours, des méthodes de lavage (*Lav*, *Tremp*, *Rien*) pour chaque traitement de fertilisation (SS, AS, NF) sont présentés au Tableau 2. Ces résultats montrent que dans le cas des plants fertilisés avec le surfactant (AS) et ceux non fertilisés (NF), la concentration foliaire en N des plants soumis au trempage (*Tremp*) était inférieure de 0,1 % à celle des plants du traitement de lavage (*Lav*). En effet, alors que pour les plants fertilisés avec le surfactant (AS), elle s'élevait à 2,3 % pour

ceux soumis au trempage (*Tremp*) et à 2,4 % pour ceux qui avaient été lavés (*Lav*), dans le cas du traitement *NF*, la concentration foliaire en N des plants du traitement *Tremp* était de 1,9 % comparativement à 2,0 % pour ceux du traitement *Lav*. Dans le cas des plants non fertilisés (*NF*), cette différence de 0,1 % obtenue entre les traitements *Tremp* et *Lav* pourrait s'expliquer par l'azote résiduel sur les aiguilles des plants provenant de la fertilisation faite par la pépinière le 12 octobre, soit la journée avant le début de cette étude (apport de 13,8 mg N/plant). Bien que ces différences de 0,1 % entre les deux méthodes de lavage (*Tremp* et *Lav*) n'étaient pas significatives, elles ont toutefois fait ressortir une tendance à l'effet que le trempage de 5 min. des échantillons foliaires (*Tremp*) aurait permis d'enlever plus d'azote résiduel (0,1 %) sur la surface des aiguilles que le lavage de 15 sec. seulement (*Lav*). Il est important de noter que pour les valeurs de concentrations foliaires en N exprimées en %, la limite de détection est < 0,01 et cela est expliqué à la section 5 ci-dessous).

Tableau 2. Comparaison, après cinq jours, des effets des méthodes de lavage sur la concentration (%) foliaire en azote total (N_{tot}) des plants, pour chaque traitement de fertilisation.

Traitements de lavage	Traitements de fertilisation		
	Sans surfactant (SS)	Avec surfactant (AS)	Non fertilisé (NF)
Lavage (<i>Lav</i>)	1,8 a*	2,4 a*	2,0 a*
Trempage (<i>Tremp</i>)	1,8 a	2,3 a	1,9 ab
Aucun lavage, ni trempage (<i>Rien</i>)	2,1 a	2,4 a	1,7 b

* Verticalement, par traitement de fertilisation, les moyennes suivies de lettres différentes présentent des différences significatives (seuil de 5 %) (différences entre les méthodes de lavage des plants).

(n = trois échantillons composites, chaque échantillon composite est constitué des aiguilles de deux plants).

3) Comparaison, après cinq jours, des traitements de fertilisation foliaire pour chaque méthode de lavage

Les résultats des comparaisons, après cinq jours, des traitements de fertilisation foliaire (*SS*, *AS*, *NF*) pour chaque méthode de lavage (*Lav*, *Tremp*, *Rien*) présentés au tableau 3, montrent que pour les plants ayant été lavés (*Lav*) et trempés (*Tremp*), ceux ayant reçu le mélange de surfactant et d'urée (*AS*) ont eu une concentration (%) foliaire en N significativement (seuil de 5 %) plus élevée que ceux n'ayant pas reçu de surfactant (*SS*). En effet, dans le cas des plants lavés (*Lav*), le N foliaire des plants fertilisés avec le mélange de surfactant et d'urée (*AS*) était de 0,6 % supérieur à celui de ceux fertilisés sans le surfactant

(*SS*), avec 2,4 % (*AS*) comparé à 1,8 % (*SS*). Quant aux plants soumis à la méthode de trempage (*Tremp*), le N foliaire des plants fertilisés avec le mélange de surfactant et d'urée (*AS*) était de 0,5 % supérieur à celui de ceux n'ayant pas reçu de surfactant (*SS*), avec 2,3 % (*AS*) comparé à 1,8 % (*SS*).

Ces résultats du tableau 3 montrent que cinq jours après l'application des traitements de fertilisation foliaire d'urée, peu importe la méthode de lavage des plants (*Lav* ou *Tremp*), les plants ayant reçu le mélange de surfactant et d'urée (*AS*) présentaient une concentration (%) foliaire en N plus élevée que ceux n'ayant pas reçu de surfactant (*SS*). Ils font ainsi ressortir qu'il est plus avantageux d'ajouter un surfactant à la solution fertilisante d'urée lors des fertilisations foliaires.

Tableau 3. Comparaison, après cinq jours, des effets des traitements de fertilisation sur la concentration (%) foliaire en azote total (N_{tot}) des plants, pour chaque méthode de lavage.

Traitements de fertilisation	Traitements de lavage		
	Lavage (<i>Lav</i>)	Trempage (<i>Tremp</i>)	Aucun lavage, ni trempage (<i>Rien</i>)
Sans surfactant (<i>SS</i>)	1,8 a*	1,8 a*	2,1 a*
Avec surfactant (<i>AS</i>)	2,4 b	2,3 b	2,4 a
Non fertilisé (<i>NF</i>)	2,0 ab	1,9 ab	1,7 b

* Verticalement, par traitement de lavage, les moyennes suivies de lettres différentes présentent des différences significatives (seuil de 5 %) (différences entre les traitements de fertilisation).

(n = trois échantillons composites, chaque échantillon composite est constitué des aiguilles de deux plants).

4) Relation entre les deux méthodes d'analyses d'azote (N_{tot} , N_k) dans les aiguilles des plants

En ce qui concerne la comparaison des deux méthodes d'analyses de l'azote (N) dans les aiguilles des plants, les valeurs de concentrations (%) en azote total (N_{tot}) variaient entre 1,59 et 2,58 % (moyenne de 2,06 %), alors que celles d'azote Kjeldahl (N_k) se situaient entre 1,44 et 2,36 % (moyenne de 1,86 %). Les concentrations en N_{tot} étaient donc en moyenne 11 % plus élevées que celles de N_k .

La régression linéaire simple effectuée entre N_{tot} et N_k , présentée à la figure 2, a permis d'obtenir l'équation suivante :

$$\hat{N}_{tot} = 0,07987 + 1,06811 * N_k \quad (R_{aj}^2 = 0,94)$$

Le R^2 ajusté de cette régression est 94,12 %, ce qui signifie que 94 % de la variabilité de la variable N_{tot}

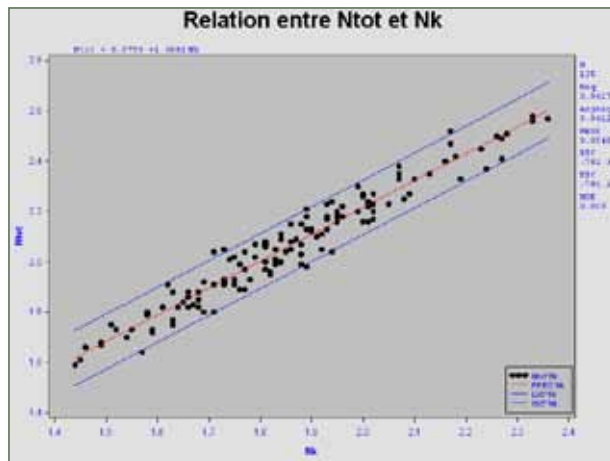


Figure 2. Régression linéaire simple entre les concentrations (%) en azote total (N_{tot}) et en azote Kjeldahl (N_k) dans les aiguilles des PFD d'épinette noire 2+0 produits en récipients 25-310 à la pépinière forestière de Normandin ($\hat{N}_{\text{tot}} = 0,07987 + 1,06811 * N_k$, $R_{aj}^2 = 0,94$).

est expliquée par la variable N_k . La figure 2 illustre non seulement la relation entre N_{tot} et N_k , mais aussi les limites de prédiction dans le cas d'une observation individuelle.

5) Conversion des résultats d'analyses tissulaires (g/Kg) en % :

Depuis 2011, le Laboratoire de chimie organique et inorganique de la Direction de la recherche forestière (DRF) du MRNF offre, en plus de la méthode d'analyse d'azote Kjeldahl (N_k : digestion à l'acide sulfurique) dans les tissus et sols, une nouvelle méthode plus précise d'analyse de l'azote dans les aiguilles des plants : l'azote total (N_{tot} : méthode par combustion).

En effet, la méthode d'analyse de l'azote total (N_{tot}) est plus précise car elle analyse vraiment tout l'azote contenu dans les aiguilles du plant contrairement à celle de l'azote Kjeldahl (N_k). Dans le cas de cette dernière (N Kjeldahl), l'acide sulfurique chaud utilisé pour l'extraction de N dans les tissus entraîne des pertes gazeuses importantes d'azote (ex : NO_3 , NO_2 , etc.), ce qui fait que les résultats de cette analyse ne donne pas tout le N contenu dans les tissus du plant (aiguilles, tiges, racines) mais seulement une partie (DE BLOIS 2010). Cela explique pourquoi, dans les résultats présentés à la section 4, les concentrations foliaires en N analysées avec cette nouvelle méthode (N_{tot}) sont en moyenne 11 % plus élevées que celles de la méthode utilisée en 2010 (N_k).

Cette méthode d'analyse de l'azote (N) foliaire est maintenant celle à privilégier pour le pépiniériste qui souhaite vérifier si une culture résineuse en récipients répond ou non au critère de concentration foliaire

minimale en N (1,5 % pour les plants conventionnels et 1,7 % pour les PFD). Puisque ce critère est exprimé en pourcentage et que les résultats d'analyses du laboratoire de chimie organique et inorganique de la DRF sont en g/kg, les pépiniéristes doivent donc convertir en % ces résultats obtenus en g/kg. Pour ce faire, ils n'ont qu'à diviser ces résultats (g/kg) par 10 pour obtenir des valeurs en %.

Étant donné que la limite de détection de la méthode d'analyse du N_{tot} est inférieure à 0,1 (limite < 0,1) pour les valeurs en g/kg, dans le cas de ces valeurs converties en % (division par 10 des valeurs en g/kg), la limite de détection ne sera plus de 0,1, mais bien de 0,01 (limite < 0,01). Ainsi par exemple, un résultat de 11,6 g/kg (limite de détection < 0,1) converti en % correspondra alors à 1,16 % (limite de détection < 0,01). Par contre, comme le montre cet exemple, cette conversion en % des résultats d'analyses en g/kg ne changera rien lorsque viendra le temps de comparer le résultat d'analyse converti en % au critère de concentration foliaire minimale en N exprimé en pourcentage (1,5 ou 1,7 %).

Discussion

Cette première expérience de fertilisation foliaire d'urée, réalisée à la mi-octobre 2010 avec une culture de PFD d'épinette noire 2+0 en récipients (25-310), montre que cinq jours après la fertilisation, les plants fertilisés avec le mélange de surfactant (Agral 90) et d'urée présentaient une concentration foliaire en N significativement supérieure (2,3 %) à ceux fertilisés sans le surfactant (1,9 %). Ces résultats font donc ressortir l'avantage d'utiliser un surfactant lorsque l'on souhaite effectuer une fertilisation foliaire d'urée et ils confirment ceux obtenus dans d'autres études réalisées avec des plants forestiers (COKER *et al.* 1987, MONTVILLE et WENNY 1990, MONTVILLE *et al.* 1996) et des cultures agricoles (RAWLUK *et al.* 2000).

Cette étude montre aussi que la fertilisation foliaire d'urée en fin de saison est une pratique qui peut être utilisée avec succès pour augmenter la concentration en N dans les aiguilles des plants lorsque la phase d'aoûtement des plants est terminée. Des résultats similaires ont d'ailleurs été obtenus avec des plants forestiers en dormance (MONTVILLE et WENNY 1990, MONTVILLE *et al.* 1996). Puisqu'avec la fertilisation foliaire, les applications de fertilisants sont beaucoup plus localisées que celles faites au sol, cette pratique a aussi l'avantage de réduire le lessivage de l'azote (N) et des autres minéraux sous les cultures en récipients.

Par ailleurs, il est important de noter qu'au début de cette expérience préliminaire de fertilisation foliaire d'urée, la concentration foliaire en N des PFD

d'épinettes noires 2+0 (récipients 25-310) des trois traitements qui s'élevait en moyenne à 2,1 %, était déjà supérieure au critère de concentration foliaire minimale en N de 1,7 % pour ces PFD. Puisque pour ces plants bien pourvus en N, les effets des fertilisations foliaires d'urée ont été significatifs après seulement 5 jours, il aurait été intéressant de voir leurs effets sur des plants ne se conformant pas à la norme de 1,7 % ou carencés en azote. En effet, de tels plants plus affamés en N auraient sûrement réagi plus rapidement aux effets de ces traitements de fertilisation foliaire d'urée. Cet aspect sera intéressant à étudier lors d'une prochaine expérience. De plus, lors d'une nouvelle étude, le nombre de plants prélevés par traitement devra être augmenté afin de compenser pour la variabilité des concentrations foliaires en N entre les plants d'un même récipient et aussi entre les récipients. En effet, ce nombre trop faible de plants prélevés par traitement (6 plants : 2 plants/rép. x 3 rép.) explique le peu d'effets significatifs obtenu entre les différents traitements de fertilisation et de lavage des plants.

Lors d'une prochaine expérience de fertilisation foliaire d'urée, il serait aussi très intéressant de : 1) suivre l'évolution dans le temps des concentrations et contenus en azote (N) dans toutes les parties du plant (aérienne, racinaire et totale) au lieu de seulement la concentration en N dans les aiguilles, comme ce fut le cas pour cette étude préliminaire; et de 2) évaluer l'effet de différentes concentrations foliaires initiales en N (ex : sous 1,7 % pour les PFD) en relation avec l'augmentation des concentrations en N dans le plant, afin de vérifier si cette augmentation est affectée par les concentrations foliaires initiales en N.

Recommandations

- Les fertilisations foliaires (N ou autres minéraux) doivent idéalement être appliquées tôt le matin (absence de vent) ou en soirée après la tombée du vent dans des conditions d'humidité relative élevée et de temps frais et nuageux, afin de permettre à la solution fertilisante de rester le plus longtemps possible en contact avec la surface des aiguilles (ou feuilles) des plants.
- Puisque des problèmes de phytotoxicité (brûlures à la surface des aiguilles ou des feuilles) peuvent survenir lorsque des concentrations trop élevées d'azote (N) sont appliquées sous forme de fertilisations foliaires, au lieu de faire seulement une application foliaire d'une solution concentrée d'urée, le pépiniériste devrait plutôt fragmenter celle-ci en plusieurs applications de solutions de faibles concentrations d'urée. Bien que la phytotoxicité de l'urée soit plus basse que celle de l'ammonium (NH_4^+) et du nitrate (NO_3^-) en raison de son index de salinité plus faible, l'application d'une solution

trop concentrée d'urée peut causer des brûlures sur la surface des aiguilles (ou feuilles) des plants.

- Lors des fertilisations foliaires (N ou autres minéraux), il est recommandé d'ajouter un surfactant car en réduisant la tension superficielle des gouttelettes d'eau et leur écrasement sur la surface des aiguilles (ou feuilles), le surfactant permet au fertilisant de s'étendre sur une plus grande surface de celles-ci. De plus, tel que mentionné précédemment, certains surfactants comme celui utilisé lors de cette expérience (Agral 90), favorisent la décomposition de la cuticule cireuse présente en abondance sur la surface des aiguilles des résineux, ce qui va permettre une meilleure absorption du fertilisant appliqué.
- Pour éviter les brûlures, le dessèchement et la mortalité des aiguilles des plants, il serait important d'éviter d'appliquer des fertilisations foliaires pendant les journées chaudes et ensoleillées, car l'évaporation de la solution fertilisante va former un dépôt à la surface des aiguilles qui peut entraîner des brûlures aux aiguilles. En effet, en absence de ces conditions et à cause de l'évaporation de l'eau, il y a formation d'un dépôt très concentré d'azote (N) à la surface des aiguilles. Ceci engendre un gradient de potentiel osmotique entre la surface et l'intérieur de l'aiguille. Pour compenser cette variation de concentration de N, l'eau contenue dans les aiguilles va sortir, ce qui va provoquer un dessèchement et des brûlures généralisées et ce, surtout lorsque l'on applique des solutions concentrées de N et que ces applications sont suivies de périodes ensoleillées.

Portée opérationnelle des résultats et conclusion

1. La fertilisation foliaire d'urée s'avère une pratique culturale efficace pour augmenter la concentration en N dans les aiguilles des plants en fin de saison (plants en dormance) et l'ajout d'un surfactant à la solution fertilisante d'urée améliore l'efficacité de cette pratique.
2. Les résultats obtenus cinq jours après la fertilisation foliaire d'urée ont montré que dans le cas du traitement de fertilisation qui a le mieux fonctionné au cours de cette étude, le mélange de surfactant et d'urée (AS), la concentration foliaire en N des plants soumis au traitement de trempage (*Tremp*) était inférieure à celle des plants du traitement de lavage (*Lav*), avec 2,3 % comparé à 2,4 %. Cette différence de 0,1 % entre les concentrations des plants trempés et lavés fait donc ressortir une tendance à l'effet que la méthode de trempage (5 min.) aurait permis d'enlever plus d'azote résiduel sur la surface des aiguilles que le lavage seulement (15 sec.). Cet aspect mérite d'être étudié plus en détails lors d'une prochaine étude et surtout, en utilisant un nombre beaucoup plus élevé d'échantillons pour compenser pour la variabilité élevée de la concentration foliaire en N observée non seulement à l'intérieur d'un récipient mais aussi entre les récipients d'un même traitement.

3. Puisque des effets significatifs de la fertilisation foliaire d'urée sont apparus seulement cinq jours après cette fertilisation réalisée sur des plants en dormance à la mi-octobre, il est important que le pépiniériste tienne compte de ce délai s'il souhaite augmenter la concentration foliaire en N d'une culture résineuse pour qu'elle atteigne 1,5 ou 1,7 % avant l'inventaire de qualification des plants.
4. Cette étude a permis d'établir la relation entre deux méthodes d'analyse de l'azote (N) dans les aiguilles des plants, soit celle en vigueur en 2010 (azote Kjeldahl : N_k) et une nouvelle méthode plus précise disponible depuis la saison 2011 (azote total : N_{tot}). Les pépiniéristes du Québec pourront donc dorénavant se servir de cette régression linéaire simple ($\hat{N}_{tot} = 0,07987 + 1,06811 * N_k$, $R_{aj}^2 = 0,94$) pour convertir leurs résultats d'analyses de N Kjeldahl (N_k) en N total (N_{tot}) et comparer ces valeurs converties en N_{tot} avec les résultats des nouvelles analyses de N_{tot} .

Cette première expérience, réalisée à la pépinière forestière de Normandin à la mi-octobre 2010, avec une culture de PFD d'épinette noire 2+0 en récipients (25-310), a permis de vérifier les effets de différents traitements de fertilisation foliaire d'urée et méthodes de lavage des aiguilles sur la concentration foliaire en N de ces plants. Les résultats obtenus permettront d'établir des balises et des correctifs pour que des effets encore plus significatifs de ces traitements soient obtenus lors d'une prochaine expérience.

Remerciements

Je tiens à remercier M^{me} Michèle Simard et M. Pierre Comtois, de la pépinière de Normandin, pour leur grande collaboration dans cette expérience préliminaire de fertilisation foliaire (urée) de plants réalisée du 13 au 18 octobre 2010 à cette pépinière. Mes remerciements vont également à madame Josianne DeBlois, statisticienne, du Service du soutien scientifique de la DRE, pour les analyses statistiques effectuées dans le cadre de ce dispositif et pour son aide précieuse et ses conseils judicieux.

Je tiens aussi à remercier MM. Denis Langlois et Carol De Blois, du laboratoire de chimie organique et inorganique de la DRE, pour leur collaboration dans ce dispositif de fertilisation foliaire et le personnel du laboratoire pour les analyses d'azote effectuées dans les aiguilles des plants. Mes remerciements s'adressent aussi à M. Mohammed Lamhamedi pour ses commentaires pertinents et ses conseils judicieux lors de l'élaboration de ce document.

Références

- ALEXANDER, A. et M. SCHROEDER, 1987. *Modern trends in foliar fertilization*. J. Plant Nutrition (9-16): 1391-1399.
- COKER, A., D. COURT et W.B. SILVESTER, 1987. *Evaluation of foliar urea applications in the presence and absence of surfactant on the nitrogen requirements of conditioned Pinus radiata seedlings*. N.Z.J. For. Sci. 17 (1) : 51-66.
- DE BLOIS, C., 2010. *Comparaison des méthodes de détermination de l'azote total (N_{tot}) vs l'azote Kjeldahl au Laboratoire de chimie organique et inorganique de la DRE : Impacts d'un changement méthodologique (N_{tot}) sur les opérations de la DGPSP (grille décisionnelle, Plantec, etc.)*. Présentation sur la comparaison de ces deux méthodes d'analyses faite à la DRE, 24 novembre 2010, 15 p.
- GAGNON, J., 1992. *Influence de la forme d'azote (ammonium ou nitrate) sur l'absorption, la réduction et l'assimilation, et sur la croissance des végétaux*. Ministère des Forêts, Dir. de la recherche. Rapport interne n° 349. 20 p.
- GAGNON, J., 2009. *Impact des différentes formes d'azote (Urée, NH₄⁺, NO₃⁻) sur la croissance des plants et sur le lessivage des engrais*. Dans Recueil des conférences - Session de formation sur la nutrition minérale des plants forestiers dédiée aux pépinières forestières du Québec]. Lamhamedi, M.S. et B.M. Gingras (éditeurs). ISBN 978-2-550-56289-4. 15 avril 2009, Québec, Canada. 72 p. Cédérom.
- GIRARD, D., J. GAGNON et C.-G. LANGLOIS, 2001. *PLANTEC : un logiciel pour gérer la fertilisation des plants dans les pépinières forestières*. Ministère des Ressources naturelles, Direction de la recherche forestière. Note de recherche forestière n° 111, 8 p. <http://www.mrn.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Gagnon-Jean/Note111.pdf>
- GOODING, M.J. et W.P. DAVIES, 1992. *Foliar urea fertilization of cereals: a review*. Fert. Res. 32 (2): 209-222.
- HANDRECK, K.A. et N.D. BLACK, 1984. *Growing media for ornamental plants and turf*. Kensington, Australia: New South Wales University Press. 401 p.
- LAMHAMED, M.S., H. CHAMBERLAND et F.M. TREMBLAY, 2003. *Epidermal transpiration, ultrastructural characteristics and net photosynthesis of white spruce somatic seedlings in response to in vitro acclimatization*. Physiol. Plant. 118 : 54-561. <http://www.mrn.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Lamhamedi-Mohammed/Physiologia-Plantarum-118.pdf>
- LANDIS, T.D., R.W. TINUS, S.E. McDONALD et J.P. BARNETT, 1989. *Seedling Nutrition and Irrigation. The container tree nursery manual*. Vol. 4, USDA Forest Service, Washington, DC. Agric. Handbook, 119 p.
- LANDIS, T.D., R.K. DUMROESE et D.L. HAASE, 2010. *Seedling Processing, Storage, and Outplanting. The container tree nursery manual*. Vol. 7., USDA Forest Service, Washington, DC. Agric. Handbook, 200 p.

LANGLOIS, C.G. et J. GAGNON, 1993. *A global approach to mineral nutrition based on the growth needs of seedlings produced in forest tree nurseries*. Dans : N. J. Barrow, éd. *Plant Nutrition-From Genetic Engineering to Field Practice*. Proceedings of the 12th International Plant Nutrition Colloquium, 21-26 septembre 1993, Perth, Western Australia. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Pays-Bas : 303-306.

LITTELL, R.C., G.A. MILLIKEN, W.W. STROUP, R.D. WOLFINGER et O. SCHABENBERGER, 2006. *SAS for Mixed Models, Second Edition*. SAS Institute Inc. Cary, NC.

MARSCHNER, H., 1995. *Uptake and release of mineral elements by leaves and other aerial plant*. Dans : *Mineral nutrition of higher plants*. 2nd edition Academic Press. p.116-130.

MENGEL, K. et E.A. KIRKBY, 2001. *Principles of plant nutrition*. Dordrecht, Pays-Bas, Kluwer Academic Publishers. 849 p.

MONTVILLE, M.E. et D.L. WENNY, 1990. *Application of foliar fertilizer during bud initiation treatments to container-grown conifer seedlings*. Dans : Target seedling symposium : proceedings, combined meeting of the Western Forest Nursery Associations, Roseburg, Oregon, USDA Forest Service, Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station, General Technical Report RM-200.

MONTVILLE, M.E., D.L. WENNY et R.K. DUMROESE, 1996. *Foliar fertilization during bud initiation improves container-grown ponderosa pine seedling viability*. West. J. Appl. For. 11 (4) : 114-119.

RAWLUK, C.D.L., G.J. RACZ et C.A. GRANT, 2000. *Uptake of foliar or soil application of 15N-labelled urea solution at anthesis and its affect on wheat grain yield and protein*. Can. J. Plant Sci. 80: 331-334.

VEILLEUX, P., J.Y. ALLARD, F. BART, C. BÉLANGER, M. BOULIANNE, D. LABRECQUE, F.N. PERREAUIT et M. TOURIGNY, 2011. *GUIDE TERRAIN : Inventaire de qualification des plants résineux cultivés en récipients*. Document de travail, Livraison 2011. Direction générale des pépinières et des stations piscicoles (DGPSP). Ministère des Ressources naturelles et de la Faune (MRNF), Québec. 139 p.

WITTWER, S.H. et F.G. TEUBNER, 1959. *Foliar absorption of mineral nutrients*. Annual Rev. of Plant Physiol. 10 : 13-32.

WITTWER, S.H., M.J. BUKOVAC et H.B. TUKEY, 1963. *Advances in foliar feeding of plant nutrients*. Dans : M.H. McVickar, G.L. Bridger et L.B. Nelson (eds). *Fertilizer technology and usage*. Amer. Soc. Agron., Madison, Wis. P. 429-455.

WITTWER, S.H., 1964. *Foliar absorption of plant nutrients*. Advancing frontiers of plant science 8: 161-182.

Réponses morpho-physiologiques des familles d'épinette blanche aux changements climatiques

Delphine Boyer-Groulx^{1,4,5}, Sylvie Carles¹, Mohammed S. Lamhamedi², Jean Beaulieu³, Debbie C. Stowe¹, Hank A. Margolis¹, André Rainville², Pierre-Yves Bernier³ et Jean Bousquet¹



Delphine Boyer Groulx a gradué en sciences forestières à l'Université Laval en 2010 et est membre de l'Ordre des ingénieurs forestiers du Québec. Elle a aussitôt commencé un projet de maîtrise visant à évaluer la plasticité physiologique des familles d'épinette blanche en vue de maximiser la productivité des plantations en réponse aux

changements climatiques. Ce projet, mené conjointement par l'Université Laval, la Direction de la recherche forestière et le Centre de Foresterie des Laurentides, s'insère dans un projet de plus grande envergure qui permettra de caractériser les réponses morpho-physiologiques (croissance, échanges gazeux, statut nutritionnel) de 80 familles biparentales d'épinette blanche (EPB), en réponse à l'augmentation de la concentration en CO₂ et des températures, à l'allongement de la longueur de la saison de croissance et à la combinaison de ces facteurs. L'ensemble de son parcours universitaire se caractérise par une implication sociale et une réussite scolaire remarquables. Ainsi, Delphine a obtenu de nombreuses bourses d'excellence depuis son entrée à l'université, notamment, pour ne citer que les plus récentes, la bourse d'études supérieures de maîtrise Alexander-Graham-Bell du CRSNG et la bourse d'excellence d'Hydro-Québec d'admission à la maîtrise.

Introduction

Les changements climatiques sont une préoccupation mondiale de plus en plus importante. Il s'agit d'un phénomène maintenant reconnu, dont une des principales origines est l'émission de gaz à effet de serre (GES) anthropiques, notamment le dioxyde de carbone (CO₂), le méthane (CH₄) et l'oxyde nitreux (NO₂) (GIEC 2007). Ainsi, en 2005, la concentration en CO₂ atmosphérique (379 ppm) a été la plus élevée depuis les 650 000 dernières années et les prévisions indiquent qu'elle continuera à augmenter dans les prochaines années, pouvant doubler et atteindre 760 ppm d'ici 2100. Cette augmentation des GES depuis 1750 a eu un effet de réchauffement net à l'échelle mondiale qui pourrait se traduire, selon le scénario A₁B du GIEC, par une augmentation de la température de 4,3 °C en moyenne, pour le Canada, d'ici 2100 (GIEC 2000).

Plusieurs études sur les réponses morpho-physiologiques de jeunes arbres à une augmentation de la concentration en CO₂ ou de la température ont été effectuées ces dernières années. Ainsi, CAMPAGNA et MARGOLIS (1989) ont observé une augmentation de la croissance en hauteur et de la biomasse de plants (1+0) d'épinette noire (*Picea mariana* Mill.) exposés, en chambres de croissance, à une concentration de 1000 ppm de CO₂ durant 3 à 6 semaines, 1 mois et 2 mois et demi après la germination. Quelques études ont été aussi effectuées sur l'interaction entre l'augmentation de la concentration en CO₂ et de la température, conséquences associées aux changements climatiques. Par exemple, WERTIN *et al.* (2010) ont observé qu'une augmentation du taux de photosynthèse nette pour des plants (1+0) de *Pinus taeda* L. était due à l'augmentation de la concentration en CO₂ sans que la température n'ait un effet significatif, alors que TJOELKER *et al.* (1998) ont montré que l'augmentation simultanée de la concentration en CO₂ et de la température avait un effet positif sur le taux de croissance relatif de plants (1+0) d'épinette noire. Dans un contexte génétique, BIGRAS (2005) a observé que la réponse photosynthétique de certaines familles d'épinette blanche à la sécheresse, conséquence associée à l'augmentation de la température, pouvait différer. Dans le même esprit, des différences familiales ont été observées sur la croissance des parties aériennes

¹ Centre d'études de la forêt (CEF), Faculté de foresterie, de géographie et de géomatique, Pavillon Abitibi Price, Université Laval, 2405 rue de la Terrasse, Québec (Québec) G1V 0A6

² Direction de la recherche forestière, ministère des Ressources naturelles et de la Faune, 2700 rue Einstein, Québec (Québec) G1P 3W8

³ Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts, 1055 rue du Peps, C. P. 10380, Succ. Sainte Foy, Québec (Québec) G1V 4C7

⁴ delphine.boyer-groulx.1@ulaval.ca

⁵ 418 656-2131 poste 3950

D. Boyer-Groulx, S. Carles, M.S. Lamhamedi, J. Beaulieu, D.C. Stowe, H. A. Margolis, A. Rainville, P.Y. Bernier et J. Bousquet, 2011. *Réponses morpho-physiologiques des familles d'épinette blanche aux changements climatiques*. Dans : Colas, F.; Lamhamedi, M.S. (éds.), 2011. Production de plants forestiers au Québec : la culture de l'innovation. Colloque de transfert de connaissances et de savoir-faire. Carrefour Forêt Innovations, 4-6 octobre 2011, Québec (Canada), 140 p. pp : 107 – 112.

et racinaires de plants (1+0) de 16 familles d'épinette noire soumis à un doublement de la concentration en CO₂ (700 ppm) et une augmentation de la température entre 4 et 5,6 °C (WANG *et al.* 1994). Il reste que peu d'expériences ont été effectuées sur les différences familiales des réponses morpho-physiologiques de plants à l'augmentation simultanée de la concentration en CO₂ et de la température, en particulier dans le cas de l'épinette blanche (*Picea glauca* (Moench) Voss).

Au Québec, la majorité de la récolte de bois ainsi que des efforts de plantation sont effectués en forêt boréale (RAINVILLE *et al.* 2003). En 2008-2009, 37 % des superficies totales coupées ont ainsi été remises en production par la plantation, ce qui représente 74 100 ha. En 2007-2008, 14 % de la superficie résineuse reboisée était composée d'épinette blanche (EPB) (PARENT 2010). En 2010, 98 % des semences d'EPB ensemencées provenaient de sources améliorées génétiquement. Les programmes d'amélioration génétique du Québec visent l'amélioration du rendement des plantations et de la qualité des arbres destinés au reboisement (BEAULIEU *et al.* 2009) dans les conditions actuelles de température et de concentration en CO₂. Toutefois, les plants mis en terre aujourd'hui constitueront les peuplements de demain. Étant donné la longueur de la révolution d'un peuplement d'épinette blanche au Québec [maturité à l'âge de 90 ans (RUEL *et al.* 2009)], il est fort probable que les conditions climatiques au moment de la récolte soient différentes de celles au moment de la plantation. Comme l'épinette blanche présente une variabilité familiale prononcée (LI *et al.* 1997; LI *et al.* 1993), il est important de se demander comment les familles sélectionnées aujourd'hui se comporteront sous des conditions climatiques différentes. Des génotypes d'épinette blanche ayant une grande plasticité pourraient ainsi être identifiés et choisis en priorité afin de produire des plantations bien adaptées aux conditions climatiques futures et ayant le meilleur rendement, même dans des conditions environnementales changeantes.

Objectif général

Évaluer les réponses morpho-physiologiques (croissance, échanges gazeux, caractéristiques morphologiques des aiguilles) de 20 familles biparentales d'épinette blanche à l'augmentation simultanée de la concentration en CO₂ et de la température.

Méthodologie

80 familles biparentales ont été sélectionnées sur la base des résultats des tests âgés de 10 ans comparant 150 familles biparentales obtenues par

croisements dirigés dans le cadre du programme d'amélioration génétique de l'épinette blanche au Québec. Les plants (1+0) ont été produits à la pépinière forestière publique de Saint-Modeste (Long : 69°23'10", Lat : 47°50'10"). Ils ont ensuite été mis en chambre de croissance pour leur deuxième saison de croissance. Quatre traitements ont été appliqués, correspondant à la combinaison de deux niveaux de CO₂ [Ca = ambiant = 380 ppm vs Ce = élevé = 760 ppm correspondant au scénario A1B du GIEC (GIEC 2000)] avec deux régimes de températures [Ta = températures ambiantes calculées à partir de moyennes obtenues de 1990 à 2000 et Te = températures élevées prédites par le consortium Ouranos à partir du modèle climatique régional canadien (RCSCC 2010) pour les années 2090 à 2100, pour une latitude et une longitude choisies en fonction des zones de plantation de l'épinette blanche actuelles et futures - 46,75 N et 74,07 O] (Figure 1). Les plants étaient irrigués trois fois par semaine et fertilisés, individuellement, deux fois par semaine. Le calendrier de fertilisation a été établi à l'aide du logiciel Plantec (GIRARD *et al.* 2001). En moyenne, à la fin de leur première saison de croissance en chambre de croissance, les plants (2+0) avaient une hauteur de 33,3 cm et un diamètre au collet de 6,75 mm. Les plants ont ensuite passé une deuxième saison (leur troisième saison de croissance) en chambre de croissance sous ces mêmes conditions. L'expérience a été répétée de façon décalée dans le temps. Chaque répétition constituait un bloc, pour un total de 2 blocs.

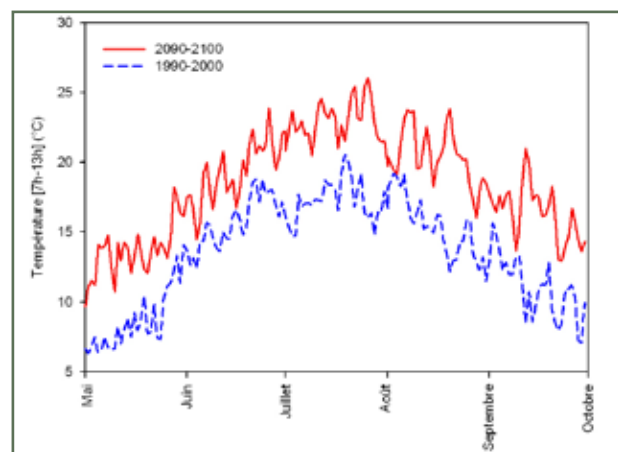


Figure 1. Évolution de la température moyenne quotidienne (entre 7h00 et 13h00) appliquée dans les chambres de croissance.

Les caractéristiques morpho-physiologiques des plants ont été évaluées pour 20 des 80 familles du dispositif au cours de leur troisième saison de croissance (deuxième saison en chambre de croissance). Des mesures d'échanges gazeux (photosynthèse,

transpiration et conductance stomatique à l'eau) ont été réalisées à l'aide du LI-COR 6400 (LI-COR Inc., Lincoln, NE, USA), après 16 semaines en chambre de croissance (Figure 2). Ces mesures ont été effectuées sur des aiguilles lignifiées de l'année présentes sur des rameaux de 5 cm de longueur. La longueur ainsi que la surface foliaire de ces aiguilles ont été déterminées à l'aide du logiciel WinSeedle (Regent Instruments Inc., Québec, Qc). La quantité de cire cuticulaire par surface d'aiguilles a été déterminée, suite à l'extraction à l'aide de chloroforme. La hauteur et le diamètre au collet des plants ont été mesurés au début et à la fin de leur troisième saison de croissance, ce qui a également permis de déterminer la croissance de chaque plant. Les masses sèches des parties aériennes et des racines ont été déterminées après un séchage de 48 h à 60 °C à la fin de l'expérience.

Résultats et discussion

L'application, en chambres de croissance, de traitements de CO₂ et de température sur des plants (3+0) représentant 20 familles biparentales d'EPB s'est traduite par des différences familiales significatives pour : la hauteur, la croissance en hauteur, le diamètre au collet ainsi que les masses sèches des parties aériennes et des racines à la fin de leur troisième saison de croissance (Tableau 1). La différence de hauteur entre la famille la plus grande (moyenne familiale = 60,6 cm) et la famille la plus petite (moyenne familiale = 43,9 cm) était de 16,7 cm, soit une différence de 31 %. Augmenter la température



Figure 2. Mesure d'échanges gazeux sur un plant d'épinette blanche (3+0) dans la chambre de croissance.

Tableau 1. Moyennes familiales minimales et maximales des caractéristiques morpho-physiologiques de plants d'EPB (3+0) représentant 20 familles biparentales (Fam) d'EPB et ayant été soumis à des traitements de température (T) et de CO₂ pendant leur deuxième et troisième saison de croissance en chambres de croissance et résultats des analyses statistiques testant les effets des traitements et de leurs interactions avec les familles.

Caractères	Moyenne familiale		Probabilités				
	minimale	maximale	T	CO ₂	T*CO ₂	Fam	T*CO ₂ *Fam
Morphologie des plants							
Hauteur (cm)	43,9	60,6	n.s.	n.s.	n.s.	**	n.s.
Diamètre (mm)	9,27	12,83	*	**	*	***	n.s.
Croissance en hauteur (cm)	11,6	22,8	n.s.	n.s.	n.s.	**	*
Croissance en diamètre (mm)	2,56	4,05	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
Masse sèche des parties aériennes (g)	17,11	32,68	n.s.	n.s.	n.s.	**	n.s.
Masse sèche des racines (g)	4,62	13,04	*	**	n.s.	***	n.s.
Morphologie des aiguilles							
Quantité de cire épidermique (µg/cm ²)	162,28	264,74	n.s.	n.s.	n.s.	*	n.s.
Longueur moyenne d'une aiguille (mm)	12,60	15,76	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
Surface foliaire projetée par rameau de 5 cm (mm ²)	869,75	1173,44	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
Physiologie des aiguilles							
Photosynthèse (µmol CO ₂ m ⁻² s ⁻¹)	2,18	8,19	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
Transpiration (mol H ₂ O m ⁻² s ⁻¹)	0,00068	0,00159	n.s.	n.s.	n.s.	*	n.s.
Conductance stomatique (mol H ₂ O m ⁻² s ⁻¹)	0,0355	0,0929	n.s.	n.s.	n.s.	*	n.s.

Note : moyennes pour les quatre traitements (combinaison de deux niveaux de CO₂ : actuel = 380 ppm et élevé = 760 ppm et de deux niveaux de température : actuel = moyenne pour 1990-2000 et élevé = température moyenne prédite pour 2090-2100) appliqués à un plant/famille pour 20 familles et 2 blocs; les interactions T*Fam et CO₂*Fam étaient non significatives pour toutes les caractéristiques; n.s. = non significatif, * = significatif au seuil de 5 %, ** = significatif au seuil de 1 %, *** = significatif au seuil de 0,1 %.

et/ou la concentration en CO₂ pendant deux saisons de croissance a eu un effet positif sur le diamètre au collet des plants (3+0) (+1,11 mm), alors que l'accroissement de la température a eu un effet positif sur la masse sèche des racines (Ta 7,49 g *vs* Te 8,88 g), tout comme l'augmentation de la concentration en CO₂ (Ca 7,45 g *vs* Ce 8,92 g). Par ailleurs, l'effet famille observé sur les masses sèches des racines valide la méthodologie de notre expérience, puisque cela signifie que les différences entre les familles ont pu s'exprimer et donc que les cavités dans lesquelles les plants ont poussé n'ont pas ou peu limité leur croissance.

Nos résultats sont en accord avec certains résultats de WANG *et al.* (1994) qui avaient observé des différences familiales pour la hauteur de plants (1+0) de 16 familles d'épinette noire soumis à un doublement de la concentration en CO₂ (700 ppm) et à une augmentation de la température entre 4 et 5,6 °C. Toutefois, ils avaient observé que la hauteur des plants ainsi que la masse sèche des parties aériennes et racinaires étaient significativement augmentées par une augmentation de température et de concentration en CO₂ et n'avaient pas observé de différence familiale pour le diamètre et les masses sèches. D'autres études ont montré des réponses positives de la masse sèche de jeunes plants (EAMUS et JARVIS 1989; TJOELKER *et al.* 1998) suite à la soumission à une concentration en CO₂ deux fois plus élevée ainsi que des effets positifs de l'augmentation simultanée de la concentration en CO₂ et de la température sur le taux de croissance relatif de plants (1+0) d'épinette noire (TJOELKER 1998). Une interaction entre la température, la concentration en CO₂ et les familles a été observée pour la croissance en hauteur pendant la troisième saison de croissance (Tableau 1). Cela signifie que les familles d'épinette blanche sélectionnées ne réagissent pas toutes de la même façon lorsqu'exposées à différents régimes de température et de concentration en CO₂. En moyenne, la croissance en hauteur au cours de la troisième saison de croissance a été de 17,2 cm, avec 11,6 cm pour la famille la plus faible et 22,8 cm pour la famille dont la croissance en hauteur a été la plus élevée. À la concentration en CO₂ actuelle, la croissance en hauteur a tendance à augmenter pour la majorité des familles avec l'augmentation de la température (15 familles sur 20). Par contre, la réponse des familles à l'augmentation de la concentration en CO₂ est plutôt mitigée, c'est-à-dire que 10 familles sur 20 réagissent positivement ou aucunement lorsqu'à température ambiante, alors que 13 familles réagissent positivement ou aucunement lorsqu'à température élevée. La réponse des familles exposées au climat actuel (température et

concentration en CO₂ actuelles) comparativement au climat futur prédit (température et concentration en CO₂ élevées) est également plus nuancée : 7 familles voient leur croissance en hauteur augmenter avec le changement prédit du climat, 2 familles ne réagissent pas et 11 familles voient leur croissance en hauteur diminuer (Figure 3). Somme toute, l'effet d'une augmentation de la température peut être, au niveau familial, complètement différent selon que cette augmentation est appliquée seule ou en combinaison avec une augmentation de CO₂, ce qui confirme l'importance de considérer simultanément les différents paramètres susceptibles d'être modifiés dans le futur (BRUHN 1998 cité par SAXE *et al.* 2001).

L'expérience n'a pas mis en évidence de différences familiales pour les caractéristiques morphologiques des aiguilles des plants d'épinette blanche, à l'exception de la quantité de cire épidermique (Tableau 1). Par contre, des différences familiales ont été observées pour deux des trois caractéristiques physiologiques mesurées : la transpiration ainsi que la conductance stomatique à l'eau (Tableau 1). Ces résultats signifient que les échanges hydriques au niveau des aiguilles peuvent être différents selon la famille considérée. Dans le contexte des changements climatiques où les stress hydriques pourraient être plus fréquents au cours de la saison estivale (GIEC 2007), les familles dont le taux de transpiration est plus faible, pour une même quantité de CO₂ fixé, seront avantagées, puisqu'elles auront une meilleure efficacité d'utilisation de l'eau.

Enfin, augmenter la température et/ou la concentration en CO₂ pendant deux saisons de croissance n'a pas influencé significativement les caractéristiques morphologiques (*longueur, surface*) ou physiologiques (*photosynthèse, transpiration et conductance stomatique à l'eau*) des aiguilles (Tableau 1). Nos résultats sont en accord avec certains résultats de DANG *et al.* (2008) qui n'avaient pas observé d'effets du CO₂ sur la transpiration et la conductance stomatique de plants (1+0) d'EPB après 90 jours de traitements. Par contre, ils avaient observé un effet du CO₂ sur le taux de photosynthèse. Similairement à DANG *et al.* (2008) et contrairement à notre étude, WERTIN *et al.* (2010) avaient montré des effets du CO₂ sur la photosynthèse nette de plants (1+0) de pin à encens (*Pinus taeda*). Ces contradictions peuvent s'expliquer par le fait que ces études ne se sont pas penchées sur les effets sur les caractéristiques morpho-physiologiques de plants de conifères sur plusieurs saisons de croissance. Or, selon CEULEMANS et MOUSSEAU (1994), même si l'augmentation de la concentration en CO₂ a un effet positif sur le taux de photosynthèse à court

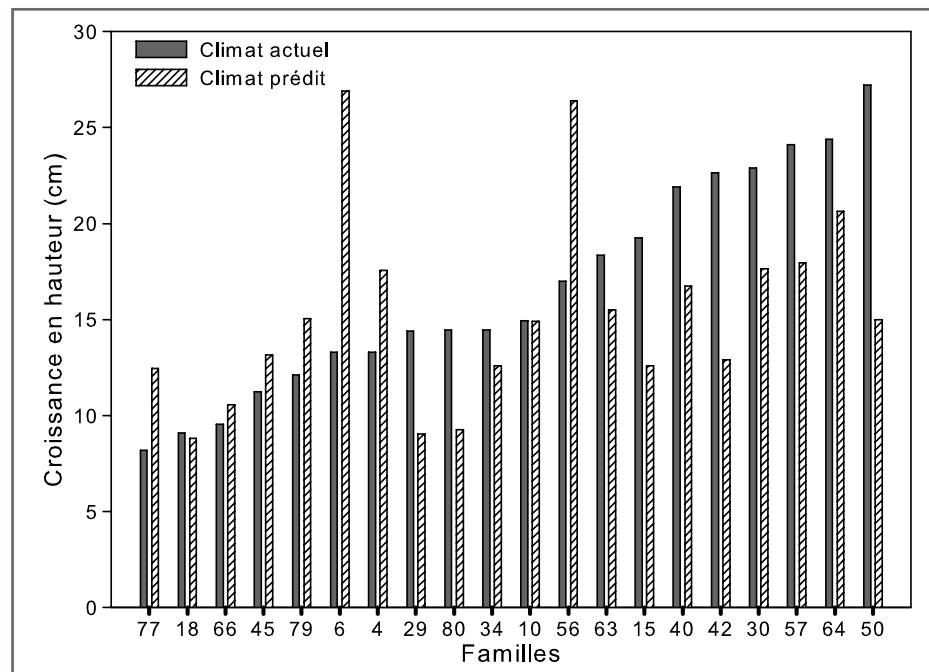


Figure 3. Croissance en hauteur de plants (3+0) de 20 familles biparentales d'EPB exposés à des conditions climatiques actuelles [$\text{CO}_2 = 380$ ppm et Températures moyennes de 1990 à 2000] ou futures prédites [$\text{CO}_2 = 760$ ppm et Températures moyennes de 2000 à 2100] pendant leur deuxième puis leur troisième saison de croissance. La croissance en hauteur a été obtenue en faisant la différence, puis la moyenne, entre la hauteur mesurée à la fin de la troisième saison de croissance et celle mesurée au début de la même saison de croissance sur 4 plants par famille et par traitement.

terme, ce taux a tendance à s'acclimater à plus long terme. Par ailleurs, certains conifères, notamment l'épinette blanche (CORTINI *et al.* 2011), auraient tendance à manifester des réponses décalées dans le temps, c'est-à-dire que le climat de l'année précédente influencerait certaines réponses morpho-physiologiques, car ce sont les conditions dans lesquelles les bourgeons se sont formés (CHHIN *et al.* 2008). Cela pourrait expliquer l'absence d'effet de CO_2 sur le taux de photosynthèse observé dans notre étude et valide notre méthode de mesure des caractéristiques morpho-physiologiques sur des plants d'EPB au cours de leur deuxième saison de croissance sous traitement. Ainsi, nos résultats reflètent davantage les réponses de ces plants à plus long terme face aux changements climatiques.

Conclusion

Selon les résultats de notre étude, les familles d'épinette blanche ne sont pas toutes équivalentes en termes de réponses morpho-physiologiques. Par contre, il n'y a pas eu d'interaction entre les familles et l'augmentation de la température et/ou de la concentration du CO_2 , à l'exception de la croissance en hauteur. Cela signifie que les familles ne réagissent pas différemment en réponse aux changements climatiques, et que, par conséquent, le rang entre les familles n'est pas modifié. Ainsi, les meilleures familles actuellement sélectionnées dans le cadre du

programme d'amélioration génétique de l'épinette blanche devraient rester supérieures dans les conditions climatiques futures prédites.

Références

- BEAULIEU, J., G. DAOUST, A. DESHAIES, M.S. LAMHAMED, A. RAINVILLE et M. TOURIGNY, 2009. *Amélioration génétique des arbres, gestion des vergers à graines et de semences, et production de plants forestiers*. Dans Manuel de foresterie, 2^e éd. Ed. Ordre des Ingénieurs Forestiers du Québec. Ouvrage collectif, Éditions Multimondes, Québec, p. 1093-1146.
- BIGRAS, F.J., 2005. *Photosynthetic response of white spruce families to drought stress*. New For 29: 135-148.
- CAMPAGNA, M.A. et H.A. MARGOLIS, 1989. *Influence of short-term atmospheric CO_2 enrichment on growth, allocation patterns, and chemistry of black spruce seedlings at different stages of development*. Can. J. For. Res. 19: 773-782.
- CEULEMANS, R. et M. MOUSSEAU, 1994. *Tansley review n°. 71. Effects of elevated atmospheric CO_2 on woody plants*. New Phytol. 127: 425-446.
- CHHIN, S., E.H.T. HOGG, V.J. LIEFFERS et S. HUANG, 2008. *Potential effects of climate change on the growth of lodgepole pine across diameter size classes and ecological regions*. For. Ecol. and Manage. 256: 1692-1703.
- CORTINI, F., P.G. COMEAU, J.O. BOATENG, L. BEDFORD, J. MCCLARNON et A. POWELSON, 2011. *Effects of climate on growth of lodgepole pine and white spruce following site preparation and its implications in a changing climate*. Can. J. For. Res. 41: 180-194.

DANG, Q.-L., J.M. MAEPEA et W.H. PARKER, 2008. *Genetic variation of ecophysiological responses to CO₂ in Picea glauca seedlings*. The Open Forest Science Journal 1: 68-79.

EAMUS, J. et P. G. JARVIS, 1989. *The direct effects of increase in the global atmospheric CO₂ concentration on natural and commercial temperate trees and forests*. Advances in Ecological Research 19: 55 p.

GIEC (GROUPE D'EXPERTS INTERGOUVERNEMENTAL SUR L'ÉVOLUTION DU CLIMAT) 2007. *Bilan 2007 des changements climatiques*. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. 103 p.

GIEC. 2000. *Rapport spécial du groupe de travail III du GIEC - Scénarios d'émissions* - Résumé à l'intention des décideurs. Publié par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. 27 p.

GIRARD, D., J. GAGNON et C.-G. LANGLOIS, 2001. *Plantec : un logiciel pour gérer la fertilisation des plants dans les pépinières forestières*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles, Direction de la recherche forestière, Sainte-Foy, Québec. Note de recherche forestière n° 111. 8 p.

LI, P., J. BEAULIEU et J. BOUSQUET, 1997. *Genetic structure and patterns of genetic variation among populations in eastern white spruce (Picea glauca)*. Can. J. For. Res. 27: 189-198.

LI, P., J. BEAULIEU, A. CORRIVEAU et J. BOUSQUET, 1993. *Genetic variation in juvenile growth and phenology in a white spruce provenance-progeny test*. Silv. Genet. 42: 52-60.

PARENT, B., 2010. *Ressources et industries forestières - Portrait statistique juin 2009*. Gouvernement du Québec - Ministère des Ressources naturelles et de la Faune - Direction du développement de l'industrie des produits forestiers. 498 p.

RAINVILLE, A., M. DESPONT, R. BEAUDOIN, P. PÉRINET, M.-J. MOTTET et M. PERRON, 2003. *L'amélioration des arbres au Québec : un outil de performance industrielle et environnementale*. Ministère des Ressources naturelles et de la Faune et des Parcs du Québec, Direction de la recherche forestière. Note de recherche forestière n° 127. 8 p.

RCSCC. 2010. *Réseau canadien des scénarios de changements climatiques, modèles climatiques régionaux*. Consulté au <http://cccsn.ca/?page=rcm&lang=fr>

RUEL, J.-C., R. DOUCET, S. JUTRAS, G. LESSARD, M. PINEAU, G. PRÉSENT et N. THIFFAULT 2009. *Sylviculture appliquée*. Dans Manuel de foresterie, 2^e éd. Ed. Ordre des Ingénieurs Forestiers du Québec. Ouvrage collectif, Éditions Multimondes, Québec. p. 1149-1186.

SAXE, H., M.G.R. CANNELL, O. JOHNSEN, M.G. RYAN et G. VOURLITIS, 2001. *Tansley review n°. 123. Tree and forest functioning in response to global warming*. New Phytol. 149: 369-400.

TJOELKER, M.G., J. OLEKSYN et P.B. REICH, 1998. *Seedlings of five boreal tree species differ in acclimation of net photosynthesis to elevated CO₂ and temperature*. Tree Physiol. 18: 715-726.

WANG, Z.M., M.J. LECHOWICZ et C. POTVIN, 1994. *Early selection of black spruce seedlings and global change: which genotypes should we favor?* Ecological Applications 4: 604-616.

WERTIN, T.M., M.A. MCGUIRE et R.O. TESKEY, 2010. *The influence of elevated temperature, elevated atmospheric CO₂ concentration and water stress on net photosynthesis of loblolly pine (Pinus taeda L.) at northern, central and southern sites in its native range*. Global Change Biology 16 : 2089-2103.

Existe-t-il des différences entre les vergers à graines d'épinette blanche quant à leurs effets sur la croissance racinaire des plants (2+0) en pépinière forestière ?

Sylvie Carles^{1,4,5}, Mohammed S. Lamhamedi², Jean Beaulieu³, Debbie C. Stowe¹ et Hank A. Margolis¹



Sylvie Carles a obtenu un diplôme d'ingénieur forestier à la Formation des Ingénieurs Forestiers de l'École Nationale du Génie Rural des Eaux et Forêts (FIF-ENGREF) à Nancy (France) en 1996. Jusqu'en 2001, elle a enseigné, en France, les sciences et techniques forestières. De 2002 à 2004, elle a réalisé une maîtrise, à l'Université Laval, sur l'effet de différentes régies d'irrigation sur

l'acquisition de la tolérance au gel de plants d'épinette blanche (2+0). De 2004 à 2007, après un passage direct au doctorat, elle a mené un projet portant sur la variabilité génétique des caractéristiques morphologiques et physiologiques de plants d'EPB (1+0) et (2+0). Ensuite, à partir de 2007, et parallèlement à la rédaction de sa thèse, Sylvie a activement participé à l'élaboration et à la conduite d'un projet visant à évaluer la plasticité physiologique des familles d'EPB en vue de maximiser la productivité des plantations en réponse aux changements climatiques. Ce projet s'intègre dans le cadre de son stage post-doctoral depuis l'obtention de sa thèse en août 2010. Il est mené conjointement par l'Université Laval, la Direction de la recherche forestière et le Centre de Foresterie des Laurentides et permettra de caractériser les réponses morpho-physiologiques (croissance, échanges gazeux, statut nutritionnel) de 80 familles biparentales d'EPB, à l'augmentation de la teneur en CO₂ et des températures, à l'allongement de la longueur de la saison de croissance et à la combinaison de ces facteurs. Enfin, depuis 2004, en plus de ses travaux de recherche et de ses études, elle enseigne la section reboisement du cours de sylviculture du Baccalauréat en aménagement et environnement forestiers de l'Université Laval; elle dirige des projets de fin d'étude d'étudiants au Baccalauréat en aménagement et environnement forestiers et participe à l'encadrement d'étudiants à la maîtrise en sciences forestières à l'Université Laval.

Introduction

L'épinette blanche (EPB) (*Picea glauca* [Moench] Voss) est une des principales essences forestières utilisée en reboisement au Québec. Depuis quelques années, près de 25 millions de plants d'EPB sont produits, en moyenne, dans les pépinières forestières du Québec. Entre 1983 et 1991, pour répondre aux besoins en semences améliorées, 17 vergers à graines de première génération d'épinette blanche ont été établis au Québec (RAINVILLE et BEAULIEU 2007). Pour respecter les règles de transfert de semences (BEAULIEU *et al.* 2009) et pour tenir compte de l'adaptation des peuplements d'EPB aux conditions climatiques de leur région d'origine (ANDALO *et al.* 2005), chaque verger à graines a été établi en prenant en considération le territoire où les semences améliorées seraient utilisées (LAMONTAGNE 1992). En 2010, 98 % des semences d'EPB ensemencées provenaient de ces vergers à graines.

La majorité (~ 75%) des plants d'EPB produits au Québec sont cultivés pendant au moins deux saisons de croissance en pépinière forestière pour atteindre le gabarit des plants de fortes dimensions (PFD). Les PFD d'EPB sont des plants dont la hauteur est supérieure ou égale à 35 cm (VEILLEUX *et al.* 2010). Avant leur mise en terre sur les sites de reboisement, soit au début de leur troisième saison de croissance, les PFD doivent, comme tous les plants résineux cultivés en récipients, respecter les critères et les normes de qualité définis dans les clauses contractuelles spécifiques à la production de plants forestiers au Québec (VEILLEUX *et al.* 2010). Parmi ces différents critères et normes de qualité, c'est l'insuffisance racinaire qui a été, ces dernières années, le défaut le plus fréquent chez les PFD d'EPB, avec une moyenne, pour les années 2005 à 2010, de 5,1 % des PFD d'EPB qui présentaient une insuffisance racinaire (MICHÈLE TOURIGNY, DGSP, communication personnelle, 2011). Selon les normes actuellement en vigueur, l'insuffisance racinaire se caractérise par une trop faible quantité de racines vivantes et s'évalue principalement par le degré de colonisation de la carotte de tourbe (VEILLEUX *et al.* 2010). Le système racinaire doit être suffisamment développé pour assurer une cohésion de la carotte de tourbe telle qu'elle permette son extraction complète de la cavité et qu'elle résiste aux

¹ Centre d'études de la forêt (CEF), Faculté de foresterie, de géographie et de géomatique, Pavillon Abitibi Price, Université Laval, 2405 rue de la Terrasse, Québec (Québec) G1V 0A6

² Direction de la recherche forestière, ministère des Ressources naturelles et de la Faune, 2700 rue Einstein, Québec (Québec) G1P 3W8

³ Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts, 1055 rue du Peps, C. P. 10380, Succ. Sainte-Foy, Québec (Québec) G1V 4C7

⁴ sylvie.carles@sbf.ulaval.ca

⁵ 418-656-2629

S. CARLES, M.S. LAMHAMEDI, J. BEAULIEU, D. C. STOWE et H. A. MARGOLIS, 2011. Existe-t-il des différences entre les vergers à graines d'épinette blanche quant à leurs effets sur la croissance racinaire des plants (2+0) en pépinière forestière? Dans : Colas, F.; Lamhamedi, M.S. (éds.), 2011. Production de plants forestiers au Québec : la culture de l'innovation. Colloque de transfert de connaissances et de savoir-faire. Carrefour Forêt Innovations, 4-6 octobre 2011, Québec (Canada), 140 p. pp : 113 – 118.

manipulations normales qui accompagnent la mise en terre du plant (VEILLEUX *et al.* 2010).

Comparant 127 provenances ontariennes et de l'Ouest du Québec, LESSER et PARKER (2004) ont trouvé que le diamètre de plants d'EPB, après deux saisons de croissance en serre ou dans cinq tests sur le terrain, montrait des différences significatives entre les provenances. Or, le diamètre au collet de plants (1+0) et (2+0) représentant 75 familles uni-parentales d'EPB et produits pendant deux saisons de croissance en pépinière forestière a été trouvé comme étant corrélé significativement et positivement à la masse sèche de leur racines (CARLES 2010). De plus, OLEKSYN *et al.* (2001) ont observé que les populations nordiques de pin sylvestre (*Pinus sylvestris* L.), qui stoppent leur croissance en hauteur un peu plus tôt à l'automne, allouaient proportionnellement plus de biomasse à leurs racines. Les standards de croissance actuellement utilisés au Québec par les pépiniéristes et le logiciel *Plantec*, qui permet de gérer et d'ajuster la fertilisation des plants en pépinière (LANGLOIS et GAGNON 1993), ne tiennent pas compte de l'origine des semences. Ces standards ont été obtenus en considérant des plants produits dans différentes pépinières. Puisque le diamètre et la hauteur sont des caractéristiques facilement mesurables et de façon non destructive à une échelle opérationnelle, il serait intéressant de déterminer si la croissance en diamètre et/ou en hauteur de plants (2+0) d'EPB cultivés en pépinière forestière diffèrent selon les vergers dont sont issues les semences, et si ces différences sont présentes au niveau de la masse sèche des racines.

Objectifs de notre étude

En cultivant des PFD d'EPB dans la même pépinière forestière et selon la même régie de culture, les objectifs de notre étude étaient :

- de déterminer si les lots de semences issues des différents vergers à graines d'EPB pourraient engendrer des différences significatives en matière de croissance des racines,
- et d'élaborer des standards de croissance spécifiques aux vergers à graines sur des bases scientifiques solides à la portée du pépiniériste et qui pourraient être intégrés dans le logiciel *Plantec II*.

Méthodologie

Des semences provenant des dix vergers à graines (Ve) d'EPB les plus utilisés au Québec ont été testées (Tableau 1; Figure 1). Les vergers à graines ont été numérotés de 1 à 10 par ordre de latitude croissante.

Trois catégories de vergers pouvaient être différenciées en fonction de la façon dont ils ont été établis au moment de leur création :

1. Les vergers clonaux (Ve 5, 7, 8, 9 et 10) ont été établis avec des plants greffés dont les greffons ont été prélevés sur des arbres phénotypiquement supérieurs sélectionnés sur une base régionale dans les beaux peuplements naturels et les plus vieilles plantations réussies sur le territoire desservi par le futur verger à graines (= processus de sélection massale) (LAMONTAGNE 1992; RAINVILLE et BEAULIEU 2007)
2. Le verger « éclairci » (Ve 4) est constitué de familles uni-parentales et a subi une éclaircie génétique au milieu des années 1990 au cours de laquelle seulement 66 des 171 familles ont été conservées (ANDRÉ DESHAIES, DGPSP, communication personnelle, 2010)
3. Les vergers « composites » (Ve 1, 2, 3 et 6) ont été établis avec des plants greffés avec des greffons prélevés sur des arbres phénotypiquement supérieurs sur une base régionale dans les beaux peuplements naturels mais aussi sur un nombre variable d'arbres sélectionnés sur la base des résultats des tests de provenances établis dans les années 60 par le Service canadien des forêts (DAOUST et BEAULIEU 1993; LAMONTAGNE 1992).

Chaque verger était représenté par un ensemble de semences issues de pollinisation libre, récoltées en 2003 pour tous les vergers sauf le Ve 1 dont les semences avaient été récoltées en 2002.

L'expérience en pépinière a été réalisée de juin 2004 à octobre 2005 au Centre de production de plants forestiers du Québec situé à Sainte-Anne-de-Beaupré. Le dispositif a été installé sous un tunnel dont la toile a été maintenue pendant la première saison de croissance seulement. L'ensemencement a été réalisé la semaine du 7 juin 2004 dans des récipients IPL 15-320 (15 cavités par récipient, 320 cm³ par cavité; IPL®, Saint-Damien de Bellechasse, Québec) dans un mélange de tourbe vermiculite (3:1). Pour chaque verger, 120 récipients ont été répartis dans un dispositif en six blocs aléatoires complets (20 récipients par bloc et par verger). La teneur en eau du substrat a été maintenue à un niveau proche de 40 % (v/v) pendant les deux saisons de croissance. Au cours de leur 1^{ère} saison de croissance, les plants ont été fertilisés du 7 juillet 2004 au 27 septembre 2004. La quantité totale de N, P et K appliquée sur l'ensemble de la première saison de croissance était, respectivement, 60,7, 19,7 et 38,1 mg/plant. Au cours de leur 2^{de} saison de croissance, les plants ont été fertilisés du 10 mai au 22 septembre 2005. La quantité totale de N, P et K appliquée sur l'ensemble de la deuxième saison de croissance était, respectivement, 402,3, 99,8 et 154,2 mg/plant.

Tableau 1. Nom, nombre de clones, origine des arbres semenciers, latitude, longitude et altitude des 10 vergers à graines d'EPB les plus utilisés au Québec.

Verger à graines	Nombre de clones	Origine des arbres semenciers (%)		Lat. (°N)	Long. (°O)	Alt. (m)	Domaine et sous-domaine bioclimatique (Est-E ou Ouest-O)
		Sélection massale	Sélection génétique				
1. Verchères	203	53	47 ⁽¹⁾	45,76	73,45	40	Érablière à caryer cordiforme
2. Cleveland	224	82	18 ⁽¹⁾	45,81	72,10	250	Érablière à tilleul - E
3. Aubin de l'Isle - 1	355	73	27 ⁽¹⁾	46,33	70,69	285	Érablière à bouleau jaune - E
4. Aubin de l'Isle - 3	66	0	100 ⁽²⁾	46,35	70,67	292	
5. Fontbrune	189	100	0	46,97	75,76	150	Érablière à bouleau jaune - O
6. Estcourt	200	93	7 ⁽¹⁾	47,63	69,23	261	Sapinière à bouleau jaune - E
7. Desroberts	204	100	0	47,96	78,20	312	Sapinière à bouleau blanc - O
8. Labrosse	239	100	0	48,39	70,08	107	Sapinière à bouleau jaune - E
9. Robidoux	175	100	0	48,43	65,59	90	
10. Falardeau	202	100	0	48,70	71,22	172	

¹ Arbres sélectionnés sur la base des résultats des tests de provenances établis dans les années 60 par le Service canadien des forêts (DAoust et BEAULIEU 1993; LAMONTAGNE 1992)

² Verger constitué de 171 familles uni-parentales puis éclairci à 66 familles en 1994 (André Deshaies, DGSP, communication personnelle, 2010).

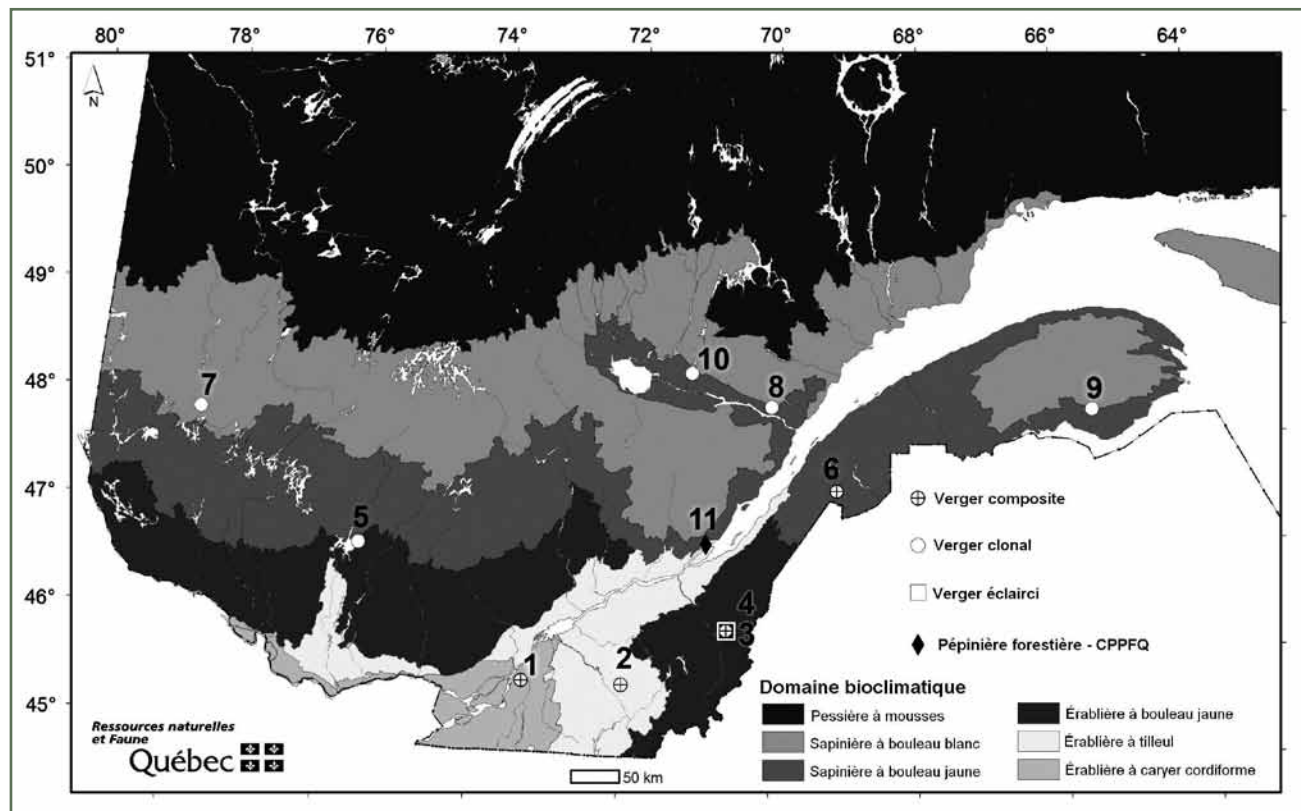


Figure 1. Situation géographique des vergers à graines d'épinette blanche où les graines ont été récoltées et localisation de la pépinière forestière où les plants ont été cultivés. Les vergers à graines ont été numérotés de 1 à 10 selon un ordre de latitude croissante.

Après un pré-échantillonnage réalisé le 10 mai 2005, un échantillonnage destructif a été réalisé toutes les deux semaines entre le 20 juin et le 10 octobre 2005. Après avoir mesuré la hauteur et le diamètre au collet de cinq plants par verger et par bloc (30 plants/verger), les masses des parties aériennes et des racines étaient déterminées après un séchage de 48 h à 65 °C. Les concentrations en éléments minéraux (N, P, K, Ca et Mg) dans les parties aériennes et dans les racines ont été déterminées à partir d'un échantillon composite regroupant les cinq plants par verger par bloc. Les résultats concernant les analyses minérales ne seront pas détaillés ici mais ont été décrits dans CARLES *et al.* (2011).

Les standards de croissance en hauteur ont été établis en utilisant un modèle logistique (LAMHAMEDI *et al.* 2007; RWEYONGEZA *et al.* 2004) :

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

Où Y est la hauteur à la date *jour*, exprimée en jours juliens, a est la hauteur totale du plant à la fin de la saison de croissance (soit l'asymptote de la courbe), e est la base du logarithme népérien, c est une composante du taux de croissance et b est la date, en jours juliens, à laquelle la moitié de la hauteur finale a été atteinte (soit le point d'inflexion de la courbe) (CHUINE *et al.* 2001).

Une courbe a été ajustée pour chacun des 30 plants issus de chaque verger. Une analyse de variance a ensuite été réalisée afin de déterminer si les paramètres des standards de croissance ainsi obtenus présentaient des différences significatives entre les vergers. Une analyse de regroupement a également été réalisée en considérant simultanément les moyennes par verger des trois paramètres (a , b et c) des standards de croissance afin de déterminer si les vergers pouvaient être regroupés sur la base de patrons de croissance semblables.

Une autre analyse de variance a été réalisée en considérant les mesures prises à la fin de la deuxième saison de croissance, afin de déterminer si les caractéristiques morphologiques (*hauteur, diamètre, masses sèches des parties aériennes et des racines*) des plants (2+0) présentaient des différences significatives entre les vergers. Enfin, une dernière série d'analyses de regroupement a été réalisée en considérant simultanément les moyennes par verger de chaque caractéristique afin de déterminer si les vergers pouvaient être regroupés sur la base des caractéristiques morphologiques des plants qui en sont issus.

Résultats et discussion

L'ensemencement tardif (7 juin 2004) au début de la première année s'est traduit par une hauteur à la

fin de la première et au début de la deuxième saison de croissance relativement faible (*Hauteur moyenne* = 4,9 cm; $n=300$ plants) (Figure 2a). Cela peut expliquer que, à la fin de la deuxième saison de croissance (10 octobre 2005), la hauteur moyenne atteignait 32 cm ($n=300$) (LAMHAMEDI 2006).

Les standards de croissance en hauteur ont mis en évidence qu'il existait des différences significatives entre les vergers à graines pour deux des trois paramètres des courbes : le paramètre a , soit la hauteur finale atteinte en fin de saison de croissance et le paramètre b , soit la date à laquelle la moitié de cette hauteur finale a été atteinte. Par contre, le paramètre c , composante du taux de croissance, ne différait pas de façon significative entre les vergers à graines. Ces résultats montrent que les différences significatives de hauteur finale (paramètre a) observées entre les vergers à graines ne résultaient pas de différences du taux de croissance (paramètre c) mais de différences dans le moment où la croissance en hauteur a commencé à ralentir (paramètre b) (Figure 2b) (LESSER et PARKER 2004; LI *et al.* 1993). La croissance en hauteur des plants issus des vergers des domaines bioclimatiques de l'érablière a en effet ralenti plus tard, du fait, vraisemblablement, d'une réponse différente aux mêmes longueurs de photopériode : les plants issus des vergers du sud répondant à une photopériode plus courte (OLEKSYN *et al.* 1992). Une différence d'une semaine entre le ralentissement de la croissance en hauteur des plants représentant les vergers les plus au nord et le ralentissement des plants représentant les vergers les plus au sud s'est traduite par une différence de 6 cm (20 %) dans la hauteur finale atteinte par les plants à la fin de leur seconde saison de croissance (Figure 2c).

À la fin de la 2^{de} saison de croissance (10 octobre) aucun des plants échantillonnés ($n = 300$) ne présentait un problème d'insuffisance racinaire et aucune différence significative entre les vergers n'a été observée pour le diamètre ou la masse sèche des racines (Figure 3). Par contre, des différences significatives entre les vergers ont été observées pour la hauteur, la masse sèche des parties aériennes et le rapport entre la masse des parties aériennes et la masse des racines des plants. Deux groupes de vergers ont pu être différenciés en rassemblant les vergers avec des hauteurs et des masses sèches des parties aériennes semblables. Mis à part deux vergers à graines, les deux groupes obtenus correspondaient à deux grands domaines bioclimatiques : les vergers à graines situés dans les domaines de l'érablière (Ve1, 2, 3, 4 et 6) (Tableau 1) produisant les plants les plus hauts avec, proportionnellement, moins de racines (OLEKSYN *et al.* 2001).

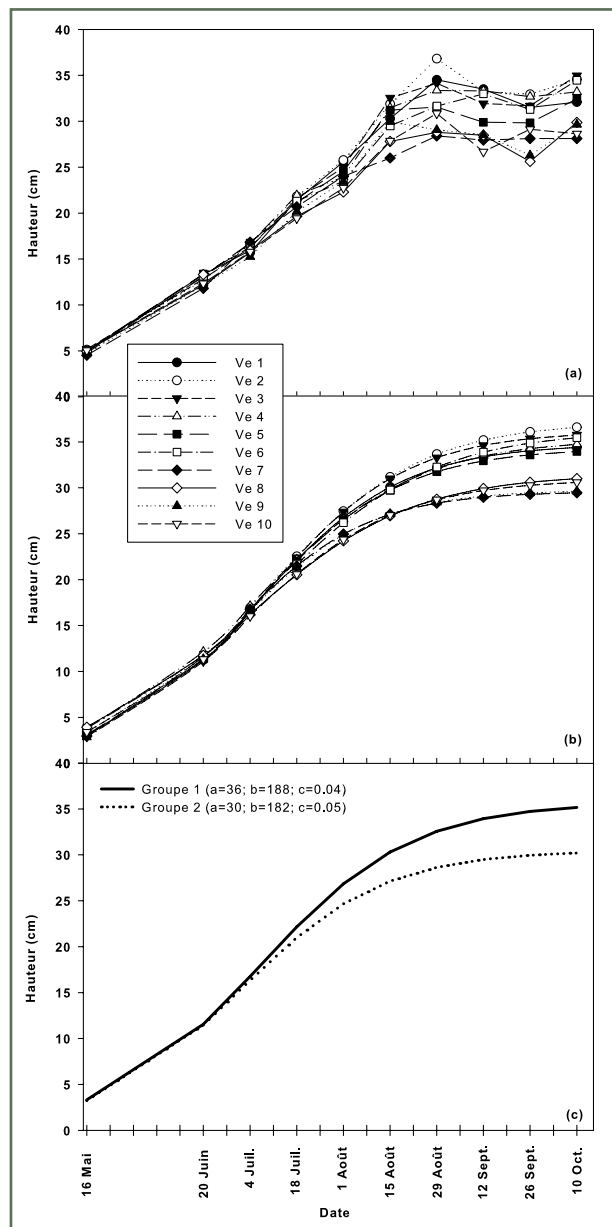


Figure 2. Évolution de la hauteur de plants d'EPB représentant 10 vergers à graines pendant leur deuxième saison de croissance en pépinière. Les vergers à graines ont été numérotés de 1 à 10 par ordre de latitude croissante. Les courbes de chaque verger ont été représentées à l'aide des valeurs mesurées (a - chaque point est la moyenne de 30 plants), des valeurs modélisées par une fonction logistique ajustée pour chaque verger (b) ou au sein des groupes établis en considérant les trois paramètres des standards de croissance, établis selon un modèle logistique (c).

Conclusion et mise en application des résultats à une échelle opérationnelle

En conclusion, il n'existe pas de différences entre les vergers à graines d'épinette blanche quant à leurs effets sur la croissance racinaire des plants (2+0)

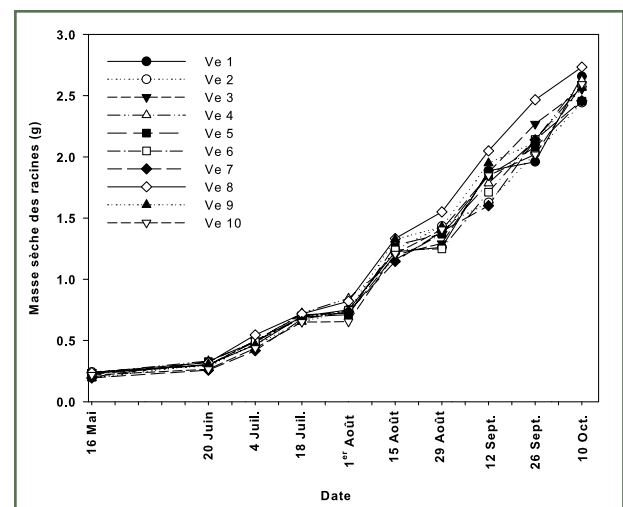


Figure 3. Évolution de la masse sèche des racines de plants d'EPB représentant 10 vergers à graines pendant leur deuxième saison de croissance en pépinière. Les vergers à graines ont été numérotés de 1 à 10 par ordre de latitude croissante. Chaque point est la moyenne de 30 plants.

en pépinière forestière. D'autre part, l'observation carotte par carotte de 300 plants (2+0) n'a permis d'observer aucun problème d'insuffisance racinaire quel que soit le verger d'origine considéré.

Par ailleurs, cette étude a permis de générer des standards de croissance spécifiques à chaque verger à graines et facilement utilisables par les pépiniéristes qui pourront en réajuster les paramètres *a* (hauteur finale à la fin de la saison de croissance) et *b* (date à laquelle, en jours juliens, la moitié de cette hauteur finale a été atteinte) en fonction des observations propres à leurs régions écologiques et leurs régies de culture.

Enfin, les résultats de cette étude suggèrent qu'une des mesures pour favoriser la croissance des racines pourrait être une interruption prématurée de la croissance en hauteur des plants par des traitements de jours courts à la fin de la seconde saison de croissance, traitements déjà appliqués avec succès pour augmenter la masse des racines de plants d'épinette noire (EPN) (1+0) (LAMHAMED *et al.* 2009). Afin de pouvoir appliquer un tel traitement tout en atteignant les hauteurs cibles pour des PFD d'EPB, il sera important de maximiser la croissance en hauteur pendant la première saison de croissance en, notamment, réalisant l'ensemencement le plus tôt possible au printemps (LAMHAMED 2006). Par ailleurs, si un traitement de jours courts était envisagé, sa définition devrait tenir compte du verger à graines d'où viennent les semences à ens semencer, mais sans toutefois les considérer individuellement. En effet, les vergers à graines d'EPB ont pu être regroupés en deux grands

groupes sur la base des caractéristiques aériennes des plants (2+0) : un pour les domaines de la sapinière et un autre pour les domaines de l'érablière. C'est pourquoi, au lieu de considérer chaque verger individuellement, on pourrait envisager d'affiner les pratiques culturales en tenant compte du domaine bioclimatique (érablière vs sapinière) où est situé le verger.

Références

- ANDALO, C., J. BEAULIEU et J. BOUSQUET, 2005. *The impact of climate change on growth of local white spruce populations in Québec, Canada*. For. Ecol. Manag. 205 : 169-182.
- BEAULIEU, J., G. DAOUST, A. DESHAIES, M.S. LAMHAMED, A. RAINVILLE et M. TOURIGNY 2009. *Amélioration génétique des arbres, gestion des vergers à graines et de semences, et production de plants forestiers*. Dans Manuel de foresterie, 2e éd. Ed. Ordre des Ingénieurs Forestiers du Québec. Ouvrage collectif, Éditions Multimondes, Québec, p. 1093-1146.
- CARLES, S. 2010. *Tolérance au gel et architecture des racines en relation avec l'irrigation et la variabilité génétique des plants d'épinette blanche* - Ph. D. Thesis. Dans Département des sciences du bois et de la forêt - Faculté de foresterie, de géographie et de géomatique. Université Laval, Québec, 181 p.
- CARLES, S., M.S. LAMHAMED, J. BEAULIEU, D.C. STOWE et H.A. MARGOLIS 2011. *Differences in growth and mineral nutrition of seedlings produced from ten white spruce seed orchards*. New For. 42: 195-214.
- CHUINE, I., S.N. AITKEN et C.C. YING 2001. *Temperature thresholds of shoot elongation in provenances of Pinus contorta*. Can. J. For. Res. 31 : 1444-1455.
- DAOUST, G. et J. BEAULIEU 1993. *Proceedings of the one-day symposium on research and development work on the genetics of white spruce in Quebec* - Information Report LAU-X-105B. Ressources naturelles Canada - Service canadien des forêts - Région du Québec, Centre de Foresterie des Laurentides, 55 p.
- LAMHAMED, 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 4e atelier sur la production de plants forestiers au Québec - Facteurs et techniques culturales influençant le développement racinaire des plants en pépinière forestière. Gouvernement du Québec - Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Sainte-Foy, Québec, p. 4-5.
- LAMHAMED, M.S., M. RENAUD, P. DESJARDINS et L. VEILLEUX 2007. *Early selection and clonal variation of hybrid poplar clones in a Québec forest nursery*. Dans Poplar culture: a collaborative effort from clone to mill - 2007 Annual Meeting of the Poplar Council of Canada. Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Rivière-du-Loup et Québec, p. 51-53.
- LAMHAMED, M.S., M. RENAUD, P. DESJARDINS et L. VEILLEUX 2009. *Mise à l'échelle opérationnelle du traitement hâtif de jours courts sur la morpho-physiologie et l'insuffisance racinaire des plants d'épinette noire (1+0) produits en tunnel* - Mémoire de recherche forestière n° 154. Gouvernement du Québec - Ministère des Ressources naturelles et de la Faune - Direction de la recherche forestière, Québec, 48 p.
- LAMONTAGNE, Y. 1992. *Vergers à graines de première génération et tests de descendances implantés au Québec pour les espèces résineuses. Bilan des réalisations* - Mémoire de recherche forestière n° 106. Gouvernement du Québec - Ministère des Forêts - Direction de la recherche, 40 p.
- LANGLOIS, C.G. et J. GAGNON 1993. *A global approach to mineral nutrition based on the growth needs of seedlings produced in forest tree nurseries*. Dans Plant nutrition - from genetic engineering to field practice Ed. N.J. Barrow. Kluwer Academic Publishers, p. 303-306.
- LESSER, M.R. et W.H. PARKER 2004. *Genetic variation in Picea glauca for growth and phenological traits from provenance tests in Ontario*. Silvae Genet. 53 : 141-148.
- LI, P., J. BEAULIEU, A. CORRIVEAU et J. BOUSQUET 1993. *Genetic variation in juvenile growth and phenology in a white spruce provenance-progeny test*. Silvae Genet. 42 : 52-60.
- OLEKSYN, J., P.B. REICH, M.G. TJOELKER et W. CHALUPKA 2001. *Biogeographic differences in shoot elongation pattern among European Scots pines populations*. For. Ecol. Manag. 148 : 207-220.
- OLEKSYN, J., M.G. TJOELKER et P.B. REICH 1992. *Growth and biomass partitioning of populations of European Pinus sylvestris L. under simulated 50° and 60° N daylengths: evidence for photoperiodic ecotypes*. New Phyt. 120 : 561-574.
- RAINVILLE, A. et J. BEAULIEU 2007. *Tirer profit d'une espèce à haut rendement : 40 années d'efforts intégrés et continus en amélioration génétique de l'épinette blanche*. Dans Colloque de transfert de connaissances - Des plants aux plantations : techniques, technologies et performances. Gouvernement du Québec, Québec, Canada, p. 7-10.
- RWEYONGEZA, D.M., F.C. YEH et N.K. DHIR 2004. *Genetic parameters for seasonal height growth curves of white spruce seedlings and their implications to early selection*. For. Ecol. Manag. 187 : 159-172.
- VEILLEUX, P., A. BONNEAU, J.-P. GIRARD, L. LABRECQUE, R. LEVER, J. LORTIE, F. -N. PERREAULT et M. TOURIGNY 2010. *Guide terrain. Inventaire de qualification des plants résineux cultivés en récipient, document de travail, livraison 2010*. Direction générale des pépinières et des stations piscicoles, Ministère des Ressources naturelles et de la Faune. 141 p.

Les plants issus de l'embryogenèse somatique : un énorme potentiel à notre portée pour augmenter la productivité forestière !

André Rainville^{1,4,5}, Nadya Wahid², Mohammed S. Lamhamedi¹, Guy Prément¹ et Jean Beaulieu³



André Rainville est ingénieur forestier diplômé de l'Université Laval depuis 1983. En 1992, le même établissement lui décerne un diplôme de maîtrise ès sciences. À l'emploi du ministère des Ressources naturelles et de la Faune à la Direction de la recherche forestière depuis 1986, il est aujourd'hui responsable des programmes d'amélioration génétique de l'épinette blanche et des feuillus nobles au Québec, et co-responsable d'un projet sur l'évaluation des gains réels de productivité associés au reboisement avec des plants génétiquement améliorés. Depuis 2008, il est impliqué dans plusieurs projets reliés aux changements climatiques visant à développer des mesures d'adaptation pour le Québec.

M. Rainville agit aussi comme conseiller expert et fait partie de divers comités provinciaux et canadiens en génétique forestière, entre autres sur les questions de conservation des ressources génétiques.

À partir de 2004, M. Rainville s'est associé à la DGPSP (Direction générale des pépinières et des stations piscicoles) pour le développement de la foresterie clonale chez l'épinette blanche au Québec; il est directement impliqué dans l'établissement de tests clonaux visant à évaluer les clones produits par embryogenèse somatique.

Les programmes de recherche-développement en amélioration génétique des arbres forestiers existent depuis plus de 50 ans au Québec et visent surtout les principales espèces utilisées dans les reboisements, soit les espèces à grande distribution de la forêt boréale. Ils font appel aux processus traditionnels de sélection et ne comportent donc pas d'activités qui conduisent à la production d'individus génétiquement modifiés. Leur objectif est d'accroître le volume et la valeur des bois produits en plantation, constituant ainsi un élément clé dans l'atteinte d'un des objectifs du nouveau régime forestier, soit d'augmenter la production forestière.

L'épinette blanche est l'espèce dont le programme d'amélioration génétique est le plus avancé au Québec (1, 2), étant actuellement rendu à la troisième génération. Ses retombées sur les pratiques forestières sont importantes; en effet, plus de 85 % des plants produits en pépinière sont issus de semences améliorées génétiquement, provenant en grande partie des vergers à graines de première et de deuxième génération (3). Les gains attendus des plantations réalisées avec ce matériel sont de 8 à 16 % en volume comparés aux plantations réalisées à l'aide de semences non améliorées (4). Au début des années 80, des efforts de recherche ont été consentis à la mise au point d'une technique de reproduction végétative, le bouturage, qui grâce à la multiplication de plants issus de croisements dirigés recommandés, permet d'obtenir des rendements encore plus importants, soit de 25 % supérieurs aux plantations réalisées avec des plants issus de semences non améliorées.

L'embryogenèse somatique : pour des plantations plus productives ayant une grande diversité génétique

Dans le but de tirer profit de rendements supérieurs, le MRNF a ensuite mis l'accent sur le raffinement d'une autre méthode de reproduction végétative, l'embryogenèse somatique (ES) (5). Comme pour le bouturage, cette technique utilise les semences issues de croisements dirigés bi-parentaux, à la différence que chaque semence est multipliée en plusieurs copies par culture de tissu, pour la production de plants et l'établissement subséquent de tests clonaux. En même temps, une partie du tissu embryogène obtenu est conservée dans l'azote liquide, assurant

¹ Direction de la recherche forestière, ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec, 2700 rue Einstein, Québec (Québec) G1P 3W8

² Université Laval, Faculté de foresterie, de géographie et de géomatique, Département des sciences du bois et de la forêt, Pavillon Abitibi-Price, 2405, rue de la Terrasse, Québec (Québec) G1V 0A6, Canada

³ Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts, Centre canadien sur la fibre de bois, 1055 rue du Peps, C. P. 10380, Succ. Sainte Foy, Québec (Québec) G1V 4C7

⁴ andre.rainville@mrnf.gouv.qc.ca

⁵ 418 643 7994 poste 6548

A. Rainville, N. Wahid, M.S. Lamhamedi, G. Prément et J. Beaulieu, 2011. *Les plants issus de l'embryogenèse somatique : un énorme potentiel à notre portée pour augmenter la productivité forestière!* Dans : Colas, F.; Lamhamedi, M.S. (éds.), 2011. Production de plants forestiers au Québec : la culture de l'innovation. Colloque de transfert de connaissances et de savoir-faire. Carrefour Forêt Innovations, 4-6 octobre 2011, Québec (Canada), 140 p. pp : 119- 124.

le maintien du matériel génétique à son état juvénile jusqu'à ce que les améliorateurs identifient les meilleurs clones sur la base des résultats des tests génétiques, après quoi ils pourront être multipliés rapidement en des milliers de copies pour les besoins du programme provincial de reboisement. Cette technologie permet donc de capitaliser sur la variabilité clonale, un niveau supplémentaire de variabilité qui promet d'être très rentable en termes de gains génétiques. Certains travaux ont en effet démontré que l'utilisation des meilleurs clones produits par ES dans les programmes de reboisement permet d'augmenter le rendement en volume de 40 à 60 % par rapport à ce qui existe à l'état naturel (6), soit une productivité minimale de 712,9 dm³/tige à l'âge de 60 ans, comparativement à 405,9 dm³/tige en moyenne pour une plantation d'épinette blanche issue de semences récoltées en forêt, et 99,8 dm³/tige pour une sapinière naturelle (Figure 1). De plus, et à l'inverse des arbres produits à partir de semences de vergers à graines où l'on peut observer une très grande variabilité dans la forme des arbres, l'utilisation de plants somatiques (variétés clonales) permet d'assurer une bonne stabilité et une grande uniformité de l'architecture de la partie aérienne et de la qualité du bois. Cette uniformité est un avantage marqué pour des utilisations ciblées du bois tout en permettant d'augmenter la valeur ajoutée et la rentabilité des plantations.

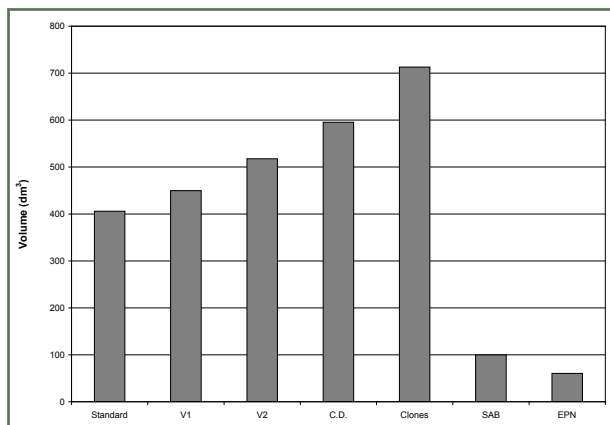


Figure 1. Volume moyen par tige marchande à 60 ans (sans éclaircie commerciale) selon divers niveaux d'amélioration. V1 : verger de 1^{ère} génération, V2 : verger de 2^{ème} génération, CD : croisement dirigé, SAB : sapin baumier, EPN : épinette noire*.

Après plusieurs années de recherche visant à optimiser la méthode de reproduction végétative qu'est l'embryogenèse somatique, sa mise à l'échelle opérationnelle a débuté en 2004 à la pépinière de Saint-Modeste. La production des clones a maintenant atteint sa vitesse de croisière et la capacité maximale du centre est de 200 clones/année. Ces clones

proviennent actuellement de 52 familles recommandées, mais l'objectif ultime est de travailler uniquement avec les 30 meilleures familles (croisements bi-parentaux), à raison de 25 clones par famille. La diversité génétique de ce matériel est suffisante pour assurer une croissance optimale des plantations dans une grande diversité d'environnements et minimiser leurs risques de mésadaptation face aux différents agents perturbateurs de nature biotique et abiotique (7, 8), facilitant ainsi leur intégration dans une stratégie de développement durable des forêts du Québec. De plus, l'utilisation de 30 à 40 clones non apparentés dans les plantations opérationnelles assure une protection contre des échecs catastrophiques qui est à peu près équivalente à celle qui découle de l'utilisation d'un grand nombre de clones non apparentés (9).

Le développement d'outils de sélection précoce

Avant leur mise en terre, la majorité des clones sont assujettis à une caractérisation morpho-physiologique (10) au stade de semis (variables de croissance, taux de conformité de chaque clone selon les normes et critères de qualité en vigueur au Québec, nutrition minérale, architecture des aiguilles, surface spécifique, etc.) et à une évaluation de leur aptitude au bouturage (11, 12). Nous avons actuellement le pedigree de performance morpho-physiologique (hauteur, diamètre, architecture, nombre de branches, nutrition minérale, croissance des racines, etc.), élaboré sous forme d'un catalogue, de près de 840 clones somatiques d'épinette blanche produits à une échelle opérationnelle. Les mesures prises sur ce matériel nous montrent qu'il existe une grande variabilité clonale en pépinière (1+0, 2+0). La part de variation sous contrôle génétique est élevée, en particulier pour la hauteur où on a observé une forte héritabilité clonale au sens large ($H^2c = 0,6$); cette héritabilité est stable au cours des deux premières saisons de croissance en pépinière (13).

Puisque la durée et les coûts d'évaluation des clones en tests clonaux sont importants, nous croyons essentiel de déterminer s'il existe une relation, au niveau clonal, entre les mesures prises au stade de semis en pépinière et celles prises à différents âges en tests clonaux. Si elle existe, une telle relation pourrait en effet nous permettre de réduire significativement le nombre de clones à évaluer dans les tests clonaux, en éliminant à l'avance les clones qui ne possèdent pas les caractéristiques recherchées ou qui ne performeront pas, et d'intégrer rapidement les clones performants dans la filière du reboisement (Figure 2), maximisant ainsi les retombées économiques de l'embryogenèse somatique. Le recours à

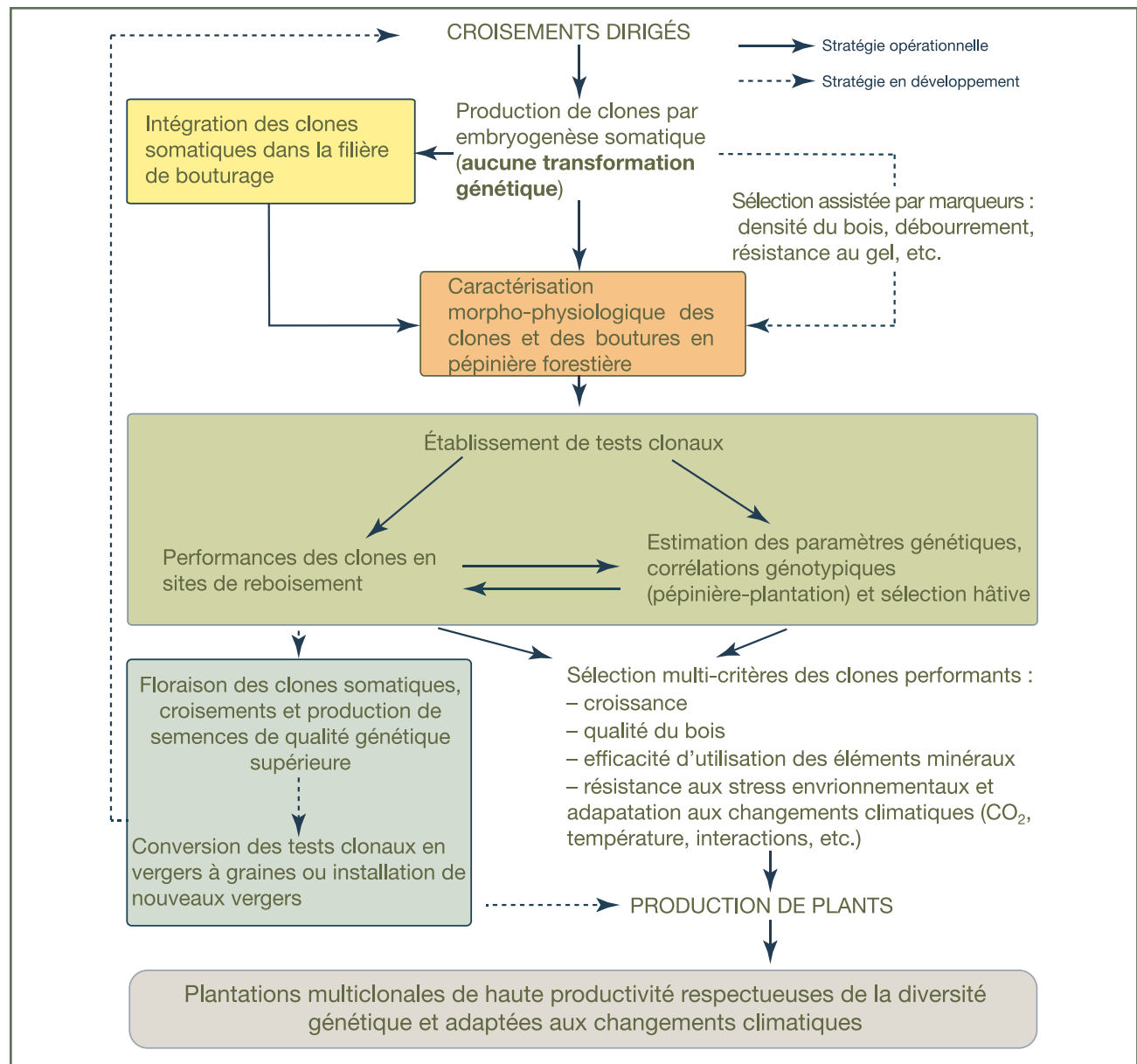


Figure 2. De la production des clones somatiques à la plantation : une approche innovante, multidisciplinaire et intégrée*.

cette approche n'aura toutefois de succès tangibles que si les caractéristiques ou les traits ciblés, observés au stade de semis ou en jeune âge dans les tests, sont héréditaires et fortement corrélés à celles prises à un âge plus avancé. Ceci nécessite donc une connaissance approfondie des paramètres génétiques, notamment les hérédibilités clonales, les variances génétiques clonales et les corrélations génotypiques, ainsi que de la stabilité de la performance des clones dans différents sites.

À partir de 2007, le MRNF a mis en place 11 tests clonaux d'épinette blanche dans les domaines écologiques de l'érablière et de la sapinière (Figure 3), comprenant les mêmes 840 clones qui furent caracté-

risés antérieurement au stade de semis en pépinière. Chaque clone fut établi sur deux sites (érablière et sapinière) en utilisant un dispositif comprenant 8 blocs aléatoires complets à raison de 2 ramets/clone/bloc, et un espacement de 1.5 m x 3 m. Une éclaircie systématique est prévue vers l'âge de 10 ans. Comme les clones à comparer sont plantés sur plusieurs années et à des emplacements différents sur un même site, quatre lots témoins sont ensemencés à chaque année pour servir de contrôle et refléter les effets confondus année-emplacement de plantation; ils permettront de comparer les clones entre eux. Au cours des dix premières années d'existence des tests, les objectifs poursuivis sont d'évaluer les paramètres



Figure 3 : Évaluation de la performance de 840 clones d'épinette blanche dans 11 plantations établies entre 2007 et 2011*.



Photo 1. Exemple de variabilité d'architecture des parties aériennes de différents clones somatiques d'épinette blanche (croissance, degré de branchaison, etc.). La sélection de clones ayant une croissance en hauteur exceptionnelle et moins de branches de faible diamètre permettrait d'ajouter de la valeur à la ressource*.

généétiques au niveau clonal et de sélectionner les meilleurs clones pour le reboisement. Les caractères d'intérêt sont la croissance (HT : Hauteur, pousse, diamètre), la forme (flexuosité, flèches, fourches et tiges multiples) et la branchaison (longueur entre-nœuds, angle branches, etc) (Photo 1). Quand les tests auront atteint l'âge de 20 ans, on caractérisera ensuite la qualité du bois (densité, angle des microfibrilles, rigidité, résistance), et les meilleurs clones seront sélectionnés selon des critères de croissance et de qualité du bois.

Au printemps de 2010, nous avons mesuré deux de ces tests clonaux (Photo 2), constitués de 52 clones mis en terre il y a 4 ans. Les analyses ont révélé une grande variabilité entre les clones pour les caractères reliés à la croissance et à la branchaison. À ce stade juvénile en plantation, l'estimation de l'héritabilité clonale au sens large reste toutefois faible pour tous

les caractères. Parmi les caractères étudiés, c'est la hauteur qui présente les héritabilités les plus élevées et qui s'expriment très tôt. Des corrélations génotypiques élevées ont été observées entre les caractères de croissance et de branchaison, ainsi qu'entre les hauteurs en pépinière et celles en tests clonaux à l'âge de 4 ans (Figure 5). Bien qu'un effet site significatif ait été observé pour la plupart des caractères de croissance et de branchaison, l'interaction « clone x site » est faible (14) et la corrélation entre les deux sites pour les mêmes caractères est élevée. De la même façon, la performance relative des clones semble être stable dans le temps (Figure 4), une observation qui est confirmée par la forte corrélation génotypique entre les hauteurs mesurées en pépinière et celles prises à l'âge de 4 ans dans les tests clonaux (Figure 5). Cette stabilité de la performance des clones somatiques entre les sites et dans le temps démontre qu'il

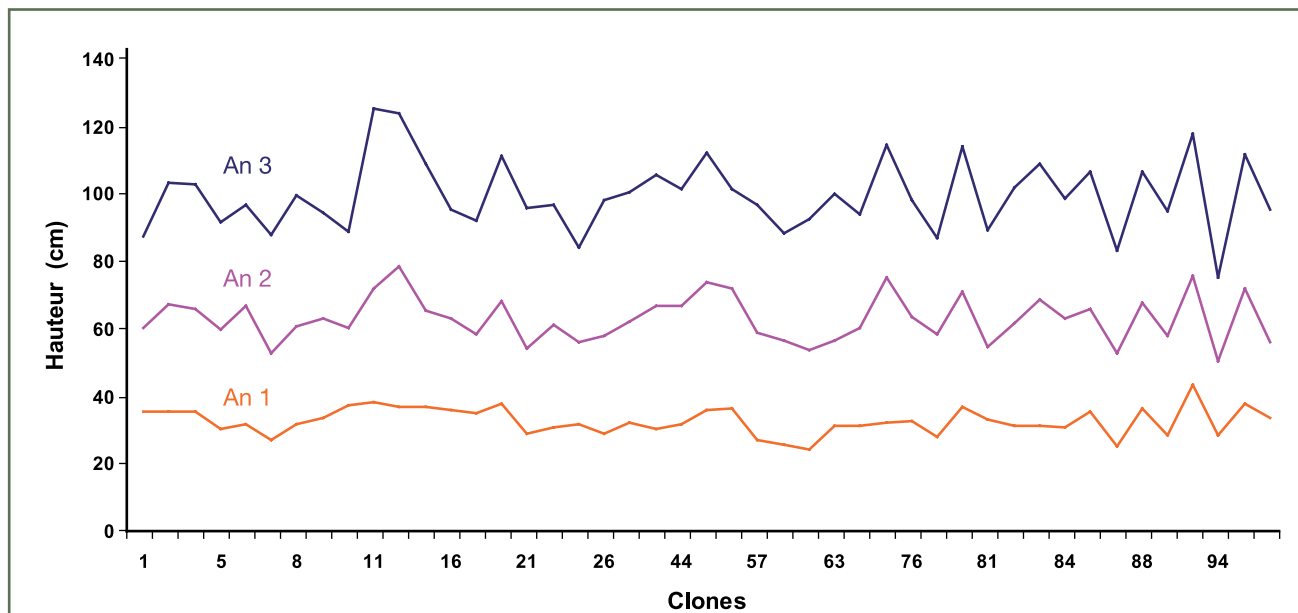


Figure 4. Hauteur mesurée sur les mêmes clones pendant trois ans après la mise en terre. Notez la stabilité du rythme annuel de croissance des clones*.



Photo 2. Exemple d'un test clonal d'épinette blanche mis en terre à Saint-Modeste*.

est possible de sélectionner rapidement les meilleurs clones afin de les intégrer dans la population de production. Au cours des prochaines années, nous évaluerons toutefois si cet avantage persiste pendant au moins cinq à huit années. La sélection finale des clones pourrait être basée sur un ensemble de caractères mesurés à plusieurs étapes, aussi bien sur leur aptitude à l'ES en laboratoire qu'à leur croissance en pépinière, à leur aptitude au bouturage ainsi que sur leur productivité et leur qualité du bois en site de reboisement. Ces dispositifs expérimentaux pourront également être utilisés pour évaluer à moyen et à long terme le comportement des clones face aux stress environnementaux (sécheresse, gel, insectes, etc.) et aux changements climatiques, et valider la sélection assistée par marqueurs moléculaires au niveau clonal.

Les retombées

Les plantations réalisées à l'aide de plants d'origine somatique ne pourront exprimer leur plein potentiel génétique que si les aménagistes investissent des efforts pour bien choisir les sites les plus propices sur lesquels seront déployés ces clones. Le Québec a fait un bon pas dans ce sens en identifiant des aires d'intensification de la production ligneuse (AIPL) sur son territoire, où devraient être destinés en priorité les plants d'origine somatique. À l'intérieur de ces territoires, un effort supplémentaire doit toutefois être consenti à cartographier les sites les plus propices à l'épinette blanche en terme de drainage et de fertilité (nutrition minérale), afin de maximiser la productivité de ces plantations. Bien que la croissance juvénile rapide des plants d'origine somatique nous permette actuellement d'espérer une diminution du nombre de dégagements requis pour amener une plantation à sa croissance libre, la fréquence des

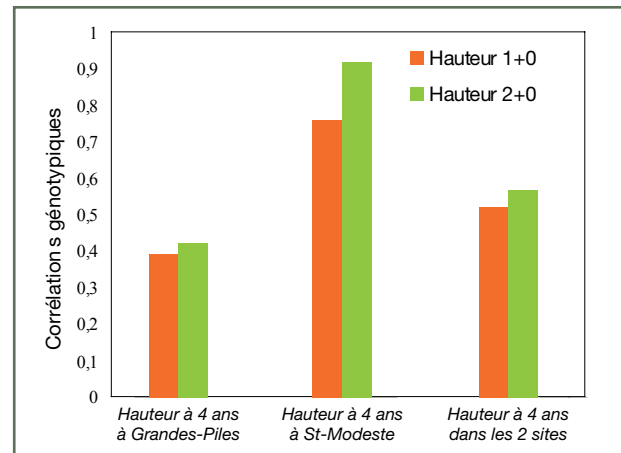


Figure 5. Corrélation génotypique entre la hauteur de 52 clones en pépinière (1+0 et 2+0) et celle prise dans deux sites de plantation (Grandes-Piles et Saint-Modeste) à l'âge de 4 ans*.

travaux subséquents (éclaircies, élagages, contrôle des ravageurs, etc.) requiert la proximité des aménagistes et constitue un élément important à considérer dans le choix des AIPL à privilégier pour la plantation de plants d'origine somatique. Divers modèles de déploiement des clones existent, par exemple le mélange avec des semis issus de la semence, qui permet de réduire leur pourcentage dans une plantation et de diminuer les coûts d'établissement; nous analyserons les options en termes d'avantages et d'inconvénients, et comparerons la situation au Québec avec des exemples concrets tirés d'expériences de pays compétiteurs.

L'embryogenèse somatique fait définitivement partie de la boîte à outils dont dispose le Québec pour optimiser sa productivité forestière, pour concentrer sa production ligneuse sur de petites superficies près des usines, réduisant ainsi les coûts de récolte et de transport, et pour produire une fibre plus uniforme en terme de qualité, à l'instar de ses compétiteurs internationaux. La mise à l'échelle opérationnelle de l'embryogenèse somatique a confirmé la créativité des chercheurs du Québec, et leur quête se poursuit. Le développement d'outils de sélection précoce tels que les marqueurs morphologiques et moléculaires devrait rendre le matériel amélioré disponible plus rapidement pour le reboisement. Un nouveau modèle de transfert visant à prédire l'effet des changements climatiques sur les rendements de l'épinette blanche en plantation (15) donnera aussi la flexibilité de choisir le matériel le mieux adapté au climat futur. Ces opportunités ont été rendues possibles grâce à l'innovation et aux efforts consentis depuis plus de 50 ans dans la recherche forestière au Québec.

* Figures et photos tirées de Lamhamedi et al., 2011 (12).

Références

- 1- BEAULIEU, J., 1996. *Programme et stratégie d'amélioration génétique de l'épinette blanche au Québec*. Rapport d'information LAU-X-17. Ressources naturelles Canada, SCF. 26 p.
- 2- BEAULIEU J., G. DAOUST, A. DESHAIES, M.S. LAMHAMEDI, A. RAINVILLE et M. TOURIGNY, 2009. *Amélioration génétique des arbres, gestion des vergers à graines et de semences, et production de plants forestiers*. Dans : Manuel de foresterie, Multimondes (Éd), Canada, 28 :1093-1146.
- 3- RAINVILLE A. et J. BEAULIEU, 2007. *Tirer profit d'une espèce à haut rendement : 40 années d'efforts intégrés et continus en amélioration génétique de l'épinette blanche*. Dans : Des plants aux plantations: Techniques, technologies et performances. Carrefour de la recherche forestière, 19 septembre 2007, Québec, Canada. p 7-10.
- 4- RAINVILLE A., M. DESPONT, R. BEAUDOIN, P. PÉRINET, M.J. MOTTET et M. PERRON, 2003. *L'amélioration des arbres au Québec : un outil de performance industrielle et environnementale*. Note de recherche forestière n° 127, 8 p.
- 5- TREMBLAY L. et M. S. LAMHAMEDI, 2006. *Embryogenèse somatique au ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec : Du laboratoire au site de plantation*. Des plants et des Hommes 9 (3): 6-11.
- 6- SUTTON, B., 2002. *Commercial delivery of genetic improvement to conifer plantations using somatic embryogenesis*. Ann. For. Sci. 59 (5-6): 657-661.
- 7- LINDGREN, D. et F. PRESCHER, 2005. *Optimal clone numbers for seed orchards with tested clones*. Silv. Genet. 54 :80-92.
- 8- YANCHUIK, A.D., J. BISHIR, J.H. RUSSELL et K.R. POLSSON, 2005. *Variation in volume Production through clonal deployment : results from simulation model to minimize risk for both a currently known and unknown future pest*. Silv. Genet. 55 :25-37.
- 9- ROBERDS, J.H. et J. BISHIR, 1997. *Risk analyses in clonal forestry*. Can.J. For. Res. 27 :425-432.
- 10- LAMHAMEDI, M.S., H. CHAMBERLAND, P.Y. BERNIER et F.M. TREMBLAY, 2000. *Clonal variation in morphology, growth, physiology and anatomy and ultrastructure of container-grown white spruce somatic plants*. Tree Physiol. 20: 869-880.
- 11- LAMHAMEDI, M. S., 2010. *Sélection hâtive multi-critères des variétés somatiques d'épinette blanche destinées au reboisement de très haute productivité*. Dans : Lamhamedi, M.S., L. Tremblay, J. Gingras, J. Gravel-Grenier et M. Rioux. 2010 (éds.). *Production des variétés d'épinette blanche hautement productives par embryogenèse somatique à la pépinière de Saint-Modeste et modalités de leur intégration dans les zones de sylviculture intensive*. 10 nov. 2009 et 2 juin 2010. Recueil des conférences, ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Saint-Modeste, Québec, Canada. <http://www.mrn.gouv.qc.ca/activite/embryogenese-somatique/pdf/lamhamedi.pdf>
- 12- LAMHAMEDI, M.S., A. RAINVILLE, F. COLAS, N. WAHID, G. PRÉSENT et J. GRAVEL-GRENIER, 2011. *Les variétés somatiques à haut rendement : un outil précieux d'intensification de la production*. Stand présenté au Carrefour Forêt Innovations, 4-6 octobre 2011, Québec (Canada). 5p.
- 13- WAHID N., M.S. LAMHAMEDI, J. BEAULIEU, H.A. MARGOLIS et J. DEBLOIS, 2011. *Genetic parameters and clonal variation in growth and nutritional traits in containerized white spruce somatic seedlings*. Silva Fennica. (soumis).
- 14- WAHID N., A. RAINVILLE, M.S. LAMHAMEDI, H.A. MARGOLIS, J. BEAULIEU et J. DEBLOIS, 2011. *Genetic parameters and performance stability of white spruce somatic seedlings in clonal tests*. À soumettre.
- 15- ANDALO, C., J. BEAULIEU et J. BOUSQUET, 2005. *The impact of climate change on growth of local white spruce populations in Québec, Canada*. For. Ecol. Manage. 205 : 169-182.

Le développement d'outils moléculaires pour accélérer les programmes d'amélioration génétique des arbres au Québec

John MacKay^{1,6,7}, Brian Boyle¹, Philippe Rigault², Jean Bousquet¹, Jean Beaulieu³, Nathalie Isabel⁴, Armand Séguin⁴ et Martin Perron⁵



John MacKay est professeur agrégé au département de sciences du bois et de la forêt de l'Université Laval. Ses activités de recherche portent principalement sur la formation et les caractéristiques du bois chez les arbres forestiers. Il participe au développement et à la mise en oeuvre de démarches expérimentales s'appuyant

sur la génomique fonctionnelle pour l'étude de ces phénomènes. Le programme de recherche du Dr MacKay intègre plusieurs approches pour étudier la génétique et la biologie moléculaire en lien avec la physiologie et la structure du xylème secondaire, dont le séquençage à grande échelle des gènes exprimés, le développement de biopuces à ADN, l'étude des profils d'expressions des gènes, l'analyse fonctionnelle de gènes qui contrôlent les caractéristiques du bois, la variation génétique du bois et de l'expression des gènes au sein de populations naturelles d'arbres.

Il a dirigé le projet Arborea (phase I de 2002 à 2006 et phase II de 2006 à 2011) financés par Génome Canada et Génome Québec. Il assume maintenant la codirection d'un nouveau projet SMarTForests, une initiative pancanadienne de génomique appliquée à l'amélioration génétique des épinettes qui a débuté en 2011. De 2006 et 2011 il a publié 25 articles dans des revues scientifiques avec comité de lecture sur divers sujets reliés à la génétique et la génomique forestières, et présenté de nombreuses conférences invitées dans le cadre de congrès internationaux, nationaux et régionaux.

Introduction

La disponibilité et l'utilisation d'outils moléculaires ciblés permettrait d'accélérer les programmes d'amélioration génétique des arbres de différentes façons. La sélection génétique des arbres s'appuie traditionnellement sur l'évaluation de caractéristiques comme la croissance en hauteur, la productivité ou la densité du bois. De telles évaluations se font par l'établissement de plantations comparatives et prennent de nombreuses années. La sélection, basée sur les marqueurs moléculaires, pourrait être significativement plus rapide puisque l'évaluation est effectuée à partir de l'ADN et peut être réalisée dès la première année de croissance sans recourir à l'établissement de plantations. Les marqueurs peuvent aussi aider à accélérer la sélection pour des caractéristiques qui sont très coûteuses à évaluer, notamment les caractéristiques physiques du bois comme la résistance mécanique. L'analyse directe de l'ADN est aussi très efficace pour gérer la diversité génétique, vérifier l'origine génétique des semences ou encore introduire de nouvelles variations génétiques dans les populations d'arbres des programmes d'amélioration.

Le développement d'outils moléculaires basés sur l'ADN et permettant la sélection génétique a été intensifié au Québec depuis 2006, dans le cadre du projet Arborea. La découverte de marqueurs d'ADN s'appuie sur l'identification de corrélations entre le *génotype*¹ et le *phénotype*. Dans les meilleurs des cas, ces corrélations représentent des liens de cause à effet. Chez les arbres forestiers, la découverte de marqueurs s'appuie sur deux principales démarches expérimentales : (i) la *cartographie de QTL* (locus de trait quantitatif) et (ii) les *études d'association*. Ces démarches utilisent des dispositifs expérimentaux et des méthodes d'analyses distincts, mais chacune d'entre elles s'intéresse à des caractéristiques telles que la croissance et la productivité, la phénologie, la structure du bois, etc. Pour être utiles en amélioration génétique, les marqueurs doivent permettre la sélection des arbres ayant les attributs recherchés. Ainsi, les marqueurs doivent expliquer une proportion significative, voire importante de la partie héritable de la variation phénotypique. Cela veut dire que les marqueurs doivent avoir un potentiel prédictif des caractères héréditaires.

¹ Université Laval, Arborea, Centre d'étude de la forêt et Institut de biologie intégrative et des systèmes. Université Laval (Québec) G1V 0A6

² Gylde Inc., Québec (Québec)

³ Ressources naturelles Canada, Centre canadien de la fibre de bois, 1055, rue du Peps, C.P. 10380, succ. Sainte-Foy, Québec (Québec) Canada G1V 4C7

⁴ Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts, 1055, rue du P.E.P.S., C. P. 10380, succ. Sainte-Foy, Québec (Québec) Canada G1V 4C7

⁵ Direction de la recherche forestière, ministère des Ressources naturelles et de la Faune, 2700 rue Einstein, Québec (Québec) G1P 3W8

⁶ john.mackay@sbf.ulaval.ca

⁷ 418 656 2278

MacKay, J., B. Boyle, J. Bousquet, J. Beaulieu, N. Isabel, A. Séguin et M. Perron, 2011. *Le développement d'outils moléculaires pour accélérer les programmes d'amélioration génétique des arbres au Québec*. Dans : Colas, F.; Lamhamedi, M.S. (éds.), 2011. Production de plants forestiers au Québec : la culture de l'innovation. Colloque de transfert de connaissances et de savoir-faire. Carrefour Forêt Innovations, 4-6 octobre 2011, Québec (Canada), 140 p. pp : 125–130.

¹ Les mots apparaissant en gras italique sont définis dans l'encadré que l'on retrouve à la page 126.

Cartographie de QTL (locus de trait quantitatif) : Vise à identifier des régions des différents chromosomes (appelés loci) qui contrôlent un ou des phénotypes. Elle s'appuie sur la création de cartes génétiques, aussi appelées cartes de liaison, représentant le génome de l'espèce étudiée. Cette méthode, aussi connue sous le nom de «Quantitative trait locus (QTL) mapping» vise la découverte de marqueurs moléculaires au sein d'une ou de quelques familles.

Étude d'association : S'intéresse aux gènes dont la fonction suggère un rôle dans un phénotype étudié (gènes candidats), et cherche à identifier des variations dans la séquence d'ADN (génotype) qui sont corrélées à la variation observée du phénotype. Les études d'associations ont l'avantage de s'appliquer aux populations entières sans structure particulière. La figure 1 illustre les différentes composantes d'une étude d'association des caractéristiques du bois.

Génotype : la ou les formes précises d'un gène ou d'une séquence d'ADN présente(s) chez une arbre. Chacun des gènes et chacune des séquences d'ADN sont présents en deux copies chez tout arbre, et des variations plus ou moins grandes existent entre ces copies et entre les individus d'une espèce donnée.

Phénotype : toute caractéristique d'un organisme (que ce soit un arbre ou autre) qui peut être observée, déterminée ou mesurée. A titre d'exemple : la hauteur d'un arbre, son DHP ou la dureté de son bois.

SNP (Single nucleotide polymorphism) : variation dans la séquence de l'ADN affectant un seul nucléotide aussi appelé base aminée (A, C, G ou T). Les SNPs sont situés partout dans le génome, toutefois dans le cadre de ce document, la majorité des SNPs sont situés dans les gènes.

L'identification de gènes et de marqueurs moléculaires d'intérêt chez les conifères présente certains défis du fait de la très grande taille du génome, la structure de la diversité génétique (faible déséquilibre de liaison) et de la grande taille effective des populations. Les stratégies d'échantillonnage et d'analyse doivent être adaptées pour tenir compte de ces réalités.

Ce document présente les résultats d'expériences récentes menées chez l'épinette blanche en utilisant du matériel génétique issu de populations naturelles ayant servi à la sélection d'arbres des programmes de génération d'amélioration génétique. Dans un premier temps, nous avons développé un catalogue des gènes de l'épinette blanche et réalisé un inventaire des variations de séquences au sein de milliers de gènes. Nous avons aussi sélectionné des *gènes candidats* et mené des études d'associations des caractéristiques du bois, en plus de cartographier des régions chromosomiques (QTL) reliées à la phénologie et à la croissance. Nous concluons que certains des marqueurs identifiés par ces travaux offrent une opportunité concrète pour aider la sélection génétique des arbres utilisés dans les programmes de reboisement au Québec et ailleurs au pays. Ces mêmes marqueurs pourraient aussi aider à la conservation de la diversité génétique, ou encore à évaluer le potentiel d'adaptation de nos forêts face aux changements climatiques.

Méthodes

Le matériel biologique et les méthodes ont été décrits dans des études publiées récemment. Une analyse visant à cartographier des QTL a utilisé deux familles biparentales obtenues suite à des croisements dirigés. Une étude d'association a utilisé plus de 200 familles mono-parentales présentes dans un test de provenance-descendance. Notamment, le séquençage de plus de 27 700 gènes d'épinette blanche (RIGAUD *et al.* 2011) représente une ressource importante qui permet d'accélérer le développement des marqueurs chez les épinettes. Nous avons aussi réalisé des analyses des variations de séquences de l'ADN (PAVY *et al.* 2006), la sélection et le génotypage des gènes reliés au bois (PAVY *et al.* 2008; BOMAL *et al.* 2008; BEDON *et al.* 2010; BEAULIEU *et al.* 2011), l'analyse des caractéristiques du bois (LENZ *et al.* 2010, 2011), la sélection de gènes reliés à la phénologie (EL KAYAL *et al.* 2011) et la cartographie génétique (PELGAS *et al.* 2011).

Résultats

Découverte de marqueurs liés à la croissance et à la phénologie

La croissance juvénile et la phénologie (débourrement et aoûtement) ont été l'objet d'une étude de cartographie de QTLs. En plus de localiser les QTLs dans le génome, l'étude visait à comparer deux familles d'épinette blanche, ainsi que l'effet de différents types d'environnements et de la variabilité entre les années (PELGAS *et al.* 2011).

Au total, l'analyse a identifié 11 QTLs distincts reliés à la date de débourrement, 13 QTLs pour la date d'aoûtement, et 10 QTLs pour la croissance en hauteur. Cette étude a aussi établi la position de plusieurs gènes sur la carte génique. Les arbres de cette étude ont été multipliés par bouturage. L'analyse a ainsi pu être répétée en conditions contrôlées (chambres de croissance) et en conditions naturelles (en pépinière). Près de 50 % des mêmes QTLs ont été retrouvés dans les deux types d'environnements. Une répétabilité voisine de 50 % a aussi été observée d'une année à l'autre. Ainsi, plusieurs QTLs ont été identifiés comme étant faiblement influencés par les variations climatiques et de la photopériode. Tel qu'attendu, on observe toutefois une plus grande variation entre les familles. Seuls 20 % des QTLs étaient en commun entre les deux familles étudiées.

Dans la présente étude, chacun des QTL explique de 3 à 22 % de la variance observée pour les différents caractères étudiés. L'ensemble des QTLs attribués à chacun de ces caractères expliquerait jusqu'à 70 % de la variance observée. Le fait qu'un groupe de QTLs (représentant plusieurs régions chromosomiques distinctes) explique une portion aussi élevée de la variation, et ce pour différents caractères, indique que ces QTLs ont un pouvoir prédictif important pour ces mêmes caractères. Ainsi, les QTLs liés à la phénologie pourraient servir d'outils prédictifs de l'adaptation climatique, et les QTLs liés à la croissance pourraient aider à prédire le rendement en plantation.

Une étude complémentaire a été réalisée en comparant plusieurs populations d'épinette blanche dans le but d'identifier des gènes montrant une signature d'adaptation à l'échelle du territoire (NAMROUD *et al.* 2008). Le génotype a été déterminé pour 534 SNPs appartenant à 345 gènes chez plusieurs arbres appartenant à chaque population. Près de 50 des gènes étudiés auraient un rôle potentiel dans l'adaptation aux conditions de croissance locale, d'après la distribution des SNPs au sein des différentes populations (NAMROUD *et al.* 2008).

La cartographie des gènes a permis de comparer les résultats de l'étude des populations naturelles et de l'étude des QTLs. Il a été observé que plusieurs des gènes reliés à l'adaptation locale dans les populations naturelles se trouvent aussi dans les mêmes régions chromosomiques que les QTLs reliés à la phénologie des bourgeons. D'autres travaux en cours étudient l'expression et la fonction de ces mêmes gènes dans le but d'évaluer leurs rôles physiologiques chez l'épinette blanche et l'épinette noire.

Découverte de marqueurs reliés aux caractéristiques du bois

Des études d'association ont été entreprises pour identifier des SNPs et des gènes liés à diverses caractéristiques physiques du bois de l'épinette blanche (figure 1). Des échantillons de bois ont été prélevés sur une population de 1 700 arbres appartenant à 215 familles (demi-fratries) d'un test de descendance d'épinette blanche. Les échantillons de bois ont été analysés avec la technologie SilviScan qui produit un profil détaillé du bois à l'échelle de chaque cerne de croissance. Parmi les caractéristiques du bois déterminées par ce système, on compte la densité du bois, la résistance mécanique (module d'élasticité), l'épaisseur de la paroi des trachéides, la largeur de chaque cerne, la largeur de bois initial et du bois final, l'angle des microfibrilles de cellulose, et d'autres. À partir de ces données, nous avons notamment dressé un profil de l'héritabilité de ces caractéristiques en fonction de l'âge cambial (LENZ *et al.* 2010; 2011).

Une première étude d'association a visé plus de 900 SNPs distribués au sein de 550 gènes dont la fonction prédite indiquait un rôle potentiel dans la formation du bois (gènes candidats). Ces SNPs ont été génotypés chez 490 arbres. Au total, 13 SNPs ont été associés aux différentes caractéristiques du bois (BEAULIEU *et al.* 2011). La variance phénotypique expliquée par chaque SNP pris individuellement variait entre 1 et 4 %. La variance phénotypique expliquée a atteint un maximum de 11 % au total lorsque plusieurs SNPs ont été associés à un caractère du bois. Bien que ces résultats soient encourageants, ils indiquent que les SNPs identifiés seraient inadéquats pour permettre la sélection des arbres, étant donné la faible proportion de la variation phénotypique expliquée.

Une deuxième étude d'association a été entreprise dans le but de trouver des marqueurs dotés d'un plus fort potentiel prédictif. Cette analyse a visé un plus grand nombre de gènes, plus de SNPs par gène, et a testé de nombreux arbres dans le but d'accroître le pouvoir de détection. Dans un premier temps, différentes expériences sur l'expression des gènes ont été menées dans le but de déterminer les meilleurs gènes à cibler (voir PAVY *et al.* 2008; BOMAL *et al.* 2010; BEAULIEU *et al.* 2011; EL KAYAL *et al.* 2011). Un total de 5 000 gènes candidats ont été identifiés en relation avec les caractéristiques du bois, ou encore la croissance et la phénologie. Étant donné le grand nombre de gènes, une priorité d'analyse a été établie pour chaque gène d'après les résultats de ces expériences. L'inventaire de dizaines de milliers de variations de séquences (SNPs) retrouvées dans ces gènes a permis

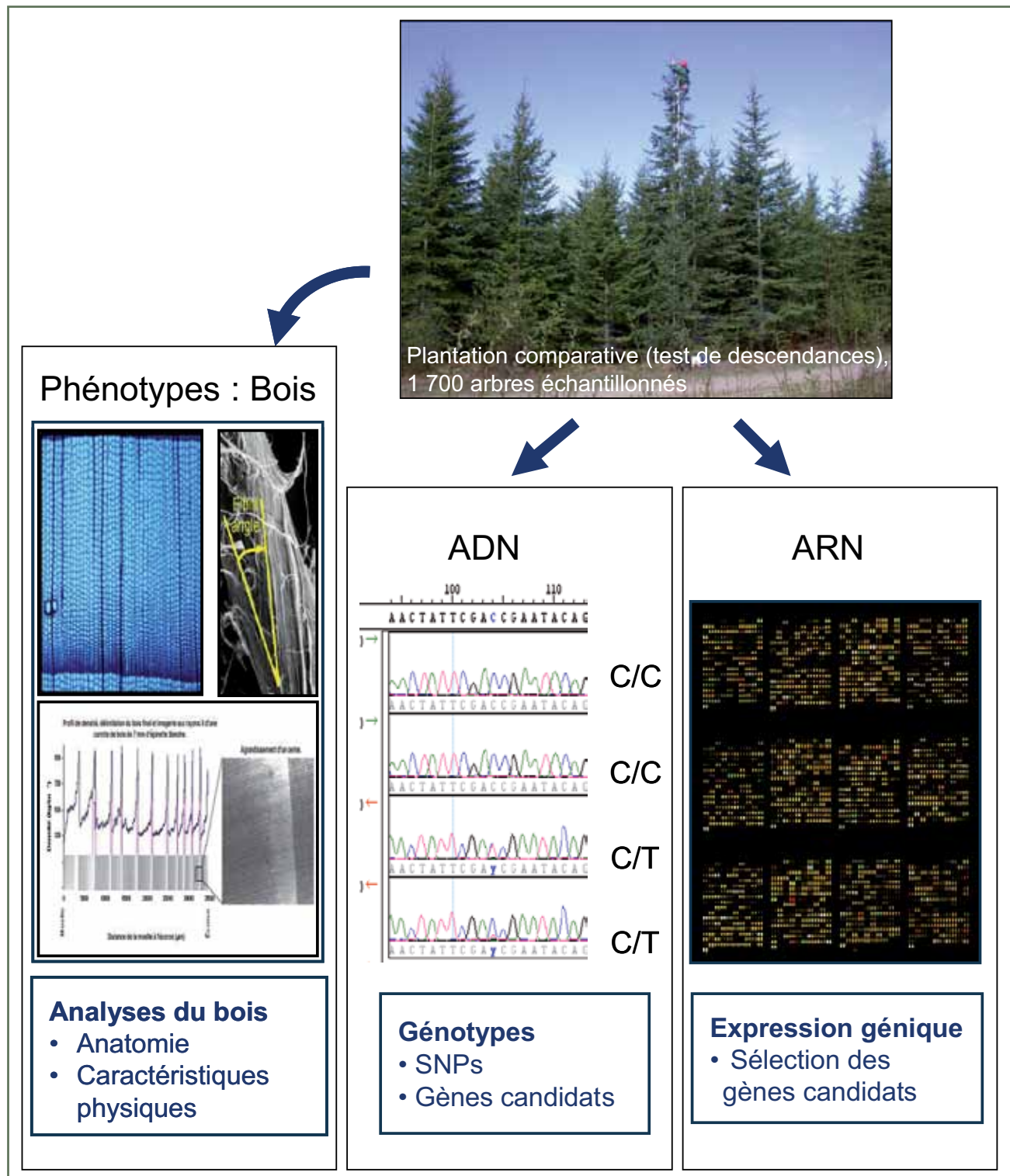


Figure 1. Schémas illustrant les différentes composantes d'une l'étude d'association des caractéristiques du bois. La population d'analyse est généralement constituée d'une plantation comparative. Dans la présente étude, des éprouvettes de bois ont été prélevées sur 1 700 arbres qui appartenaient à un test de provenance-descendance, et étaient âgés de 28 à 30 ans lors de l'échantillonnage. Les différentes caractéristiques du bois ont été déterminées par la technologie Silvscan (à gauche). L'analyse de l'ARN permet de connaître le profil d'expression des gènes et ainsi sélectionner les gènes candidats les plus pertinents pour le bois. Ici, l'ARN a été analysé à l'aide d'une bio-puce conçue spécifiquement pour l'épinette (illustrée à droite) (Pavy *et al.* 2008). L'ADN est extrait et analysé pour déterminer le génotype de chaque SNP dans chaque arbre (au centre). Différentes méthodes d'analyse statistiques sont ensuite employées pour établir des corrélations entre le phénotype (bois) et le génotype (ADN).

de mettre en place une méthode de génotypage à haut débit qui consiste à déterminer quelles formes (allèles) de ces gènes sont présentes chez chaque arbre. Chaque arbre comportant deux copies de chaque gène, ils peuvent contenir deux copies identiques (homozygotes) de l'un des allèles ou encore porter deux copies différentes (hétérozygotes).

Nous avons analysé 40 caractéristiques du bois et les données génotypiques de 6 700 SNPs appartenant à 2 660 gènes, sur l'ensemble des 1 700 arbres. L'étendue des données a permis d'utiliser différentes méthodes d'analyses pour la découverte des marqueurs moléculaires. Les analyses réalisées sur chaque SNP individuellement ont identifié un total de 73 SNPs associés à 27 caractéristiques du bois. Chacun des SNPs expliquait de 0,7 à 5,9 % de la variance phénotypique. Par contre, des analyses considérant l'ensemble des SNPs (par l'emploi des méthodes de calcul Bayésiennes) ont montré que jusqu'à 60 % de la variance phénotypique pouvait être expliquée pour des caractéristiques comme la densité moyenne du bois. Toujours pour la densité du bois, ces analyses ont identifié un sous-ensemble de 47 SNPs expliquant près de 40 % de la variation.

Conclusion et portée opérationnelle des résultats

Cette étude rapporte la découverte de plusieurs marqueurs moléculaires reliés à diverses caractéristiques d'intérêt en amélioration génétique des arbres forestiers. Nos travaux ont bénéficié de développements scientifiques et technologiques récents en génomique forestière dont un important catalogue de gènes pour l'épinette blanche, la découverte de dizaines de milliers de SNPs et la mise en place de méthode de génotypage à très haut débit permettant de caractériser des milliers de SNPs chez des milliers d'individus. Ainsi, nous avons effectivement accéléré le développement des marqueurs et pu montrer leur utilité potentielle.

Les résultats obtenus indiquent que les marqueurs moléculaires ont un pouvoir prédictif potentiel suffisamment grand pour permettre leur utilisation dans les programmes d'amélioration génétique menés au Québec, et ce, à brève échéance. L'application pratique des marqueurs en génétique forestière est le prochain défi que nous comptons relever dans le cadre d'un nouveau projet intitulé SmartForests.

Une fois développés et validés pour la sélection génétique, les marqueurs moléculaires pourraient offrir différents types d'avantages. Par exemple, diminuer le temps nécessaire pour effectuer la sélection des arbres-mères ayant la meilleure valeur génétique, puisque l'évaluation d'après les gènes peut

se faire chez les très jeunes arbres, contrairement à l'évaluation en plantations comparatives qui nécessite plusieurs années. Cette évaluation s'appliquerait notamment aux vergers à graines pour l'établissement de la génération suivante de vergers clonaux ou pour l'éclaircie des vergers des semis. Une autre utilisation potentielle de marqueurs consiste à remplacer les croisements dirigés par la sélection au sein de familles mono-parentales grâce aux études de paternité et d'apparentement. Pour les caractéristiques du bois qui sont sous fort contrôle génétique mais n'apparaissent qu'après plusieurs années de croissance, en plus de coûter cher à évaluer, les marqueurs permettraient de sauver du temps et de l'argent. Enfin, il suffit de quelques marqueurs pour faire l'évaluation des contaminations en vergers à graines ou encore effectuer un contrôle de qualité des lots de semences.

Références

- BEAULIEU J, T. DOERKSEN, B. BOYLE, S. CLÉMENT, M. DESLAURIERS, S. BEAUSEIGLE, S. BLAIS, P.-L. POULIN, P. LENZ, S. CARON, P. RIGAUD, P. BICHO, J. BOUSQUET et J. MACKEY, 2011. *Association genetics of wood physical traits in the conifer white spruce and relationships with gene expression*. Genetics, 188: 197–214.
- BEDON, F., C. BOMAL, S. CARON, C. LEVASSEUR, B. BOYLE, S.D. MANSFIELD, A. SCHMIDT, J. GERSHENZON, J. GRIMA-PETTENATI, A. SÉGUIN et J. MACKEY, 2010. *Subgroup 4 R2R3-MYBs in conifer trees: gene family expansion and contribution to the isoprenoid-oriented response*. J. Exp. Bot. 61 : 3847–3864.
- BOMAL, C., F. BEDON, S. CARON, S.D. MANSFIELD, C. LEVASSEUR, J.E.K. COOKE, S. BLAIS, L. TREMBLAY, M.-J. MORENCY, N. PAVY, J. GRIMA-PETTENATI, A. SÉGUIN et J. MACKEY, 2008. *Involvement of Pinus taeda MYB1 and MYB8 in phenylpropanoid metabolism and secondary cell wall biogenesis: a comparative in planta analysis*. J. Exp. Bot., vol. 59, p. 3925–3939.
- EL KAYAL, W., C.C.G. ALLEN, C.J.-T. JU, E. ADAMS, S. KING-JONES, L.I. ZAHARIA, S.R. ABRAMS et J.E.K. COOKE, 2011. *Molecular events of apical bud formation in white spruce, Picea glauca*. Plant Cell Environ., 34: 480–500.
- LENZ, P., J. BEAULIEU, A. CLOUTIER et J. MACKEY, 2010. *Genetic control of wood properties in Picea glauca – an analysis of trends with cambial age*. Can. J. For. Res., 40: 703–715.
- LENZ, P., J. MACKEY, A. RAINVILLE, A. CLOUTIER et J. BEAULIEU, 2011. *The influence of cambial age on breeding for wood properties in Picea glauca*. Tree Genetics and Genomes 7: 641–653.
- NAMROUD, M.-C., J. BEAULIEU, J. LAROCHE, N. JUGE et J. BOUSQUET, 2008. *Scanning the genome for gene SNPs involved in adaptive population differentiation in white spruce*. Mol. Ecol. 17: 3599–3613.
- PAVY, N., B. BOYLE, C. NELSON, C. PAULE, I. GIGUÈRE, S. CARON, L.S. PARSONS, N. DALLAIRE, F. BEDON, H. BÉRUBÉ, J.E.K. COOKE et J. MACKEY, 2008. *Identification of conserved core xylem gene sets: conifer cDNA microarray development, transcript profiling and computational analyses*. New Phytol. 180 : 766–786.

PAVY, N., L.S. PARSONS, C. PAULE, J. MACKAY et J. BOUSQUET, 2006. *Automated SNP detection from a large collection of white spruce expressed sequences: contributing factors and approaches for the categorization of SNPs*. BMC Genomics, 7: 174.

PELGAS B., J. BOUSQUET, P. G. MEIRMANS, K. RITLAND et N. ISABEL, 2011. *QTL mapping in white spruce: gene maps and genomic regions underlying adaptive traits across pedigrees, years and environments*. BMC Genomics, 12: 145.

RIGAULT, P., B. BOYLE, P. LEPAGE, J. COOKE, J. BOUSQUET et J. MACKAY, 2011. *A white spruce gene catalogue for conifer genome analyses*. Plant Physiol. doi:10.1104/pp.111.179663.

Stands en lien avec le thème du colloque

Stands thématiques au Carrefour Forêt Innovations (Classés par domaine du Carrefour)

Amélioration génétique

- 14 *Décoder le génome des arbres pour répondre aux nouveaux enjeux forestiers*
J. Mackay, J. Bousquet, J. Beaulieu, N. Isabel, N. Gélinas, M. Perron
- 16 *Du bois de plantation pour des produits à valeur ajoutée*
M. Despots, G. Numainville, F. Gosselin, J.-N. Drouin, G. Lapointe, M. Perron
- 43 *L'épinette de Norvège : une espèce très productive qui ne montre aucun signe d'envahissement*
M.-J. Mottet, J.-S. Joannette, G. Prigent, M. Perron, J. DeBlois, M.-C. Lambert
- 42 *Voir le bois à travers la loupe moléculaire*
J. Beaulieu, T. Doerken, M. Deslauriers, S. Clément, P. Laplante, P. Lenz

Semences, production de plants et reboisement

- 15 *Application opérationnelle de la biotechnologie forestière : cas de l'épinette blanche*
L. Tremblay, J. Gingras, M. Rioux, A. Dionne, J. Gravel, C. Gagné
- 41 *L'activité de l'eau : un outil innovant pour la conservation ex situ de la diversité végétale*
F. Colas, P. Baldet, M. Bettez, A. Rainville, C. Périé, A. Mehamha
- 111 *Les variétés somatiques à haut rendement : un outil précieux d'intensification de la production*
M. Lamhamedi, A. Rainville, F. Colas, N. Wahid, G. Prigent, J. Gravel-Grenier
- 112 *Production de plants forestiers et changements climatiques : cas des extrêmes climatiques hivernaux*
M. Lamhamedi, M. Renaud, P. Desjardins, L. Veilleux
- 109-110 *Mécanisation de la production de plants forestiers en récipients*
L. Bouchard, P. Verlainne J.-B., J. Lortie
- 113 *Mesures novatrices pour une protection accrue de la qualité des eaux souterraines en pépinière*
J. Gagnon, D. Girard
- 99 *Modélisation de la croissance et du rendement des plantations*
G. Prigent, J. Ménétrier, G. Picher, I. Auger, R. Poliquin, F. Lacombe
- 100 *Planter des arbres mieux adaptés aux changements climatiques, c'est possible!*
A. Rainville, J. Beaulieu, L. Langevin, R. St-Amant, T. Logan, M.-C. Lambert, A. Deshaies
- 66 *Études multidisciplinaires du travailleur sylvicole : concilier bien-être et productivité*
D. Dubeau, D. Imbeau, L. G. LeBel, P.-A. Dubé, M.-È. Proulx, B. Farbos
- 79 *Valorisation du lisier de porc par la fertilisation de plantations de peupliers hybrides*
J.-P. Faucher, C. Camiré, E. Thiffault, D. Paré, S. Masse, M. Bernier-Cardou

Aménagement forestier durable

- 71 *Identification des sites à fort potentiel pour l'intensification de la production ligneuse*
J. Gosselin, G. Cyr, V. Laflèche, F. Muessenberger, S. Miron, C. Périé, J.-P. Saucier, J. Bégin, M. Riopel
- 44 *La connaissance écologique au service de l'aménagement durable du territoire forestier*
J. Gosselin, G. Cyr, Martin D., V. Laflèche, M. Major, C. Morneau
- 72 *Plus de bois, plus vite, avec les mélèzes et les peupliers*
M. Perron, P. Périnet, J. Ménétrier, G. Prigent

Changements climatiques

- 74 *Carbone Boréal et Programme de Gestion Durable du Carbone Forestier*
J.-F. Boucher, P. Tremblay, J.-R. Wells, N. Huybens, C. Villeneuve, D. Lord
- 75 *Changements climatiques : quel avenir pour la croissance de nos forêts?*
A. Deslauriers, S. Rossi, H. Morin, C. Lupi, E. Belien, L. Balducci
- 101 *Impacts des changements climatiques sur la répartition des arbres*
C. Périé, M.-C. Lambert, N. Casajus, D. Chambers, L. Boisvert-Marsh, S. de Blois
- 76 *Sous quel climat poussera la forêt de demain?*
D. Houle, T. Logan
- 34 *Stratégies d'adaptation aux changements climatiques*
M. Campagna, C. Boisvenue, C. Périé, R. Ouimet, A. Rainville, D. Houle

Protection des forêts, pathologie et entomologie

- 97 *Consortium de recherche sur les insectes forestiers (iFor)*
É. Bauce, R. Berthiaume, J. Brodeur, E. Despland, C. Guertin, C. Hébert, J. Ibarzabal, R. Lavallée, F. Lorenzetti, Y. Mauffette, D. T. Quiring, L. Royer, R. Trudel, K. van Franzenhuyzen
- 82 *La protection des forêts contre les insectes et les maladies des arbres*
L. Innes, J. Bouchard, C. Piché, S. Simard
- 84 *Les activités de protection contre les insectes et les maladies de nos forêts québécoises*
C. Fournier, L. Innes, J. Bouchard, L. Morneau, P. Therrien
- 80-81 *Les maladies exotiques, une menace majeure pour nos forêts*
J. Bérubé, P. DesRochers, R. Hamelin, G. Laflamme, D. Rioux, P. Tanguay
- 96 *Quoi de neuf dans les recherches sur la maladie hollandaise de l'orme*
L. Bernier, G. Bouvet, J. Dufour, V. Jacobi, E. Sayuri Naruzawa, K. Plourde

Stands corporatifs au Carrefour Forêt Innovations

- 3 *Bureau du Forestier en chef*
- 6 *Centre d'étude de la forêt*
- 26 *FPIInnovations*
- 38 *Office des producteurs de plants forestiers du Québec*
- 19 *Réseau Ligniculture Québec*



L'Office des producteurs de plants forestiers du Québec est un organisme qui regroupe toutes les pépinières forestières privées qui produisent des plants destinés au programme de reboisement des forêts publiques et privées du Québec.

Depuis 20 ans, ces 15 pépinières ont développé une expertise extraordinaire pour la production de plus de 70 produits de reboisement différents. Elles ont livré au-delà de 2 milliards de plants de diverses essences, s'intégrant à nos écosystèmes avec succès grâce à leur qualité.

Cette recherche de la qualité a amené les producteurs de l'Office à mettre en place un Fonds de recherche et de développement leur permettant d'optimiser cette qualité et de rester à l'affût des nouvelles techniques de production. Ce fonds est financé, à part égale, par les producteurs et par le Ministère des ressources naturelles et de la faune du Québec. Ce fonds s'adresse aux membres de l'OPPFQ et aux organismes de recherche collaborant avec un ou des producteurs dans un projet de recherche et développement.

Les plants forestiers, produits par les producteurs de pépinières privées du Québec, représentent annuellement une valeur d'environ 15 millions de dollars. Ces pépinières sont situées dans la plupart des régions administratives et offrent de l'emploi à 1 200 personnes sur une base annuelle ou saisonnière.



RIGI-POTS

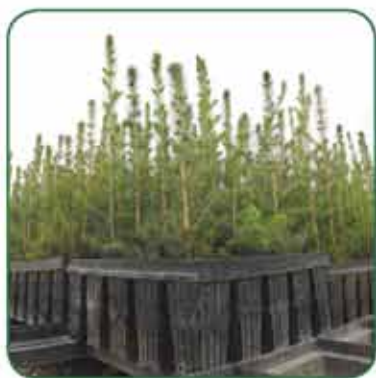
CONÇUS POUR RÉPONDRE AUX BESOINS DES
PÉPINIÈRES ET DES ENTREPRISES FORESTIÈRES

**IPL PROPOSE DES
SOLUTIONS POUR LE
MARCHÉ DE REBOISEMENT
EN TERMES DE :**



DURABILITÉ

- D'une solidité pour assurer le transport de la serre à la plantation
- Fabrication monobloc en polyéthylène
- Réutilisation durant plusieurs années



INGÉNIOSITÉ

- La forme conique ou pyramidale des cavités limite l'effort de retrait des semis et l'impact au système racinaire
- Les nervures dans les cavités réduisent la spiralisation des racines



RENTABILITÉ

- La densité des plants au mètre carré optimise l'espace en serre
- Les trous de drainage à l'extrémité des cavités préviennent les problèmes de suralimentation en eau



Au ministère des Ressources naturelles et de la Faune (MRNF), depuis près de 30 ans, les équipes de R-D en génétique, production de semences et de plants de la Direction de la recherche forestière (DRF) et la Direction générale des pépinières et des stations piscicoles (DGPSP) assurent un soutien scientifique et technique pour l'ensemble des producteurs de plants forestiers et des centres de semences, de bouturage et d'embryogenèse somatique du Québec. Ce soutien se traduit par des recommandations précises, à une échelle opérationnelle, sur les aspects reliés à la qualité des semences et à la culture de plants forestiers en pépinière en vue d'améliorer constamment la qualité des différents types de plants, ainsi que la croissance des plantations.

Poursuivant dans la tradition des événements de transfert de connaissances, de technologie et de savoir-faire auprès des 21 pépinières forestières du Québec, la DRF s'est une nouvelle fois associée avec la DGPSP et l'Office des producteurs de plants forestiers du Québec pour organiser un colloque de transfert de connaissances et de savoir-faire intitulé : « Production de plants forestiers au Québec : la culture de l'innovation ». Ce colloque a pour objectif de présenter des résultats de plusieurs projets de recherche et de développement réalisés au MRNF, certains de concert avec d'autres universités et centres de recherche, en collaboration avec des pépinières privées et publiques. Parmi les conférences, citons : des réponses aux principales préoccupations techniques des pépiniéristes du Québec, les effets de l'utilisation des toiles claires sur le développement racinaire de plants d'épinette blanche, l'effet de la fertilisation foliaire à base d'urée sur la concentration en azote de plants d'épinette noire, la réponse de familles d'épinette blanche aux changements climatiques, le potentiel des plants d'épinette blanche issus d'embryogenèse somatique ainsi que le développement d'outils de génétique moléculaire pour accélérer les programmes d'amélioration génétique.