

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



0 10 20 30 40 50 60 78 80 90 100

# Performance de plants mycorhizés après 4 à 21 ans de croissance dans 15 plantations établies dans plusieurs régions écologiques du Québec

par Jean Gagnon

MÉMOIRE DE RECHERCHE FORESTIÈRE N° 178

DIRECTION DE LA RECHERCHE FORESTIÈRE



# **Performance de plants mycorhizés après 4 à 21 ans de croissance dans 15 plantations établies dans plusieurs régions écologiques du Québec**

par Jean Gagnon, ing.f., M. Sc.

**MÉMOIRE DE RECHERCHE FORESTIÈRE N° 178**

**DIRECTION DE LA RECHERCHE FORESTIÈRE**

# Mandat de la DRF

La Direction de la recherche forestière a pour mandat de participer activement à l'orientation de la recherche et à l'amélioration de la pratique forestière au Québec, dans un contexte d'aménagement forestier durable, en réalisant des travaux de recherche scientifique appliquée. Elle acquiert de nouvelles connaissances, du savoir-faire et du matériel biologique et contribue à leur diffusion ou leur intégration au domaine de la pratique. Elle subventionne aussi des recherches en milieu universitaire, le plus souvent dans des créneaux complémentaires à ses propres travaux.

## Les mémoires de recherche forestière de la DRF

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

Vous pouvez adresser vos demandes à :

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

© Gouvernement du Québec

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

Gagnon, J., 2016. *Performance de plants mycorhizés après 4 à 21 ans de croissance dans 15 plantations établies dans plusieurs régions écologiques du Québec*. Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de la recherche forestière. Mémoire de recherche forestière n° 178. 31 p.

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

ISSN : 1183-3912  
ISBN : 978-2-550-76254-6  
ISBN (PDF) : 978-2-550-76255-3  
G.F.D.C. 232.322.45 (714)  
L.C. SD 404.3

## Notes biographiques



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. En 1987, il a obtenu sa maîtrise en sciences forestières de l'Université Laval après une étude en pépinière forestière sur les effets de la fertilisation

azotée sur la mycorhization et la croissance des résineux en récipients après l'inoculation artificielle des plants avec des champignons ectomycorhiziens. En 1988, il a effectué un stage de 8 mois au Centre de recherche forestière de l'Institut National de la Recherche Agronomique (INRA) à Nancy, en France, où il a travaillé sur la fertilisation et la mycorhization du chêne rouge cultivé en récipients.

Depuis 1987, Jean Gagnon est chargé de recherches à la Direction de la recherche forestière du ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs du Québec. Ses premiers travaux ont porté sur les effets de régies de fertilisation

sur la mycorhization des essences produites en récipients dans les pépinières forestières publiques. Depuis 1999, il s'intéresse aux moyens de réduire le lessivage des éléments minéraux pour mieux protéger la qualité des eaux souterraines des pépinières forestières du Québec. Il participe au développement d'outils informatiques qui aideront les pépiniéristes à mieux gérer leurs cultures en récipients, comme les logiciels *IRREC* et *FERTIRREC* de gestion de l'irrigation et de la fertilisation et une balance électronique sans fil qui permettra de mesurer, en temps réel, la teneur en eau du substrat. Il étudie les processus de transformation biochimique des engrais azotés (ammonium, nitrate, urée) ainsi que leurs effets sur le lessivage des éléments minéraux et la croissance des plants forestiers cultivés en récipients et à racines nues. Il teste la fertilisation foliaire d'urée comme moyen d'augmenter rapidement la concentration foliaire en azote (N) des résineux en récipients et d'atteindre les teneurs minimales en N requises pour ces cultures. Il est membre du Comité environnement des pépinières du MFFP depuis sa création en 2002.



## Résumé

Dans un souci d'améliorer la réussite des plantations au Québec, la mise en terre de plants inoculés artificiellement en pépinière avec un champignon ectomycorhizien a été envisagée, compte tenu des avantages nutritionnels, métaboliques et prophylactiques que pourraient procurer ces champignons aux plants forestiers, aussi bien en pépinière qu'en site de reboisement. Jusqu'à maintenant, aucune étude n'a été publiée sur la performance en plantation de plants mycorhizés sur les différents sites forestiers de la forêt boréale du Québec (Canada). La présente étude vise à vérifier si la mise en terre de plants mycorhizés en récipients peut améliorer leur performance (croissance, survie) sur les différents sites de reboisement du Québec par rapport à des plants témoins non inoculés. Quinze plantations ont été établies de 1985 à 1995, sur 12 sites forestiers et 3 friches agricoles répartis dans 6 unités de gestion du ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (Bas-Saint-Maurice, Charlevoix, Grand-Portage, Harricana-Sud, Rouyn-Noranda et Saint-Félicien). Chaque plantation comprenait des plants inoculés et témoins d'une de 4 espèces résineuses (épinette noire : *Picea mariana* [Mill.] B.S.P., épinette blanche : *Picea glauca* [Moench] Voss, pin gris : *Pinus banksiana* Lamb., mélèze laricin : *Larix laricina* [Du Roi] K. Koch) produits en récipients 45-110, 25-350A ou 45-340. Pendant leur culture en pépinière, ces plants mycorhizés avaient été inoculés artificiellement avec l'une des 3 souches (0101, 92.4 et 92.9) du champignon ectomycorhizien *Laccaria bicolor* (Maire) Orton. Les plants témoins non inoculés avaient été produits dans la même

aire de culture et avaient reçu les mêmes régies de fertilisation et d'irrigation que les plants inoculés. Ce mémoire présente les résultats des dernières mesures effectuées dans ces 15 plantations.

Au moment de la mise en terre, les plants inoculés artificiellement en pépinière avec *L. bicolor* avaient la majorité (moyenne de 57 %) de leurs racines courtes mycorhizées par ce champignon dans seulement 4 des 15 plantations; ce pourcentage de mycorhization était plus faible dans les 11 autres plantations (moyennes : 8 à 47 %). Les racines courtes des plants témoins non inoculés, quant à elles, étaient mycorhizées naturellement dans une proportion de 30 à 54 % par les champignons *Thelephora terrestris* Ehrh. et *Laccaria* sp. présents en pépinière. Par ailleurs, lors du reboisement, les plants inoculés avec *L. bicolor* étaient significativement ( $\alpha = 0,05$ ) plus petits que les plants témoins dans 6 des 15 plantations, et significativement plus grands dans une seule des 15 plantations.

Après le reboisement, les mesures finales montrent que l'inoculation avec *L. bicolor* n'a procuré aucun gain significatif en hauteur, en diamètre ou en survie aux plants inoculés par rapport aux plants témoins, et ce, que le taux de mycorhization initial des plants inoculés ait été faible (< 50% : 11 plantations) ou moyen (57 % : 4 plantations). À notre avis, les taux de mycorhization relativement faibles à la sortie de la pépinière des plants inoculés avec *L. bicolor*, de même que l'abondante mycorhization naturelle des plants témoins non inoculés, expliqueraient principalement ces résultats.

Mots clés : champignon ectomycorhizien, plants en récipients, pépinière forestière, site de reboisement, plants de fortes dimensions.

## Abstract

Given the nutritional, metabolic and prophylactic benefits that ectomycorrhizal fungi could provide to forest seedlings both in the nursery and on reforestation sites, the artificial inoculation of seedlings with an ectomycorrhizal fungus in the nursery was considered as a means to improve plantation success. Until now, no study has reported results for mycorrhizal seedlings established on boreal forest sites of Quebec (Canada). This study aims to verify whether planting mycorrhizal seedlings can improve seedling performance (growth, survival) on various Quebec reforestation sites, compared with that of non-inoculated control seedlings. Fifteen plantations were established from 1985 to 1995 on 12 forest sites and 3 abandoned agricultural lands distributed in 6 management units of the ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (Bas-Saint-Maurice, Charlevoix, Grand-Portage, Harricana-Sud, Rouyn-Noranda and Saint-Félicien). Each plantation included inoculated and control seedlings of 4 conifer species (black spruce: *Picea mariana* [Mill.] B.S.P., white spruce: *Picea glauca* [Moench] Voss, jack pine: *Pinus banksiana* Lamb., Eastern larch: *Larix laricina* [Du Roi] K. Koch) produced in 45-110, 25-350A, or 45-340 containers. During their nursery production, seedlings had been inoculated artificially with one of the 3 strains (0101, 92.4 and 92.9) of the ectomycorrhizal fungus *Laccaria bicolor* (Maire) Orton. Non-inoculated control seedlings

were produced in the same growing area and received the same fertilizations and irrigations. This paper presents the results of the final measurements performed in these 15 plantations.

At the time of planting, *L. bicolor* had colonized the majority of short roots (mean: 57%) of nursery-inoculated seedlings in only 4 of the 15 plantations; this mycorrhization rate was lower in the 11 other plantations (on average, 8% to 47%). At the same time, the fungi *Thelephora terrestris* Ehrh. and *Laccaria* sp. had naturally colonized 30 to 54% of the roots of non-inoculated control seedlings in the nursery. Moreover, at the time of planting, seedlings artificially inoculated with *L. bicolor* were significantly ( $\alpha = 0.05$ ) smaller than control seedlings in 6 of the 15 sites, whereas they were significantly larger in only one of the 15 plantations.

Final measurements show that inoculation with *L. bicolor* provided no significant gain in height, diameter or survival to seedlings after planting, no matter whether the rate of mycorrhization was low (<50% in 11 plantations) or average (57% in 4 plantations). In our opinion, the relatively low rates of mycorrhization before planting of inoculated seedlings and the abundant natural mycorrhization of non-inoculated control seedlings could mainly explain these results.

**Keywords:** ectomycorrhizal fungus, containerized seedlings, forest nursery, planting site, large seedlings.

# Remerciements

Mes remerciements s'adressent en premier lieu au personnel des pépinières forestières publiques du Québec (Direction générale de la production de semences et de plants forestiers, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs [MFFP]) pour leur collaboration dans les dispositifs de mycorrhization installés en pépinière. Mes remerciements s'adressent aussi à Charles-Gilles Langlois pour ses conseils judicieux alors qu'il agissait à titre de chef de la Division de R-D sur les semences, boutures et plants de la Direction de la recherche forestière (DRF) du MFFP, ainsi qu'à Mario Renaud, aussi de la DRF, pour sa grande collaboration et son aide technique dans diverses étapes de ce projet. Je tiens à remercier Claude Fortin, ancien responsable des productions de plants dans les serres et tunnels du Centre de recherche en biologie forestière (CRBF) de l'Université Laval, pour son implication dans la production des plants mycorrhizés en récipients au CRBF. Je remercie également Julie Samson pour la production en fermenteur d'inoculants liquides de champignons ectomycorrhiziens dans un laboratoire de la DRF. Mes remerciements s'adressent aussi au personnel des unités de gestion du MFFP du Bas-Saint-Maurice, de Charlevoix, du Grand-Portage, d'Harricana-Sud, de Rouyn-Noranda et de Saint-Félicien, pour leur précieuse collaboration lors de la sélection des sites de reboisement et du mesurage de certaines plantations.

Je tiens aussi à remercier Serge Plamondon, ancien technicien forestier à la DRF, et Nicole Robert de la DRF, pour leur grande implication lors de l'établissement et du mesurage des plantations étudiées.

Mes remerciements s'adressent également au personnel suivant de la DRF : Jacques Carignan, Simon Désalliers, Govinda St-Pierre, Christine Vigeant et Christian Villeneuve pour le mesurage de 5 plantations en 2011, Jean Noël et Véronique Poirier pour l'élaboration de cartes écoforestières et Josianne DeBlois pour les analyses statistiques réalisées à la suite du mesurage de 5 plantations en 2011.

Je tiens à remercier également Mohammed Lamhamedi et Guy Prigent pour leurs commentaires pertinents et leurs conseils judicieux lors de la rédaction de ce mémoire, et aussi ce dernier pour les calculs d'indices de qualité de station (IQS) de 5 plantations. Je remercie Nelson Thiffault pour les informations sur les stations à éricacées. Mes remerciements s'adressent aussi au personnel du laboratoire de chimie organique et inorganique (ISO/CEI 17025) du Service de soutien scientifique de la DRF pour toutes les analyses chimiques (tissus et sols) effectuées dans le cadre de cette étude. Je remercie les deux évaluateurs anonymes et l'éditeur associé, M. Mohammed Lamhamedi, pour la révision scientifique de ce document. Finalement, je tiens à remercier beaucoup Denise Tousignant pour la révision linguistique, son aide précieuse et ses conseils judicieux dans toutes les étapes de la rédaction et de l'édition de l'ouvrage, de même que Nathalie Langlois et Maripierre Jalbert pour la mise en page et le graphisme.

Ces travaux ont été financés par la DRF dans le cadre du projet 03210S (Mycorrhization des plants produits en récipients) initié en 1987.



# Table des matières

<b>Résumé</b> .....	v
<b>Abstract</b> .....	vi
<b>Remerciements</b> .....	vii
<b>Liste des tableaux</b> .....	xi
<b>Liste des figures</b> .....	xiii
<b>Liste des annexes</b> .....	xv
<b>Introduction</b> .....	1
<b>Chapitre premier – Matériel et méthodes</b> .....	5
1.1 Caractéristiques des sites de plantation .....	5
1.2 Caractéristiques des plants à la sortie de la pépinière .....	6
1.3 Particularités de chaque dispositif de plantation .....	6
1.3.1 Sites forestiers .....	6
1.3.1.1 Épinette noire 1989–1993 (Lacoste B) .....	6
1.3.1.2 Épinette noire 1990–2011 (Juchereau, Juchereau A).....	6
1.3.1.2.1 Indices de qualité de station (IQS) .....	6
1.3.1.2.2 Pourcentage de recouvrement des éricacées après 21 ans .....	8
1.3.1.3 Épinette blanche 1989–1998 (Asselin) .....	8
1.3.1.4 Pin gris 1985–1991 (Soisson 1 et 2) et 1985–1998 (Berry) .....	8
1.3.1.5 Pin gris 1989–1994 (Desautels B et C) et 1989–1996 (Desautels A).....	8
1.3.1.6 Mélèze laricin 1989–1993 (Basserode, Montbray) .....	8
1.3.2 Sites sur friches agricoles.....	9
1.3.2.1 Pin gris 1994–2011 (Princeville) .....	9
1.3.2.2 Pin gris 1995–2011 (Saint-Cyrille-de-Wendover) .....	9
1.3.2.2.1 Pin gris en récipients 25-350A .....	9
1.3.2.2.2 Pin gris en récipients 45-340.....	9
1.3.2.3 Indices de qualité de station (IQS) .....	9
1.4 Mesures de croissance en plantation.....	9
1.5 Analyses statistiques.....	9
<b>Chapitre deux – Résultats</b> .....	11
2.1 Sites forestiers.....	11
2.1.1 Épinette noire 1989–1993 (Lacoste B) .....	11
2.1.2 Épinette noire 1990–2011 (Juchereau, Juchereau A) .....	11
2.1.2.1 Indices de qualité de station (IQS) et pourcentage de recouvrement des éricacées .....	12
2.1.3 Épinette blanche 1989–1998 (Asselin) .....	12
2.1.4 Pin gris 1985–1991 (Soisson 1 et 2) et 1985–1998 (Berry) .....	12
2.1.5 Pin gris 1989–1994 (Desautels B et C) et 1989–1996 (Desautels A).....	13
2.1.6 Mélèze laricin 1989–1993 (Basserode, Montbray).....	14

2.2 Sites sur friches agricoles .....	15
2.2.1 Pin gris 1994–2011 (Princeville) .....	15
2.2.2 Pin gris 1995–2011 (Saint-Cyrille-de-Wendover) .....	15
2.2.2.1 Plants en récipients 25-350A.....	15
2.2.2.2 Plants en récipients 45-340 .....	16
2.2.3 Indices de qualité de station (IQS).....	16
<b>Chapitre trois – Discussion</b> .....	17
3.1. Causes possibles de l’absence de gains significatifs en plantations .....	17
3.1.1. Faible taux de mycorhization des plants inoculés artificiellement en pépinière.....	17
3.1.2 Mycorhization naturelle en pépinière des plants témoins non inoculés .....	18
3.1.3 Abondance naturelle de champignons ectomycorhiziens sur les sites de reboisement du Québec .....	18
3.1.4 Taux élevé de survie des plants témoins dans les plantations .....	19
3.1.5 Plus petite taille des plants inoculés artificiellement à la sortie de la pépinière .....	19
3.1.6 Bilan .....	19
3.2 Cas particulier de l’épinette noire sur un site à éricacées (Juchereau A).....	20
<b>Conclusion</b> .....	21
<b>Références bibliographiques</b> .....	23
<b>Annexes</b> .....	29

# Liste des tableaux

<b>Tableau 1.</b> Pourcentage initial de mycorhization, hauteur, diamètre et taux de survie moyens des plants d'épinette noire produits en récipients 45-110 et plantés sur le site Lacoste B .....	11
<b>Tableau 2.</b> Pourcentage initial de mycorhization, hauteur, diamètre et taux de survie moyens des plants d'épinette noire produits en récipients 45-110 et plantés sur les sites de Juchereau et Juchereau A .....	11
<b>Tableau 3.</b> Pourcentage initial de mycorhization, hauteur, diamètre et taux de survie moyens des plants d'épinette blanche produits en récipients 45-110 et plantés sur le site Asselin .....	13
<b>Tableau 4.</b> Pourcentage initial de mycorhization, hauteur, diamètre et taux de survie moyens des plants de pin gris produits en récipients 45-110 et plantés sur les sites de Soisson 1, Soisson 2 et Berry .....	13
<b>Tableau 5.</b> Pourcentage initial de mycorhization, hauteur, diamètre et taux de survie moyens des plants de pin gris produits en récipients 45-110 et plantés sur les sites de Desautels A, Desautels B et Desautels C .....	14
<b>Tableau 6.</b> Pourcentage initial de mycorhization, hauteur, diamètre et taux de survie moyens des plants de mélèze laricin produits en récipients 45-110 et plantés sur les sites de Basserode et de Montbray .....	14
<b>Tableau 7.</b> Pourcentage initial de mycorhization, hauteur, diamètre et taux de survie moyens des plants de pins gris produits en récipients 45-340 et plantés sur le site de Princeville .....	15
<b>Tableau 8.</b> Pourcentage initial de mycorhization, hauteur, diamètre et taux de survie moyens des plants de pin gris produits en récipients (25-350A, 45-340) et plantés dans 2 dispositifs sur le site de Saint-Cyrille-de-Wendover .....	15



## Liste des figures

- Figure 1.** Répartition géographique provinciale des 15 plantations de plants mycorhizés (EPN : épinette noire, EPB : épinette blanche, PIG : pin gris, MEL : mélèze laricin) établies de 1985 à 1995 sur 12 sites forestiers et 3 sites sur friches agricoles ..... 5
- Figure 2.** Apparence des champignons ectomycorhiziens *Laccaria bicolor* 0101 et *Thelephora terrestris* sur des plants de pins gris 1+0 cultivés en récipients 45-110 ..... 7
- Figure 3.** Pourcentage de recouvrement moyen des 3 espèces d'éricacées présentes dans les plantations d'épinette noire des sites Juchereau et Juchereau A, 21 ans après leur mise en terre ..... 12
- Figure 4.** Plantation de pin gris mycorhizés en récipients établie 17 ans plus tôt sur une station fertile, sur une friche agricole à Princeville (IQS de 8,3 m à 15 ans) ..... 16



## Liste des annexes

<b>Annexe 1.</b> Caractéristiques écologiques et coordonnées des sites de plantation des dispositifs établis de 1985 à 1995 .....	29
<b>Annexe 2.</b> Caractéristiques physicochimiques du sol des sites de plantation au moment de l'installation des dispositifs sur 12 sites forestiers et 2 sites de friches agricoles .....	30
<b>Annexe 3.</b> Variables morphologiques et concentration foliaire en azote (N) mesurées avant la mise en terre des plants en récipients de 4 essences inoculés avec 3 souches du champignon <i>Laccaria bicolor</i> ainsi que des plants témoins non inoculés .....	31



# Introduction

Plus de 25 000 espèces de plantes vasculaires (herbacées ou ligneuses, arbres ou arbustes) dans le monde sont associées à des champignons ectomycorhiziens, des champignons supérieurs de l'embranchement des basidiomycètes surtout, mais parfois de celui des ascomycètes (Fortin *et al.* 2008). Selon Högberg et Högberg (2002), ceux-ci peuvent représenter jusqu'à un tiers de la biomasse microbienne présente dans les sols forestiers. Ils sont omniprésents dans les forêts d'ici et d'ailleurs (Bâ *et al.* 2011, Baar *et al.* 1994, Fortin *et al.* 2008, Marx 1991, Smith et Read 1997) et vivent en symbiose avec les systèmes racinaires des essences résineuses et de certaines essences feuillues, formant avec celles-ci une association champignon-racine appelée ectomycorhize. Selon Le Tacon *et al.* (1992), les champignons ectomycorhiziens se retrouvent sur environ 90 % des arbres des forêts tempérées. Un même arbre peut être associé à plusieurs espèces de champignons ectomycorhiziens.

Une association symbiotique est bénéfique pour les deux partenaires, puisqu'elle procure des avantages à chacun d'eux. En forêt, le plant fournit au champignon hétérotrophe des produits de la photosynthèse (sucres) nécessaires pour assurer sa survie et compléter son cycle vital, ce qui procure au champignon un avantage nutritionnel. À son tour, le champignon ectomycorhizien procure à son hôte (plant, arbre) d'autres avantages nutritionnels (meilleure absorption de l'eau et des éléments minéraux résultant de l'augmentation significative de la surface d'absorption du système racinaire), métaboliques (sécrétion d'hormones de croissance) et prophylactiques (résistance accrue aux pathogènes) (Fortin *et al.* 2008, Fortin et Lamhamedi 2009, Kropp et Langlois 1990, Lamhamedi *et al.* 2009, Langlois 1988, Smith et Read 1997). Selon Fortin *et al.* (2008), les champignons ectomycorhiziens confèrent aussi aux plants une tolérance accrue à certains métaux (aluminium, fer, manganèse) fortement solubles dans les sols acides de la forêt boréale ainsi qu'à certains métaux lourds (ex : arsenic, cadmium) présents sur certains sites miniers dégradés.

Compte tenu des avantages observés en milieu naturel, plusieurs équipes de recherche ont testé l'inoculation artificielle de plants résineux (en majorité) et feuillus avec ces champignons (ex : *Laccaria bicolor*, *Pisolithus tinctorius* [Pers.] Coker & Couch) un peu partout dans le monde (Canada : Browning

et Whitney 1991, Gagné *et al.* 2006, Gagnon 1988, 1996, Gagnon *et al.* 1987, 1988, 1991, 1995, Khasa *et al.* 2001, Langlois et Fortin 1982, Quoreshi et Timmer 2000, Quoreshi *et al.* 2009; États-Unis : Castellano et Trappe 1985, Marx 1980, Marx et Cordell 1988; France : Le Tacon *et al.* 1988, 1997; Europe : Le Tacon *et al.* 1992; Afrique : Bâ *et al.* 2011, Lamhamedi *et al.* 2009; Australie : Malajczuk *et al.* 1994). Dans un premier temps, ces études ont permis de produire des plants adéquatement mycorhizés en pépinière forestière. Par la suite, ces plants inoculés artificiellement en pépinière ont été évalués en plantation sur différents sites afin d'évaluer s'ils poussaient et survivaient mieux, une fois mis en terre, que les plants témoins non inoculés. Très souvent, des gains de croissance (hauteur, diamètre, volume) et de survie ont été observés chez les plants mycorhizés, tant sur des sites forestiers (Browning et Whitney 1992, Gagné *et al.* 2006, Marx *et al.* 1988, 1992, Selosse *et al.* 2000, Villeneuve *et al.* 1991), où les champignons ectomycorhiziens indigènes sont abondants, que sur des sites dégradés (Danielson et Visser 1989, Le Tacon *et al.* 1997, Malajczuk *et al.* 1994) où il y a peu d'inoculant naturel. À titre d'exemple, Marx et ses collègues (Marx 1980, 1991, Marx *et al.* 1992) ont obtenu des gains de croissance en hauteur de 25 à 100 % à la suite de la mise en terre de diverses espèces de pins inoculées avec le champignon *Pisolithus tinctorius* dans le sud-est des États-Unis (Floride, Caroline du Nord). En France, Selosse *et al.* (2000) ont démontré que, 8 ans après la mise en terre sur un site forestier, des sapins de Douglas inoculés avec les souches américaines (S238N) et françaises (81306) du champignon *Laccaria bicolor* produisaient 60 % plus de volume total de bois que des plants témoins non inoculés. Dans l'ensemble, plusieurs revues des performances après plantation de plants mycorhizés sur des sites forestiers et dégradés font ressortir que les résultats obtenus sont très variables (Castellano 1996, Kropp et Langlois 1990, Lamhamedi *et al.* 2009, Langlois 1988, Le Tacon *et al.* 1992, 1997, Marx 1980, 1991, Marx *et al.* 1992, Quoreshi *et al.* 2009).

Au Canada, quelques études sur les performances des plants mycorhizés sur des sites forestiers ont été publiées depuis le début des années 1990 (Ontario : Browning et Whitney 1992, 1993; Colombie-Britannique : Berch et Roth 1993, Campbell *et al.* 2003, Hunt 1992, Teste *et al.* 2004; Alberta : Gagné *et al.* 2006), mais aucune encore

pour le Québec. Dans la forêt boréale québécoise (La Grande, Baie-James), McAfee et Fortin (1986) ont comparé la compétitivité de 3 champignons ectomycorhiziens (*Laccaria bicolor* [souche CRBF 0101], *Pisolithus tinctorius* et *Rhizopogon rubescens* [Tul.] Tulasne) inoculés sur des plants de pin gris (*Pinus banksiana* Lamb.). Ils ont démontré qu'après la mise en terre des plants, *L. bicolor* a le mieux concurrencé les espèces fongiques indigènes présentes sur le site de reboisement. En effet, parmi les 3 espèces introduites, *L. bicolor* a persisté le plus longtemps sur le site et était toujours présent 2 ans après le reboisement. Les résultats de McAfee et Fortin (1986) ont aussi été confirmés par d'autres études sur des sites forestiers en Ontario (Browning et Whitney 1993), au Minnesota (Buschena *et al.* 1992) et en Alberta (Gagné *et al.* 2006), où *L. bicolor* persistait toujours 2, 2,5 et de 5 à 6 ans après le reboisement, respectivement. En France, Villeneuve *et al.* (1991) ont aussi démontré que *L. bicolor* inoculé sur des plants de sapins de Douglas était toujours présent sur les racines 2 ans après la mise en terre, et Selosse *et al.* (2000) ont montré que ce champignon persistait toujours 10 ans après le reboisement. Toutes ces études ont démontré la capacité de *L. bicolor* à bien concurrencer les autres espèces présentes sur les sites de reboisement et à persister longtemps sur ces sites. Compte tenu de ces qualités, la souche 0101 de *L. bicolor* est celle que nous avons testée en priorité dans nos études d'inoculation de plants dans les pépinières forestières du Québec, en vue de mettre en terre des plants mycorhizés.

Afin de vérifier si, au Québec, la mise en terre de plants en récipients inoculés artificiellement avec *L. bicolor* ou d'autres espèces de champignons ectomycorhiziens pouvait améliorer la performance après plantation par rapport à celle de plants témoins non inoculés, une série d'expériences d'inoculation a été initiée dans les pépinières publiques du Québec, du début des années 1980 jusqu'en 1994 (Gagnon 1988, 1996, Gagnon et Langlois 1995, Gagnon *et al.* 1987, 1988, 1991, 1995, Langlois et Fortin 1982, Langlois et Gagnon 1988). Parallèlement à ces expériences à petite échelle, un programme d'inoculation à l'échelle opérationnelle de plants en récipients a été déployé en 1987–1988 afin de démontrer, d'une part, la faisabilité technologique, pour Les Laboratoires Rhizotec Inc., de produire des inoculants liquides commerciaux de *L. bicolor* (0101) en fermenteur de 1 500 litres, et d'autre part, d'inoculer jusqu'à un million de plants en récipients en une seule saison. Ainsi, en 1987, un total de 100 000 plants 1+0 (50 000 plants de pin gris, PIG; 25 000 plants d'épinette noire, *Picea mariana*

[Mill.] B.S.P., EPN; 12 500 plants d'épinette blanche, *Picea glauca* [Moench] Voss, EPB; 12 500 plants de mélèze laricin, *Larix laricina* [Du Roi] K. Koch, MEL) produits en récipients 45-110 dans un substrat de tourbe-vermiculite (3:1, v/v) au Centre de recherche en biologie végétale (CRBF) de l'Université Laval ont été inoculés 6 semaines après l'ensemencement (injection de 10 mL/plant d'inoculant *Inj-Ecto*<sup>MD</sup> 101 à l'aide d'un système automatisé de 45 seringues par récipient). En 1988, un million de plants en récipients 45-110 (PIG, EPN, EPB, MEL) ont été inoculés au moment de l'empotage à l'aide de l'inoculant liquide *Ecto-So*<sup>MD</sup> 101 : 920 000 plants dans 5 pépinières forestières publiques du Québec (Berthier, East-Angus, Normandin, Saint-Modeste et Trécesson) et 80 000 plants au CRBF.

Dans le cadre de ces inoculations de plants en récipients, l'influence de plusieurs facteurs sur le taux de mycorhization des plants en pépinière a été évaluée : l'essence (EPN, EPB, PIG, MEL), l'espèce de champignon (ex : *Laccaria bicolor*, *Hebeloma cylindrosporum* Romagn., *Cenococcum geophilum* Fr., etc.), la souche de *Laccaria bicolor* (0101, 92.4 ou 92.9), le type d'inoculum (solide, liquide) produit en laboratoire ou commercialement par Les Laboratoires Rhizotec Inc., la période d'inoculation (lors de l'empotage ou 6 semaines après l'ensemencement), le type de récipients (45-110, 25-350A ou 45-340) et les doses d'azote (N) et de phosphore (P) appliquées.

Parmi les facteurs étudiés, il est ressorti que des apports trop élevés de N et de P inhibaient la colonisation des plants par les champignons ectomycorhiziens introduits artificiellement en pépinière (Gagnon *et al.* 1988, 1991, 1995, Langlois et Fortin 1982). À cet égard, nos études ont corroboré d'autres expériences réalisées ailleurs (Le Tacon *et al.* 1992, 1997, Marx *et al.* 1977, Ruehle et Wells 1984, Shaw *et al.* 1982). Selon Marx *et al.* (1977), une augmentation de la fertilité du sol en N et P augmente chez l'hôte la synthèse des protéines et des composés phosphorylés, ce qui a pour effet de diminuer la teneur en sucres solubles dans ses racines. Par conséquent, puisque moins de sucres solubles sont disponibles pour le champignon ectomycorhizien, le taux de colonisation des racines de l'hôte par le champignon est réduit.

Les expériences québécoises sur l'inoculation de *L. bicolor* 0101 ont permis de produire des plants en récipients adéquatement mycorhizés après une saison de croissance puisqu'en moyenne, au moins 50 % des racines courtes d'absorption (radicelles) de chaque plant étaient colonisées par le champignon introduit artificiellement. Une première étude de

Gagnon *et al.* (1987) réalisée en serre avec des pins gris 1+0 produits en récipients 45-110 a atteint un taux de mycorhization de 97 % par *L. bicolor* 0101 après 6 mois de croissance (de mai à octobre 1984). Dans les études subséquentes réalisées sous tunnel, les plants 1+0 présentaient en moyenne un taux de mycorhization par *L. bicolor* 0101 de 50 à 75 % après une saison de croissance. Cependant, il faut savoir que dans les pépinières forestières du Québec, les plants en récipients sont généralement produits en 2 ans, puisque la première saison (1+0) sous tunnel est suivie d'une seconde saison (2+0) de culture à l'extérieur. Après 2 saisons en pépinière, le taux de mycorhization des plants 2+0 en récipients produits à l'extérieur pour nos expériences avait considérablement diminué et était rarement supérieur au taux minimal visé de 50 %.

Nous avons mis en place un réseau de 15 plantations expérimentales de plants mycorhizés à partir des plants de ces dispositifs d'inoculation à petite et à grande échelle, afin de vérifier si la mise en terre de plants en récipients inoculés artificiellement en pépinière avec un champignon ectomycorhizien pouvait améliorer leur croissance (hauteur, diamètre) et leur survie après le reboisement dans les conditions de la forêt boréale québécoise, par rapport à celle de plants témoins non inoculés. Nous avons posé l'hypothèse que même ces plants dotés d'un taux de mycorhization inférieur à 50 % auraient une meilleure performance que les plants témoins non inoculés artificiellement en pépinière. À notre connaissance, aucune étude n'avait encore vérifié la performance après plantation de plants ayant un taux de mycorhization inférieur à 50 %.



# Chapitre premier

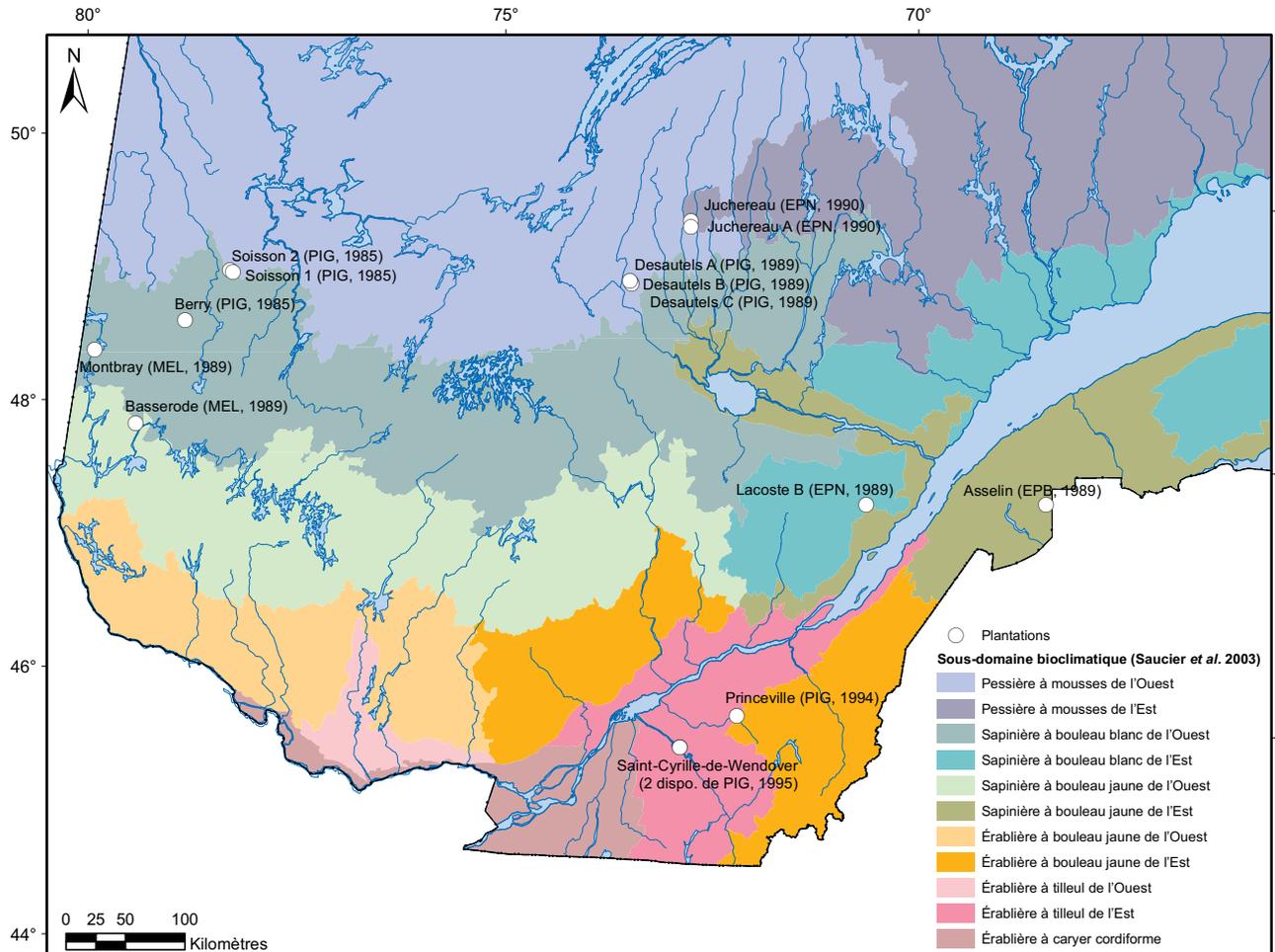
## Matériel et méthodes

### 1.1 Caractéristiques des sites de plantation

Quinze plantations de plants mycorhizés ont été établies de 1985 à 1995 avec des plants de 4 essences (EPN, EPB, FIG, MEL) produits dans divers types de récipients (45-110 pour les 12 sites forestiers, 25-350A ou 45-340 pour les 3 sites sur friches agricoles) et mesurées 4 à 21 ans après leur mise en terre. Les plantations étaient réparties dans 6 unités de gestion du ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP) du Québec (Bas-Saint-Maurice, Charlevoix, Grand-Portage, Harricana-Sud, Rouyn-Noranda et Saint-Félicien) et dans 7 sous-domaines bioclimatiques (érable à tilleul de l'Est, sapinière à bouleau jaune de l'Ouest, sapinière à bouleau blanc de l'Ouest, sapinière à bouleau blanc de l'Est, sapinière à bouleau blanc de l'Est, pessière à mousses de l'Ouest et pessière à mousses de l'Est; Figure 1, Saucier *et al.* 2003). Les coordonnées géographiques et certaines caractéristiques écologiques des sites sont présentées à l'annexe 1.

sapinière à bouleau jaune de l'Est, sapinière à bouleau blanc de l'Ouest, sapinière à bouleau blanc de l'Est, pessière à mousses de l'Ouest et pessière à mousses de l'Est; Figure 1, Saucier *et al.* 2003). Les coordonnées géographiques et certaines caractéristiques écologiques des sites sont présentées à l'annexe 1.

Au moment d'installer chacun des 15 dispositifs, nous avons échantillonné systématiquement les sols où allaient être mis en terre les plants, à une profondeur de 0–20 cm (zone racinaire des plants). Dans tous les cas, nous avons formé 3 échantillons composites en mélangeant 10 sols par bloc. Pour les 3 premiers sites établis en 1985



**Figure 1.** Répartition géographique provinciale des 15 plantations de plants mycorhizés (EPN : épinette noire, EPB : épinette blanche, FIG : pin gris, MEL : mélèze laricin) établies de 1985 à 1995 sur 12 sites forestiers et 3 sites sur friches agricoles.

(Berry, Soisson 1 et Soisson 2), cela correspondait au mélange de 60 sols (10 sols/bloc × 6 blocs = 60 sols). Pour les 12 autres sites, mis en place de 1989 à 1995, cela correspondait au mélange de 140 sols (10 sols/bloc × 14 blocs). L'annexe 2 présente les caractéristiques physicochimiques des sols des 15 plantations. À noter que l'azote minéral ( $N_{\min}$ ) n'était présent que sous forme d'ammonium ( $NH_4^+$ ), puisque ces sols ne renfermaient pas de nitrates ( $NO_3^-$ ).

## 1.2 Caractéristiques des plants à la sortie de la pépinière

Avant l'établissement de chaque plantation, un échantillon de plants a été prélevé en pépinière (72 plants/traitement pour les 12 sites forestiers et 48 plants/traitement pour les 3 sites sur friches agricoles) afin de mesurer les masses sèches des plants (tige, racines et totale) et le pourcentage de mycorhization de chacun des plants prélevés. Ce pourcentage de mycorhization (proportion des racines courtes mycorhizées par un champignon ectomycorhizien donné) a été estimé visuellement en utilisant la valeur médiane des 7 classes suivantes : 1 : 0 %, 2 : 1–5 %, 3 : 6–25 %, 4 : 26–50 %, 5 : 51–75 %, 6 : 76–95 %, et 7 : 96–100 % (GAGNON *et al.* 1987, 1988, 1991, 1995). Nous avons évalué le taux de mycorhization des plants inoculés artificiellement ainsi que celui des plants témoins non inoculés, qui sont devenus mycorhizés naturellement au cours des 2 saisons de croissance en pépinière forestière.

La figure 2 montre des fructifications et des mycorhizes du champignon ectomycorhizien *L. bicolor* 0101 sur des pins gris 1+0 en récipients (45-110) 18 semaines après l'inoculation avec ce champignon, de même que des fructifications du champignon *Thelephora terrestris* qui a mycorhizé naturellement les plants témoins non inoculés après une saison de croissance en pépinière forestière.

La concentration foliaire en N des plants des 2 traitements à la sortie de la pépinière a aussi été analysée avant leur mise en terre dans les dispositifs en plantations. Pour les 12 dispositifs en sites forestiers, les 72 plants par traitement prélevés en pépinière ont été divisés en 3 échantillons composites contenant chacun les aiguilles de 24 plants. Pour les 3 dispositifs sur friche agricole, les 48 plants par traitement échantillonnés en pépinière ont plutôt été divisés en 3 échantillons composites contenant chacun les aiguilles de 16 plants. Les analyses minérales ont été réalisées au laboratoire de chimie organique et inorganique (ISO/CEI 17025) de la Direction de la recherche forestière.

L'annexe 3 présente les mesures prises à la sortie de pépinière sur les plants de tous les dispositifs : masses sèches (tiges, racines et plant total), rapport tige/racines et concentrations foliaires en N.

## 1.3 Particularités de chaque dispositif de plantation

### 1.3.1 Sites forestiers

#### 1.3.1.1 Épinette noire 1989–1993 (Lacoste B)

Cette plantation d'épinette noire a été mise en place à la mi-juin 1989 sur un site (loam sableux) du canton Lacoste (unité de gestion de Charlevoix) à partir de plants 3+0 en récipients 45-110 inoculés avec *L. bicolor* 0101 et de plants témoins produits en 1987 (1+0) et 1988 (2+0) au CRBF de l'Université Laval.

Le dispositif en blocs aléatoires complets comprenait 2 traitements (*L. bicolor*, témoin) et un total de 840 plants (420 plants/traitement) espacés aux 2 m et répartis comme suit : 2 traitements × 14 blocs × 30 plants/bloc (3 rangées de 10 plants). Le mesurage final de tous les arbres (hauteur, diamètre, survie) s'est fait en 1993, 4 ans après le reboisement.

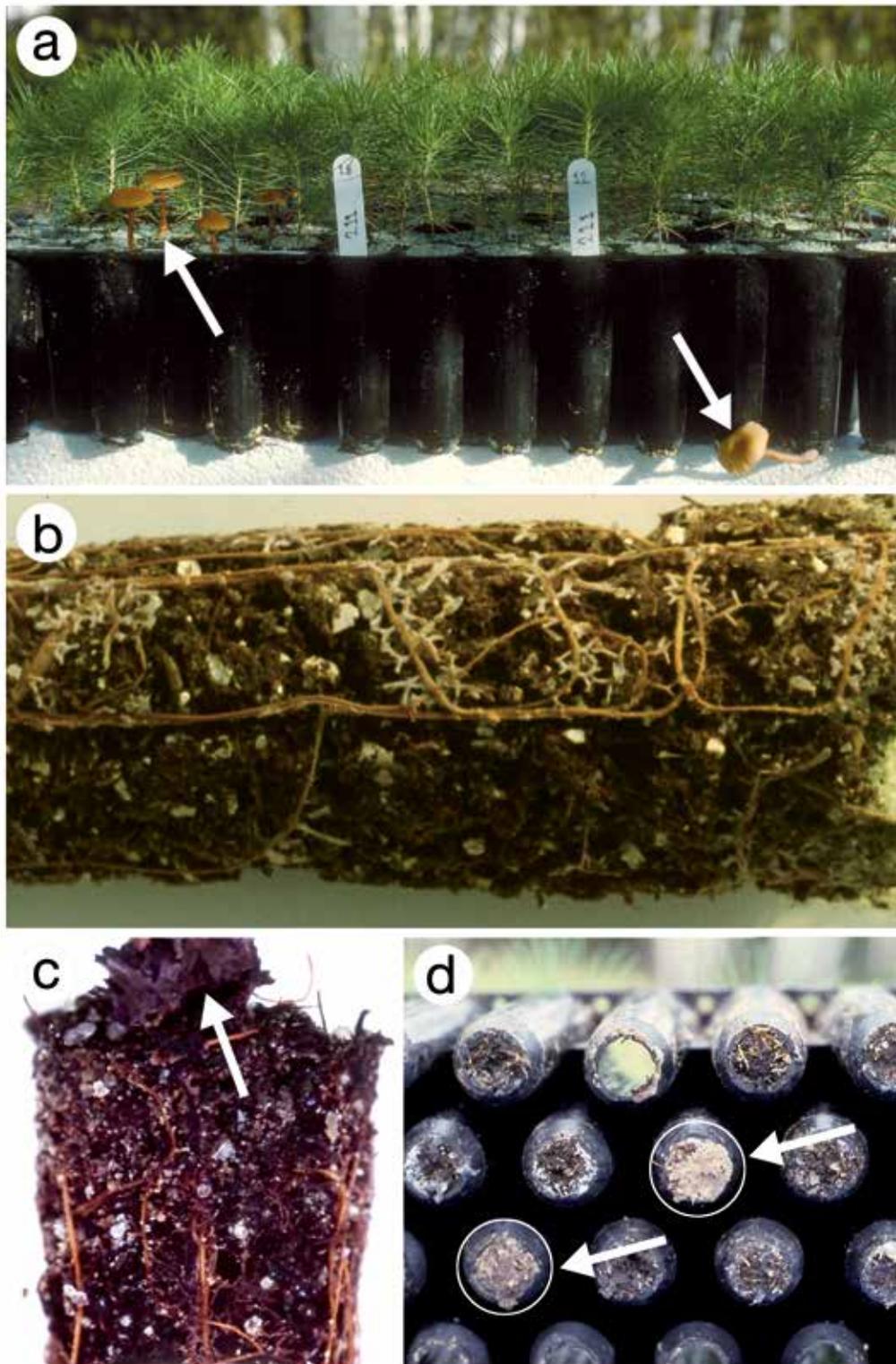
#### 1.3.1.2 Épinette noire 1990–2011 (Juchereau, Juchereau A)

Ces 2 plantations d'épinette noire (Juchereau, Juchereau A) ont été installées en juillet 1990 sur des sites (loam sableux) du canton Juchereau (unité de gestion de Saint-Félicien) à partir de plants 3+0 en récipients 45-110 inoculés avec *L. bicolor* 0101 et de plants témoins produits en 1988 (1+0) et 1989 (2+0) à la pépinière de Normandin.

Dans chaque plantation, le dispositif en blocs aléatoires complets comprenait 2 traitements (*L. bicolor*, témoin) avec un total de 1008 plants (504 plants/traitement) espacés aux 2 m et répartis comme suit : 2 traitements × 14 blocs × 36 plants/bloc (3 rangées de 12 plants). Le mesurage final de tous les arbres (hauteur, DHP, survie) a été réalisé à la mi-octobre 2011, soit 21 ans après le reboisement. Des aiguilles ont aussi été prélevées sur 12 arbres par site pour déterminer leur concentration foliaire en N.

##### 1.3.1.2.1 Indices de qualité de station (IQS)

Après les dernières mesures prises en 2011 sur ces 2 sites, la hauteur moyenne des 200 plus grandes tiges d'épinette noire de chaque plantation, alors âgée de 21 ans, a été utilisée pour déterminer l'indice de qualité de station (IQS) à partir des tables de Prégent *et al.* (1996).



**Figure 2.** Apparence des champignons ectomycorhiziens *Laccaria bicolor* 0101 et *Thelephora terrestris* sur des plants de pins gris 1+0 cultivés en récipients 45-110. a) Fructifications (carpophores) de *L. bicolor* (0101) au-dessus (flèche de gauche) et sous (flèche de droite) les cavités des plants inoculés par ce champignon, après 18 semaines de croissance dans une serre expérimentale; b) racines courtes d'un pin gris mycorhizées par *L. bicolor*; c) fructification de *Thelephora terrestris* (flèche) observée en fin de saison à la base d'un plant témoin de pin gris non inoculé, devenu mycorhizé naturellement; d) fructifications (masses rosées à l'intérieur des cercles marqués par des flèches) de *T. terrestris* apparues en fin de saison sous quelques cavités d'un récipient 45-110 de pins gris non inoculés (Photos : Jean Gagnon).

### 1.3.1.2.2 Pourcentage de recouvrement des éricacées après 21 ans

En octobre 2011, le taux de recouvrement par les éricacées (*Kalmia angustifolia* Linnaeus, *Rhododendron groenlandicum* [Oeder] Kron & Judd et *Vaccinium angustifolium* Aiton) a été estimé à l'aide de placettes circulaires placées au centre de chacun des 14 blocs, entre les 2 traitements de chaque bloc. Chaque placette avait un rayon de 1,13 m et une superficie de 4 m<sup>2</sup>.

### 1.3.1.3 Épinette blanche 1989–1998 (Asselin)

Cette plantation d'épinette blanche a été établie en juin 1989 sur un site (loam) du canton Asselin (unité de gestion du Grand-Portage) à partir de plants 3+0 en récipients 45-110 inoculés avec *L. bicolor* 0101 et de plants témoins produits en 1987 (1+0) et 1988 (2+0) au CRBF.

Le dispositif en blocs aléatoires complets comprenait 2 traitements (*L. bicolor* et témoin) et un total de 840 plants (420 plants/traitement) espacés aux 2 m et répartis comme suit : 2 traitements × 14 blocs × 30 plants/bloc (3 rangées de 10 plants). Le mesurage final (hauteur, diamètre, survie) de tous les arbres a été réalisé en 1998, 9 ans après la plantation.

### 1.3.1.4 Pin gris 1985–1991 (Soisson 1 et 2) et 1985–1998 (Berry)

Ces plantations de pin gris ont été établies en juillet 1985 sur 3 sites (Soisson 1 : argile lourde, Soisson 2 : sable loameux, Berry : sable) des cantons Soisson et Berry (unité de gestion de l'Haricana-Sud) à partir de plants 2+0 en récipients 45-110 inoculés avec 3 espèces de champignon (*L. bicolor* 0101, *Hebeloma cylindrosporum* 0038, *Rhizopogon* sp. 0198) et des plants témoins. Ces plants avaient été produits de mai à octobre 1984 (plants 1+0) dans une serre expérimentale de la pépinière de Trécesson (Figure 2).

Sur chaque site, le dispositif en blocs aléatoires complets comprenait 4 traitements (plants inoculés avec *L. bicolor*, *H. cylindrosporum* ou *Rhizopogon* sp., plants témoins non inoculés) et un total de 1032 plants (258 plants/traitement) espacés aux 2 m et répartis comme suit : 4 traitements × 6 blocs × 43 plants/bloc. Les plants de chaque bloc étaient disposés sur 3 rangées : 11 plants dans la rangée de gauche, 21 dans celle du centre (en vue de prélèvements éventuels de plants) et 11 dans celle de droite.

Le mesurage final (hauteur, diamètre, survie) des plants a été effectué en 1991 (6 ans après le reboisement) sur les sites Soisson 1 et 2, alors que celui du site Berry a été fait en 1998 (13 ans après plantation). Puisque les résultats observés avec les champignons *H. cylindrosporum* et *Rhizopogon* sp. étaient semblables à ceux obtenus avec *L. bicolor* 0101, seuls les résultats des traitements *L. bicolor* 0101 et témoins seront présentés ici.

### 1.3.1.5 Pin gris 1989–1994 (Desautels B et C) et 1989–1996 (Desautels A)

Ces 3 plantations de pin gris ont été établies en août 1989 sur des sites du canton Desautels (Desautels A : sable, Desautels B et C : loam sableux) dans l'unité de gestion de Saint-Félicien. Pour ces plantations, des plants 3+0 en récipients 45-110 inoculés avec *L. bicolor* 0101 et des plants témoins produits en 1987 (1+0) et 1988 (2+0) au CRBF ont été utilisés.

Pour chaque plantation, le dispositif en blocs aléatoires complets comprenait 2 traitements (*L. bicolor*, témoin), avec un total de 840 plants (420 plants/traitement) espacés aux 2 m et répartis comme suit : 2 traitements × 14 blocs × 30 plants/bloc (3 rangées de 10 plants). Le mesurage final (hauteur, diamètre, survie) des plants des sites Desautels B et C a été effectué en 1994, soit 5 ans après le reboisement, alors que celui des plants du site Desautels A a été fait en 1996, soit 7 ans après la plantation.

### 1.3.1.6 Mélèze laricin 1989–1993 (Basserode, Montbray)

Les 2 plantations de mélèze laricin ont été mises en place à la mi-juillet 1989 sur des sites (Basserode : argile sableuse, Montbray : argile lourde) dans les cantons de Basserode et de Montbray (unité de gestion de Rouyn-Noranda). Elles ont été établies à partir de plants 3+0 en récipients 45-110 inoculés avec *L. bicolor* 0101 et de plants témoins produits en 1987 (1+0) et 1988 (2+0) au CRBF.

Dans chaque plantation, le dispositif en blocs aléatoires complets comprenait 2 traitements (*L. bicolor*, témoin). Le dispositif de Basserode renfermait un total de 756 plants (378 plants/traitement) répartis comme suit : 2 traitements × 14 blocs × 27 plants/bloc (3 rangées de 9 plants). Celui de Montbray était constitué d'un total de 672 plants (336 plants/traitement) répartis comme suit : 2 traitements × 14 blocs × 24 plants/bloc (3 rangées de 8 plants). Tous les plants étaient espacés aux 2 m. Le mesurage final de tous les plants (hauteur, diamètre, survie) s'est fait en 1993, 4 ans après le reboisement.

### 1.3.2 Sites sur friches agricoles

#### 1.3.2.1 Pin gris 1994–2011 (Princeville)

La plantation de pin gris de Princeville a été établie en septembre 1994 sur une friche agricole (sable loameux) située dans le canton de Stanfold (unité de gestion du Bas-Saint-Maurice) à partir de plants 2+0 produits en récipients Styroblocs 45-340 à la pépinière de Grandes-Piles. Le dispositif en blocs aléatoires complets comprenait 4 traitements : des plants inoculés avec *L. bicolor* (MRN 92.9), la bactérie *Pseudomonas fluorescens* (L26.1) ou un mélange « champignon+bactérie », et des plants non inoculés (témoins). Un total de 1 440 plants (360 plants/traitement) étaient espacés aux 2 m et répartis comme suit : 4 traitements × 4 blocs × 90 plants/bloc (3 rangées de 30 plants). Puisque les résultats obtenus avec les traitements « bactérie » et « champignon+bactérie » n'étaient pas significativement différents des autres, nous ne présentons ici que ceux des traitements *L. bicolor* 92.9 et témoin, qui sont communs à tous les autres dispositifs décrits dans ce mémoire. Le mesurage final (hauteur, DHP, survie) de tous les plants a été effectué en novembre 2011, soit 17 ans après le reboisement.

#### 1.3.2.2 Pin gris 1995–2011 (Saint-Cyrille-de-Wendover)

Ces plantations de pin gris ont été établies au début septembre 1995 sur une friche agricole (sable) située à Saint-Cyrille-de-Wendover (canton de Simpson, dans l'unité de gestion du Bas-Saint-Maurice) à partir de plants 2+0 en récipients (25-350A, Styroblocs 45-340).

##### 1.3.2.2.1 Pin gris en récipients 25-350A

Cette plantation de pin gris 2+0 en récipients 25-350A comprenait un dispositif en blocs aléatoires complets de 6 traitements : des plants inoculés avec le champignon *Laccaria bicolor* 92.9, *L. bicolor* 91.3, la bactérie *Bacillus* sp., un mélange « *L. bicolor* 92.9 + *Bacillus* sp. » ou un mélange « *L. bicolor* 92.4 + *Bacillus* sp. », et des plants témoins non inoculés. Un total de 600 plants (100 plants/traitement) étaient espacés aux 2 m et répartis comme suit : 6 traitements × 4 blocs × 25 plants/bloc (1 rangée de 12 plants et 1 de 13 plants). Puisque les résultats obtenus avec les traitements « bactérie », « champignon+bactérie » et *L. bicolor* 91.3 n'étaient pas significativement différents de ceux des traitements *L. bicolor* 92.9 et témoins, seuls les résultats de ces derniers seront présentés. Le mesurage final des arbres (hauteur, DHP, survie) a été effectué en novembre 2011, soit 16 ans après le reboisement.

##### 1.3.2.2.2 Pin gris en récipients 45-340

Cette plantation de pin gris 2+0 en Styroblocs 45-340 a été établie avec un dispositif en blocs aléatoires complets de 4 traitements : des plants inoculés avec le champignon *Laccaria bicolor* 92.4, la bactérie *Bacillus* sp. ou le mélange « champignon+bactérie », et des plants non inoculés (témoins). Ce dispositif comprenait un total de 400 plants (100 plants/traitement) espacés aux 2 m et répartis comme suit : 4 traitements × 4 blocs × 25 plants/bloc (1 rangée de 12 plants et 1 de 13 plants). Puisque les résultats obtenus avec les traitements « bactérie » et « champignon+bactérie » n'étaient pas significativement différents de ceux des traitements *L. bicolor* 92.4 et témoins, seuls les résultats de ces derniers seront présentés ici. Le mesurage final (hauteur, DHP, survie) de tous les arbres a été effectué en novembre 2011, soit 16 ans après le reboisement.

##### 1.3.2.3 Indices de qualité de station (IQS)

À la suite des dernières mesures prises en 2011 sur les sites de friches agricoles de Princeville et de Saint-Cyrille-de-Wendover, la hauteur moyenne des 200 plus grandes tiges de pin gris de ces plantations de 17 ans (Princeville) et de 16 ans (Saint-Cyrille-de-Wendover) a été utilisée pour déterminer l'IQS (âge de référence à 15 ans) à partir des tables de Bolghari et Bertrand (1984).

### 1.4 Mesures de croissance en plantation

Pour tous les mesurages faits en plantation de 1985 à 1999, la hauteur totale des plants a été prise au cm près à l'aide d'une règle de 7 m en fibre de verre. Le diamètre au collet des arbres a été mesuré au mm près avec un pied à coulisse mécanique à vernier (Mitutoyo<sup>MD</sup> modèle 530-312, Sakado, Japon).

Pour les mesurages réalisés dans 5 plantations à l'automne 2011, la hauteur totale des arbres a été prise au cm près, à l'aide d'un hypsomètre (Haglöf<sup>MD</sup> modèle Vertex III, Suède). Le diamètre à hauteur de poitrine (DHP) a été mesuré en millimètres (mm) à l'aide d'un galon diamétral.

### 1.5 Analyses statistiques

Les données prises dans les 15 plantations ont été analysées au moment du reboisement et lors des mesurages finaux de la hauteur, du diamètre au collet et du taux de survie des plants dans chaque dispositif. Les moyennes par unité expérimentale (moyennes de chacun des traitements dans chaque bloc) ont été analysées à l'aide de la procédure GLM de SAS, en considérant un modèle à blocs

aléatoires complets (les traitements comme facteur à effets fixes et les blocs comme facteur à effets aléatoires). Les hypothèses de normalité et d'homogénéité des variances des résidus ont été vérifiées graphiquement.

En 2011, 5 des 15 plantations (Juchereau, Juchereau A, Princeville et les 2 sites de Saint-Cyrille-de-Wendover) ont été remesurées pour la hauteur, le diamètre à hauteur de souche (DHS), le DHP et le taux de survie. Pour les variables continues, des analyses de la variance ont été réalisées séparément pour chacun des sites à l'aide de la procédure MIXED de SAS (version 9.2, SAS Institute Inc. 2009), en considérant les moyennes de chaque unité expérimentale. Le modèle utilisé correspondait ici aussi à un modèle à blocs aléatoires complets. 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. Dans le cas où la normalité n'était pas respectée, une analyse de la variance

non paramétrique effectuée sur les rangs a permis de corroborer les conclusions obtenues avec les analyses sur les données brutes. Le taux de survie a été analysé avec la procédure GLIMMIX, en considérant la distribution binomiale et la fonction de lien *logit*. Les mêmes facteurs que ceux présentés précédemment pour les autres variables ont été utilisés dans le modèle. L'hypothèse de normalité des résidus et la présence de données aberrantes ont été vérifiées graphiquement.

Finalement, une analyse de la variance a été effectuée pour déterminer si le pourcentage de recouvrement de chacune des éricacées différait entre les sites Juchereau et Juchereau A. Pour cette analyse, le site constituant le seul facteur (à effets fixes) du modèle. Ici aussi, 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.

Pour toutes les analyses statistiques, le seuil de signification a été fixé à 5 %.

# Chapitre deux

## Résultats

### 2.1 Sites forestiers

#### 2.1.1 Épinette noire 1989–1993 (Lacoste B)

Le tableau 1 montre qu'au moment du reboisement en juin 1989 sur le site Lacoste B, les plants d'épinette noire inoculés avec *L. bicolor* 0101 étaient mycorhizés à 25 % par ce champignon, alors que les témoins non inoculés étaient colonisés naturellement à 32 % par les champignons *Thelephora terrestris* et *Laccaria* sp. présents en pépinière. La hauteur initiale moyenne des plants inoculés avec *L. bicolor* 0101 n'était pas significativement différente de celle des plants témoins.

En 1993, 4 ans après plantation, la hauteur et le diamètre au collet moyens des plants inoculés n'étaient pas significativement différents de ceux des plants témoins. Les plants des 2 traitements avaient aussi un taux de survie très élevé. Puisque les résultats après 4 ans ne montraient aucune amélioration significative de la croissance et de la survie des plants mycorhizés par rapport aux plants témoins, le suivi de cette plantation a été abandonné par la suite.

#### 2.1.2 Épinette noire 1990–2011 (Juchereau, Juchereau A)

Le tableau 2 montre qu'au moment du reboisement en juillet 1990 sur les sites Juchereau et Juchereau A, à forte présence d'éricacées, les plants d'épinette noire inoculés avec *L. bicolor* 0101 étaient mycorhizés à 56 % par ce champignon, alors que les témoins non inoculés étaient colonisés naturellement à 34 % par les champignons *Thelephora terrestris* et *Laccaria* sp. présents en pépinière. Les plants des 2 traitements avaient une hauteur initiale moyenne de 29 cm.

En 2011, soit 21 ans après le reboisement sur le site Juchereau, la hauteur et le DHP moyens des plants inoculés n'étaient pas significativement différents de ceux des plants témoins (Tableau 2). Les plants inoculés présentaient aussi un taux de survie moyen légèrement supérieur à ceux des plants témoins (95 % comparé à 93 %), mais la différence n'était pas significative. Les concentrations foliaires en N des épinettes noires du dispositif de Juchereau en 2011 s'élevaient en moyenne à 0,8 %

**Tableau 1.** Pourcentage initial de mycorhization, hauteur, diamètre et taux de survie moyens des plants d'épinette noire produits en récipients 45-110 et plantés sur le site Lacoste B. Verticalement, par année et par variable, des lettres différentes représentent des différences significatives entre les traitements à un seuil de 5 % (n = 420).

Essence	Site	Traitement	1989 (au reboisement)		1993 (après 4 ans)		
			Pourcentage de mycorhization	Hauteur (cm)	Hauteur (cm)	Diamètre au collet (mm)	Taux de survie (%)
Épinette noire	Lacoste B (loam sableux)	<i>L. bicolor</i> 0101	25 % <sup>1</sup>	34 a	57 a	12 a	92 a
		Témoin	32 % <sup>2</sup>	35 a	58 a	13 a	92 a

**Tableau 2.** Pourcentage initial de mycorhization, hauteur, diamètre et taux de survie moyens des plants d'épinette noire produits en récipients 45-110 et plantés sur les sites à éricacées de Juchereau et Juchereau A. Verticalement, par année et par variable, des lettres différentes représentent des différences significatives entre les traitements à un seuil de 5 % (n = 504).

Essence	Site	Traitement	1990 (au reboisement)		2011 (après 21 ans)		
			Pourcentage de mycorhization	Hauteur (cm)	Hauteur (cm)	Diamètre à hauteur de poitrine (mm)	Taux de survie (%)
Épinette noire	Juchereau (loam sableux)	<i>L. bicolor</i> 0101	56 % <sup>1</sup>	29 a	361 a	40 a	96 a
		Témoin	34 % <sup>2</sup>	29 a	367 a	42 a	93 a
	Juchereau A (loam sableux)	<i>L. bicolor</i> 0101	56 % <sup>1</sup>	29 a	384 a	44 a	97 a
		Témoin	34 % <sup>2</sup>	29 a	373 a	42 a	95 a

<sup>1</sup> Mycorhization par le champignon introduit *L. bicolor* 0101.

<sup>2</sup> Mycorhization naturelle par *Thelephora terrestris* et *Laccaria* sp.

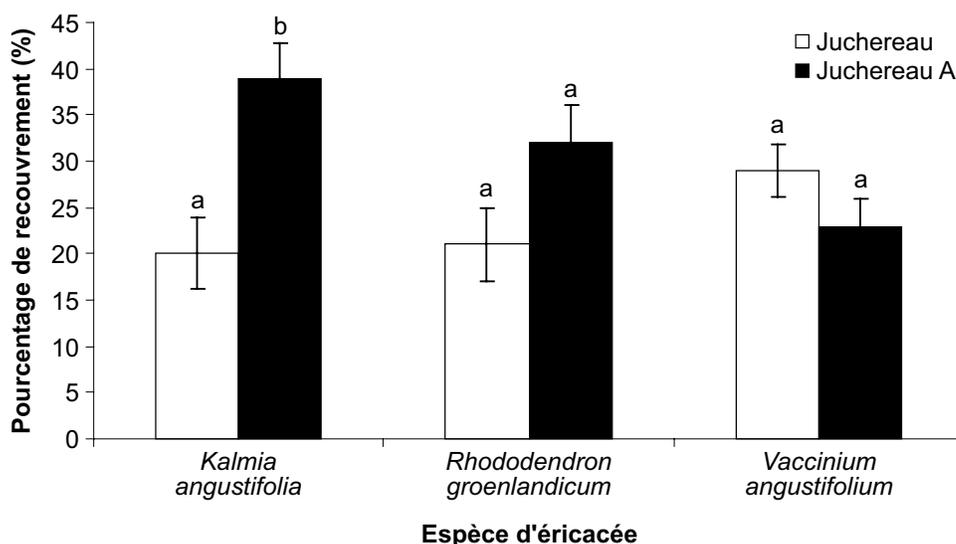
pour les plants inoculés et à 0,7 % pour les plants témoins (données non présentées). Elles avaient donc diminué de moitié en 21 ans, par rapport à leur valeur de 1,7 % au moment du reboisement (Annexe 3).

En 2011, soit 21 ans après leur mise en terre, les plants inoculés du site Juchereau A étaient légèrement plus grands et plus gros et avaient un taux de survie légèrement supérieur à celui des plants témoins, mais ces différences n'étaient pas significatives (Tableau 2). Les concentrations foliaires moyennes en N des plants des 2 traitements s'élevaient à 0,8 % (données non présentées), ce qui représente la moitié de la valeur mesurée au moment du reboisement (1,7 %, annexe 3).

#### 2.1.2.1 Indices de qualité de station (IQS) et pourcentage de recouvrement des éricacées

En octobre 2011, un faible IQS a été déterminé pour les 2 plantations d'épinette noire établies en 1990 sur ces sites à éricacées : 5,7 m pour le site Juchereau et 5,8 m pour le site Juchereau A, à un âge de référence de 25 ans.

La figure 3 montre les pourcentages de recouvrement des éricacées estimés en octobre 2011, 21 ans après la plantation sur ces 2 sites. Elle fait ressortir que le site Juchereau A renfermait près de 2 fois plus de *Kalmia angustifolia* (39 %) que celui de Juchereau (20 %), et que cette différence est statistiquement significative. Les pourcentages de recouvrement moyens de *Rhododendron groenlandicum* et de *Vaccinium angustifolium* sur les 2 sites montrent aussi des petites différences, mais non statistiquement significatives (Figure 3).



**Figure 3.** Pourcentage de recouvrement moyen des 3 espèces d'éricacées présentes dans les plantations d'épinette noire des sites Juchereau et Juchereau A, 21 ans après leur mise en terre. Pour chaque espèce, des lettres différentes représentent des différences significatives à un seuil de 5 % entre les sites (n = 14).

#### 2.1.3 Épinette blanche 1989–1998 (Asselin)

Le tableau 3 montre qu'au moment du reboisement en juin 1989 sur le site Asselin, les plants d'épinette blanche inoculés avec *L. bicolor* 0101 étaient mycorhizés à 47 % par ce champignon et étaient significativement plus petits que les plants témoins, alors que les plants témoins étaient colonisés naturellement à 37 % par les champignons *Thelephora terrestris* et *Laccaria* sp. présents en pépinière.

Neuf ans plus tard, la hauteur et le diamètre au collet moyens des plants inoculés n'étaient pas significativement différents de ceux des plants témoins, et les plants des 2 traitements présentaient le même taux de survie moyen (76 %).

Puisque les résultats après 9 ans ne montraient aucune amélioration significative de la croissance et de la survie des plants mycorhizés par rapport aux plants témoins, le suivi de la plantation Asselin a été abandonné par la suite.

#### 2.1.4 Pin gris 1985–1991 (Soisson 1 et 2) et 1985–1998 (Berry)

Le tableau 4 montre qu'à leur sortie de la pépinière, les plants de pins gris 2+0 en récipients 45-110 inoculés avec *L. bicolor* 0101 étaient mycorhizés à 16 % par ce champignon, alors que les plants témoins étaient colonisés naturellement à 38 % par les champignons *Thelephora terrestris* et *Laccaria* sp. présents en pépinière. Au moment du reboisement en juillet 1985 sur les sites Soisson 1 et 2 et Berry, les pins gris inoculés étaient aussi plus petits que plants témoins, mais ces différences n'étaient pas significatives.

Six ans après le reboisement sur le site Soisson 1, les plants inoculés étaient légèrement moins hauts (écart non significatif) et avaient un diamètre au collet moyen significativement plus petit que les plants témoins (Tableau 4). Les plants inoculés présentaient aussi un taux de survie moyen légèrement supérieur à celui des plants témoins (95 % comparé à 93 %), mais cette différence n'était pas significative.

Six ans après le reboisement sur le site Soisson 2, la hauteur et le diamètre au collet moyens des plants inoculés n'étaient pas significativement différents de ceux des plants témoins (Tableau 4). Les plants inoculés présentaient aussi un taux de survie moyen légèrement supérieur à celui des plants témoins (100 % comparé à 98 %), mais cette différence n'était pas significative.

Treize ans après le reboisement sur le site Berry, les plants inoculés ne différaient pas significativement des plants témoins pour la hauteur moyenne, le diamètre au collet moyen ou le taux de survie (Tableau 4). Puisque les résultats de ces mesurages après 6 et 13 ans n'ont montré aucune amélioration significative de la croissance et de la survie

des plants inoculés par rapport aux plants témoins, le suivi de ces 3 plantations a été abandonné par la suite.

### 2.1.5 Pin gris 1989–1994 (Desautels B et C) et 1989–1996 (Desautels A)

Le tableau 5 montre qu'au moment du reboisement sur les sites Desautels A, B et C, les plants de pin gris inoculés avec *L. bicolor* 0101 étaient mycorhizés à 46 % par ce champignon, alors que les plants témoins étaient colonisés naturellement à 47 % par les champignons *Thelephora terrestris* et *Laccaria* sp. présents en pépinière. De plus, dans les 3 dispositifs, la hauteur moyenne des plants inoculés était significativement inférieure à celle des plants témoins. Les plants des 2 traitements avaient un diamètre au collet moyen de 4 mm.

Cinq ans après la plantation sur le site Desautels B, les plants inoculés présentaient une hauteur significativement inférieure à celle des plants témoins (Tableau 5). Bien que le diamètre au collet des plants inoculés soit inférieur à celui des plants témoins, la différence n'était pas significative. Les plants de ces 2 traitements présentaient un taux de survie moyen très élevé de 99 %.

**Tableau 3.** Pourcentage initial de mycorhization, hauteur, diamètre et taux de survie moyens des plants d'épinette blanche produits en récipients 45-110 et plantés sur le site Asselin. Verticalement, par année et par variable, des lettres différentes représentent des différences significatives entre les traitements à un seuil de 5 % (n = 420).

Essence	Site	Traitement	1989 (au reboisement)		1998 (après 9 ans)		
			Pourcentage de mycorhization	Hauteur (cm)	Hauteur (cm)	Diamètre au collet (mm)	Taux de survie (%)
Épinette blanche	Asselin (loam)	<i>L. bicolor</i> 0101	47 % <sup>1</sup>	23 a	244 a	58 a	76 a
		Témoin	37 % <sup>2</sup>	27 b	253 a	58 a	76 a

**Tableau 4.** Pourcentage initial de mycorhization, hauteur, diamètre et taux de survie moyens des plants de pin gris produits en récipients 45-110 et plantés sur les sites de Soisson 1, Soisson 2 et Berry. Verticalement, par site, par année et par variable, des lettres différentes représentent des différences significatives entre les traitements à un seuil de 5 % (n = 258).

Essence	Site	Traitement	1985 (au reboisement)			1991 (après 6 ans)		
			Pourcentage de mycorhization	Hauteur (cm)	Diamètre au collet (mm)	Hauteur (cm)	Diamètre au collet (mm)	Taux de survie (%)
Pin gris	Soisson 1 (argile lourde)	<i>L. bicolor</i> 0101	16 % <sup>1</sup>	15 a	2 a	190 a	40 a	95 a
		Témoin	38 % <sup>2</sup>	19 a	3 a	208 a	46 b	93 a
	Soisson 2 (sable loameux)	<i>L. bicolor</i> 0101	16 % <sup>1</sup>	15 a	2 a	175 a	40 a	100 a
		Témoin	38 % <sup>2</sup>	19 a	3 a	189 a	42 a	98 a
			1985 (au reboisement)			1998 (après 13 ans)		
Berry (sable)		<i>L. bicolor</i> 0101	16 % <sup>1</sup>	15 a	2 a	405 a	68 a	83 a
		Témoin	38 % <sup>2</sup>	19 a	3 a	399 a	69 a	93 a

<sup>1</sup> Mycorhization par le champignon introduit *L. bicolor* 0101.

<sup>2</sup> Mycorhization naturelle par *Thelephora terrestris* et *Laccaria* sp.

Cinq ans après la plantation sur le site Desautels C, la hauteur moyenne des plants inoculés était inférieure à celle des plants témoins, mais cette différence n'était pas significative (Tableau 5). Par contre, le diamètre au collet moyen des plants inoculés était significativement inférieur à celui des témoins. Les plants des 2 traitements présentaient aussi des taux de survie moyens très élevés de 96 et 95 %.

Sept ans après plantation sur le site Desautels A, la hauteur moyenne et le diamètre au collet moyen des plants inoculés étaient presque identiques à ceux des plants témoins (Tableau 5). Les plants des 2 traitements présentaient aussi des taux de survie moyens très élevés de 98 et 99 %.

Puisque les résultats des mesurages après 5 et 7 ans n'ont montré aucune amélioration significative de la croissance et de la survie des plants inoculés par rapport aux plants témoins, le suivi de ces 3 plantations a été abandonné par la suite.

### 2.1.6 Mélèze laricin 1989–1993 (Basserode, Montbray)

Le tableau 6 montre qu'au moment du reboisement, les mélèzes laricins inoculés avec *L. bicolor* 0101 étaient mycorhizés à 58 % par ce champignon et avaient une hauteur moyenne significativement plus petite que les plants témoins, alors que ces derniers étaient colonisés naturellement à 35 % par les champignons *Thelephora terrestris* et *Laccaria* sp. présents en pépinière.

Quatre ans après le reboisement sur le site Basserode, la hauteur moyenne et le diamètre au collet moyen des plants inoculés avec *L. bicolor* 0101 n'étaient pas significativement différents de ceux des plants non inoculés (témoins). Les plants des traitements *L. bicolor* et témoins présentaient des taux de survie moyens semblables de 90 et 91 %, respectivement (Tableau 6).

Quatre ans après le reboisement sur le site Montbray, les plants du traitement *L. bicolor* 0101 présentaient une hauteur moyenne et un diamètre au collet moyen significativement inférieurs à ceux

**Tableau 5.** Pourcentage initial de mycorhization, hauteur, diamètre et taux de survie moyens des plants de pin gris produits en récipients 45-110 et plantés sur les sites de Desautels A, Desautels B et Desautels C. Verticalement, par site, par année et par variable, des lettres différentes représentent des différences significatives entre les traitements à un seuil de 5 % (n = 420).

Essence	Site	Traitement	1989 (au reboisement)			1994 (après 5 ans)			
			Pourcentage de mycorhization	Hauteur (cm)	Diamètre au collet (mm)	Hauteur (cm)	Diamètre au collet (mm)	Taux de survie (%)	
Pin gris	Desautels B (loam sableux)	<i>L. bicolor</i> 0101	46 % <sup>1</sup>	28 a	4 a	136 a	27 a	99 a	
		Témoin	47 % <sup>2</sup>	30 b	4 a	143 b	29 a	99 a	
	Desautels C (loam sableux)	<i>L. bicolor</i> 0101	46 % <sup>1</sup>	28 a	4 a	94 a	15 a	96 a	
		Témoin	47 % <sup>2</sup>	32 b	4 a	100 a	17 b	95 a	
				1989 (au reboisement)			1996 (après 7 ans)		
	Desautels A (sable)	<i>L. bicolor</i> 0101	46 % <sup>1</sup>	27 a	4 a	246 a	57 a	98 a	
Témoin		47 % <sup>2</sup>	31 b	4 a	247 a	58 a	99 a		

**Tableau 6.** Pourcentage initial de mycorhization, hauteur, diamètre et taux de survie moyens des plants de mélèze laricin produits en récipients 45-110 et plantés sur les sites de Basserode et de Montbray. Verticalement, par site, par année et par variable, des lettres différentes représentent des différences significatives entre les traitements à un seuil de 5 % (Basserode : n = 378; Montbray : n = 336).

Essence	Site	Traitement	1989 (au reboisement)		1993 (après 4 ans)		
			Pourcentage de mycorhization	Hauteur (cm)	Hauteur (cm)	Diamètre au collet (mm)	Taux de survie (%)
Mélèze laricin	Basserode (argile sableuse)	<i>L. bicolor</i> 0101	58% <sup>1</sup>	38 a	89 a	17 a	90 a
		Témoin	35% <sup>2</sup>	42 b	94 a	18 a	91 a
	Montbray (argile lourde)	<i>L. bicolor</i> 0101	58% <sup>1</sup>	35 a	75 a	12 a	71 a
		Témoin	35% <sup>2</sup>	40 b	83 b	13 b	69 a

<sup>1</sup> Mycorhization par le champignon introduit *L. bicolor* 0101.

<sup>2</sup> Mycorhization naturelle par *Thelephora terrestris* et *Laccaria* sp.

des plants témoins (Tableau 6). Les plants inoculés avec *L. bicolor* 0101 présentaient un taux de survie moyen légèrement supérieur à ceux des plants témoins (71 % comparé à 69 %), mais cette différence n'était pas significative.

Puisque les résultats des mesurages après 4 ans n'ont montré aucune amélioration significative de la croissance et de la survie des plants mycorhizés par rapport aux plants témoins, le suivi de ces 2 plantations a été abandonné par la suite.

## 2.2 Sites sur friches agricoles

### 2.2.1 Pin gris 1994–2011 (Princeville)

Le tableau 7 montre qu'au moment du reboisement sur la friche agricole de Princeville, les pins gris en récipients 45-340 inoculés avec *L. bicolor* 92.9 étaient mycorhizés à 8 % par ce champignon, alors que les plants témoins étaient colonisés naturellement à 30 % par les champignons *Thelephora terrestris* et *Laccaria* sp. présents en pépinière. En 1994, la hauteur moyenne des plants inoculés avec *L. bicolor* 92.9 n'était pas significativement supérieure à celle des plants non inoculés (témoin). Les plants des 2 traitements présentaient aussi un diamètre au collet moyen similaire (6 mm).

Dix-sept ans après le reboisement sur la friche agricole de Princeville, la hauteur moyenne des plants inoculés avec *L. bicolor* 92.9 n'était pas significativement inférieure à celle des plants témoins (Tableau 7). Le DHP moyen des plants inoculés avec *L. bicolor* 92.9 était légèrement supérieur à celui des plants témoins, mais cette différence n'était pas significative. Le taux de survie moyen des plants du traitement *L. bicolor* 92.9 était légèrement inférieur à celui des plants témoins (88 % comparé à 91 %), mais cette différence n'était pas significative.

### 2.2.2 Pin gris 1995–2011

#### (Saint-Cyrille-de-Wendover)

##### 2.2.2.1 Plants en récipients 25-350A

Au moment du reboisement sur la friche agricole de Saint-Cyrille-de-Wendover, les pins gris du dispositif en récipients 25-350A inoculés avec *L. bicolor* 92.9 étaient mycorhizés à 34 % par ce champignon, alors que les plants témoins étaient colonisés naturellement à 54 % par les champignons *Thelephora terrestris* et *Laccaria* sp. présents en pépinière (Tableau 8). La hauteur moyenne des plants inoculés était significativement supérieure à celle des plants témoins, mais les plants des 2 traitements présentaient un même diamètre au collet moyen.

**Tableau 7.** Pourcentage initial de mycorhization, hauteur, diamètre et taux de survie moyens des plants de pins gris produits en récipients 45-340 et plantés sur le site de Princeville. Verticalement, par année et par variable, des lettres différentes représentent des différences significatives entre les traitements à un seuil de 5 % (n = 360).

Essence	Site	Traitement	1994 (au reboisement)			2011 (après 17 ans)		
			Pourcentage de mycorhization	Hauteur (cm)	Diamètre au collet (mm)	Hauteur (cm)	Diamètre à hauteur de poitrine (mm)	Taux de survie (%)
Pin gris	Princeville (sable loameux)	<i>L. bicolor</i> 92.9	8 % <sup>1</sup>	32 a	6 a	931 a	123 a	88 a
		Témoin	30 % <sup>2</sup>	31 a	6 a	937 a	119 a	91 a

**Tableau 8.** Pourcentage initial de mycorhization, hauteur, diamètre et taux de survie moyens des plants de pin gris produits en récipients (25-350A, 45-340) et plantés dans 2 dispositifs sur le site de Saint-Cyrille-de-Wendover. Verticalement, par type de récipients, par variable et par colonne, des lettres différentes représentent des différences significatives entre les traitements à un seuil de 5 % (n = 100).

Essence	Site	Type de récipient	Traitement	1995 (au reboisement)			2011 (après 16 ans)		
				Pourcentage de mycorhization	Hauteur (cm)	Diamètre au collet (mm)	Hauteur (cm)	Diamètre à hauteur de poitrine (mm)	Taux de survie (%)
Pin gris	Saint-Cyrille-de-Wendover (sable)	25-350A	<i>L. bicolor</i> 92.9	34 % <sup>1</sup>	28 a	6 a	849 a	120 a	89 a
			Témoin	54 % <sup>2</sup>	25 b	6 a	849 a	115 a	91 a
		45-340	<i>L. bicolor</i> 92.4	40 % <sup>3</sup>	25 a	5 a	829 a	108 a	91 a
			Témoin	46 % <sup>2</sup>	24 a	6 b	841 a	116 a	94 a

<sup>1</sup> Mycorhization par le champignon introduit *L. bicolor* 92.9.

<sup>2</sup> Mycorhization naturelle par *Thelephora terrestris* et *Laccaria* sp.

<sup>3</sup> Mycorhization par le champignon introduit *L. bicolor* 92.4.

Seize ans après le reboisement à Saint-Cyrille-de-Wendover, les plants des 2 traitements avaient une hauteur moyenne semblable (Tableau 8). Les plants inoculés avaient un DHP moyen légèrement supérieur et un taux de survie moyen légèrement inférieur à ceux des plants témoins, mais les différences étaient non significatives.

#### 2.2.2.2 Plants en récipients 45-340

Dans le cas du dispositif de pins gris en récipients 45-340 à Saint-Cyrille-de-Wendover, les plants inoculés avec *L. bicolor* 92.4 étaient mycorhizés à 40 % par ce champignon, alors que les plants témoins étaient colonisés naturellement à 46 % par les champignons *Thelephora terrestris* et *Laccaria* sp. présents en pépinière (Tableau 8). La hauteur moyenne des plants inoculés n'était pas significativement supérieure à celle des plants témoins, mais leur diamètre au collet moyen était significativement plus petit.

Seize ans après le reboisement, la hauteur moyenne et le DHP moyen des pins gris ne différaient pas significativement entre les traitements (Tableau 8). Le taux de survie moyen des plants inoculés était légèrement inférieur à celui des plants témoins (91 % comparé à 94 %), mais cette différence n'était pas significative.

#### 2.2.3 Indices de qualité de station (IQS)

Pour la plantation de pin gris sur le site agricole de Princeville, l'IQS déterminé à 17 ans s'élevait à 8,3 m (âge de référence de 15 ans), ce qui montre que la station était très fertile pour cette essence (Figure 4). Sur l'autre friche agricole située à Saint-Cyrille-de-Wendover, l'IQS des pins gris produits en récipients 45-340 était de 7,1 m (âge de référence de 15 ans), et celui des pins gris produits en récipients 25-350A s'élevait à 7,5 m. Ces valeurs correspondent à celles d'une station fertile.



**Figure 4.** Plantation de pin gris mycorhizés en récipients établie 17 ans plus tôt sur une station fertile, sur une friche agricole à Princeville (IQS de 8,3 m à 15 ans) (Photos : Christian Villeneuve, MFFP).

# Chapitre trois

## Discussion

Les mesures finales effectuées 4 à 21 ans après le reboisement dans 15 dispositifs répartis dans 6 régions du Québec démontrent toutes un même résultat : l'inoculation artificielle des plants en récipients en pépinière avec le champignon ectomycorrhizien *Laccaria bicolor* (souches 0101, 92.4 ou 92.9) n'a pas amélioré significativement la survie ni la croissance en hauteur ou en diamètre des plants de 4 essences résineuses, par rapport aux performances de plants témoins non inoculés.

D'autres études ont rapporté des résultats très variables, parfois au sein d'un même pays, dans des plantations avec des plants inoculés artificiellement en pépinière forestière avec la même espèce de champignon ectomycorrhizien (ex. : sud-est par rapport au sud-ouest des États-Unis : Castellano 1996, Marx *et al.* 1992). Le Tacon *et al.* (1992) ont discuté des causes de la variabilité des résultats obtenus sur plusieurs sites en Europe. Selon eux, le facteur le plus déterminant est la vigueur de la population naturelle des différentes espèces de champignons ectomycorrhiziens présents sur le site de reboisement. Le champignon introduit doit être adapté lui aussi aux conditions écologiques des sites : climat, pH et fertilité du sol, végétation naturellement présente, etc. L'obtention de gains significatifs en plantation dépend de la compétitivité et de la persistance du champignon introduit par rapport à ceux naturellement présents sur le site, des caractéristiques du site ainsi que du taux de survie des plants témoins non inoculés (suffisamment élevé ou au contraire, très faible en raison du climat aride, de températures élevées ou de sécheresses causant des stress hydriques ou nutritionnels) (Castellano 1996, Fortin *et al.* 2008, Kropp et Langlois 1990, Lamhamedi *et al.* 2009, Quoreshi *et al.* 2009).

Comme le mentionnent Le Tacon *et al.* (1997), des dispositifs en plantations à long terme doivent être installés pour confirmer les effets positifs des mycorhizes sur la croissance et la survie des arbres en plantation avant tout développement important de la mycorhization contrôlée en pépinière forestière. Seuls des essais de longue durée (p. ex.: 10 ans et plus) comme ceux présentés ici peuvent permettre de déterminer l'efficacité des souches introduites sur la croissance des arbres hôtes.

### 3.1. Causes possibles de l'absence de gains significatifs en plantations

L'absence de gains significatifs observée dans nos dispositifs en plantations peut avoir plusieurs explications : le faible taux de mycorhization des plants inoculés artificiellement en pépinière, la mycorhization naturelle en pépinière des plants témoins non inoculés en pépinière, l'abondance naturelle des champignons ectomycorrhiziens sur les sites de reboisement, le taux élevé de survie des plants témoins dans les plantations et la plus petite taille des plants inoculés artificiellement par rapport aux plants témoins à la sortie de la pépinière. Les sections suivantes présentent chacune de ces causes, en commençant par la plus importante.

#### 3.1.1. Faible taux de mycorhization des plants inoculés artificiellement en pépinière

Au moment du reboisement, les plants inoculés avec *L. bicolor* présentaient un faible taux de mycorhization (de 8 à 47 %) dans 11 des 15 plantations. Dans celles-ci, chaque plant inoculé avait donc, en moyenne, moins de 50 % de ses racines courtes d'absorption (radicelles) colonisées par *L. bicolor*. C'était probablement insuffisant pour que se concrétisent les avantages nutritionnels, métaboliques et prophylactiques que pourrait procurer ce champignon avec un taux de mycorhization plus élevé. Ce résultat concorde avec les observations de Teste *et al.* (2004) qui n'ont observé aucun gain significatif, 2 ans après la mise en terre de sapins de Douglas mycorhizés à seulement 36 % en moyenne par des champignons ectomycorrhiziens (*Laccaria laccata*, *Rhizopogon parksii*). Marx *et al.* (1982) et Dixon *et al.* (1987) ont établi que le taux de mycorhization devrait être supérieur à un seuil de 50 % pour qu'on puisse espérer obtenir des gains de croissance en plantation.

Après une saison de croissance en pépinière (plants 1+0), les plants en récipients destinés à ces dispositifs présentaient un assez bon taux de mycorhization par *L. bicolor*, soit de 50 à 75 % en moyenne. Ce taux a cependant diminué au cours de la deuxième année en pépinière (plants 2+0), alors que la masse sèche des racines a décuplé. Le champignon ne semble pas avoir réussi à coloniser les nouvelles radicelles développées au cours de cette 2<sup>e</sup> année. Au final, le taux de mycorhization

à la sortie de la pépinière (au printemps de l'année 3+0) était donc inférieur à 50 % dans la majorité des cas.

### 3.1.2 Mycorhization naturelle en pépinière des plants témoins non inoculés

Au moment du reboisement dans les 15 sites, les plants témoins non inoculés n'étaient pas exempts de mycorhizes, puisque de 30 à 54 % de leurs racines étaient mycorhizées naturellement par les champignons *Thelephora terrestris* et *Laccaria* sp., lesquels sont omniprésents dans les pépinières forestières du Québec. En Europe, des observations similaires ont été rapportées dans plusieurs dispositifs où les plants témoins étaient mycorhizés naturellement lors de leur mise en terre, principalement par *Thelephora terrestris* (Le Tacon *et al.* 1992, 1997).

La mycorhization naturelle du système racinaire des plants en récipients a souvent été observée à l'automne de la première saison de croissance, notamment dans les dispositifs d'inoculation réalisés dans les pépinières forestières du Québec. Elle provient des spores disséminées par le vent en provenance des fructifications de champignons ectomycorhiziens présents dans les forêts avoisinantes des pépinières. L'abondance de ces spores varie d'une année à l'autre en fonction de l'intensité de la sporulation d'automne (Gagnon et Lamhamedi 2011). Le taux de mycorhization naturelle des plants varie aussi au sein de ces cultures, d'un récipient à l'autre et entre les cavités d'un même récipient. Il dépasse rarement 50 % (Gagnon 1988, 1996, Gagnon et Langlois 1995, Gagnon *et al.* 1987, 1988, 1995).

On peut présumer que les chances d'obtenir des gains significatifs de croissance en plantation auraient été plus grandes si l'on avait comparé les performances des plants inoculés artificiellement en pépinière avec *L. bicolor* à celles de plants témoins exempts de mycorhization naturelle par *Thelephora terrestris* et *Laccaria* sp. Toutefois, cela n'aurait pas reflété la situation réelle dans les pépinières forestières du Québec, où ces champignons sont omniprésents. Les performances en plantation des plants en récipients inoculés avec *L. bicolor* ont donc été comparées à celles de plants témoins non inoculés, mais souvent mycorhizés naturellement.

### 3.1.3 Abondance naturelle de champignons ectomycorhiziens sur les sites de reboisement du Québec

Les champignons ectomycorhiziens sont omniprésents dans les forêts d'ici et d'ailleurs (Bâ *et al.* 2011, Fortin *et al.* 2008, Guinberteau *et al.* 1990,

Högberg et Högberg 2002, Kropp et Langlois 1990, Quoreshi *et al.* 2009). L'absence de gains significatifs chez les plants mycorhizés artificiellement de nos dispositifs pourrait aussi s'expliquer par le fait que les plants inoculés artificiellement en pépinière avec *L. bicolor* ont été mis en terre sur des sites forestiers déjà colonisés naturellement par plusieurs espèces de champignons ectomycorhiziens. Des résultats similaires ont été obtenus sur de tels sites en Colombie-Britannique (Campbell *et al.* 2003, Hunt 1992, Teste *et al.* 2004) et dans l'ouest des États-Unis, plus précisément dans l'État de Washington (Bledsoe *et al.* 1982) et dans le sud-ouest de l'Oregon (Castellano et Trappe 1991).

Sur les sites où les champignons ectomycorhiziens sont naturellement abondants, les champignons introduits doivent concurrencer la microflore ectomycorhizienne naturelle sur les sites. Les souches fongiques sélectionnées doivent non seulement être bien adaptées aux conditions culturelles des pépinières forestières, mais surtout, être capables de mieux performer que ceux déjà présents sur les sites forestiers. Il devient donc plus difficile d'obtenir des gains significatifs de croissance et de survie sur des sites où les champignons ectomycorhiziens sont naturellement abondants que sur des sites dégradés, habituellement pauvres en champignons ectomycorhiziens (Fortin *et al.* 2008).

Les avantages de l'inoculation pourraient être plus grands pour des plants destinés à des sites dépourvus d'activité microbiologique (ex. : sites d'anciennes mines et de déchets miniers, bancs d'emprunt...). C'est ce que montrent les succès des reboisements réalisés ailleurs dans le monde, sur des sites perturbés et dégradés et sur des sites pauvres et difficiles à régénérer dans des zones arides et semi-arides (Bâ *et al.* 2011, Fortin *et al.* 2008, Lamhamedi *et al.* 2009, Quoreshi *et al.* 2009). En effet, sur plusieurs de ces sites, le seul moyen d'assurer la survie des plants est de mettre en terre des plants inoculés avec un champignon adapté aux conditions de ces sites (Ruehle 1982, Smith et Read 1997). Certains champignons ectomycorhiziens, comme *Pisolithus tinctorius*, sont capables de tolérer des températures extrêmement élevées (jusqu'à 38 °C, Fortin *et al.* 2008). Ils permettent d'implanter des arbres (pins, eucalyptus) qui ne survivraient pas s'ils n'étaient pas mycorhizés ou s'ils étaient inoculés avec des champignons non adaptés à de telles conditions (Lamhamedi *et al.* 1991, 2009; Quoreshi *et al.* 2009). Dans de telles conditions très exigeantes, l'utilisation de plants mycorhizés peut donc améliorer significativement la croissance, la survie et l'établissement des plants après leur mise en terre (Fortin *et al.* 2008,

Kropp et Langlois 1990, Lamhamedi *et al.* 1991, 2009, Le Tacon *et al.* 1988, 1992, 1997, Quoreshi *et al.* 2009).

Différentes souches d'une même espèce de champignon ectomycorhizien peuvent aussi avoir des effets très différents sur les performances d'un même arbre. Ces effets peuvent aussi varier en fonction du génotype de l'arbre (Lamhamedi *et al.* 1990, 1991, Rosado *et al.* 1994a, 1994b). Selon Le Tacon *et al.* (1997), certaines souches sont plus efficaces que d'autres dans des conditions écologiques déterminées. Les causes de cette variabilité demeurent inconnues, mais résultent probablement d'un grand nombre de facteurs. Par ailleurs, les effets d'une même espèce de champignon ectomycorhizien sur la croissance et la survie de son hôte peuvent varier considérablement selon le site où elle a été introduite (Lamhamedi *et al.* 1990, 1991, Rosado *et al.* 1994a, 1994b). Par exemple, de nombreuses études ont démontré que le champignon *Pisolithus tinctorius* avait permis d'obtenir des gains significatifs de croissance et de survie à plusieurs espèces de pins dans des conditions de températures élevées et sur des sites pauvres et dégradés (ex : anciens sites miniers) du sud-est des États-Unis (Pennsylvanie) et en Afrique (d'abord, les travaux de Marx 1980, 1991, Marx et Cordell 1988, Marx *et al.* 1977, 1988, 1992, et Ruehle 1982; puis ceux d'autres équipes, dont les travaux sont synthétisés par Castellano 1996, Fortin *et al.* 2008, Kropp et Langlois 1990, Lamhamedi *et al.* 2009 et Quoreshi *et al.* 2009). Par contre, dans le sud-ouest de l'Oregon, *P. tinctorius* n'a pas donné les résultats escomptés, car il ne semblait pas adapté au climat et aux conditions des sites forestiers de la région. En effet, des plants de sapin de Douglas et de 3 autres espèces résineuses inoculés avec *P. tinctorius* n'y ont pas mieux performé que les plants non inoculés (Castellano et Trappe 1991). De meilleurs résultats ont été obtenus à cet endroit avec le champignon ectomycorhizien *Rhizopogon sp.* (Castellano et Trappe 1985).

### 3.1.4 Taux élevé de survie des plants témoins dans les plantations

Quatre à 21 ans après la mise en terre, tant les plants témoins non inoculés que ceux inoculés présentaient des taux de survie élevés (moyenne de 83 à 100 % dans 12 des 15 plantations et de 69 à 76 % dans les 3 restantes), et ce, bien qu'à la sortie de pépinière, leurs concentrations foliaires en N aient été presque toujours inférieures aux critères actuels (Veilleux *et al.* 2014). Le taux de survie très

élevé même chez les plants témoins rend plus difficile l'obtention d'un gain de survie significatif chez les plants inoculés avec *L. bicolor*.

### 3.1.5 Plus petite taille des plants inoculés artificiellement à la sortie de la pépinière

Au moment du reboisement, les plants inoculés produits en récipients 45-110 étaient de taille équivalente ou significativement plus petits que les plants témoins. Ainsi, les plants mycorhizés par *Laccaria bicolor* ont fourni des sucres à ce champignon, mais n'ont pas retiré assez d'avantages nutritionnels de cette symbiose, dans un volume de substrat aussi petit que 110 cm<sup>3</sup>, pour que leur croissance égale ou dépasse celle des plants témoins. Un effet dépressif de la mycorhization sur la croissance des plants inoculés avec *L. bicolor* par rapport aux témoins à la sortie de la pépinière a été observé dans plusieurs études (Gagnon *et al.* 1987, 1988, 1991). Les plants plus petits ont été désavantagés dès la plantation, et l'écart initial de hauteur n'a pas pu être comblé au fil des années. La même situation a été observée par Hunt (1992).

### 3.1.6 Bilan

À notre avis, le faible taux de mycorhization des plants inoculés avec *L. bicolor* au moment du reboisement est la plus importante cause de l'absence de gain significatif de croissance par rapport aux plants témoins non inoculés. En effet, le taux de mycorhization avec *L. bicolor* semble avoir été insuffisant pour permettre aux plants de profiter pleinement des avantages nutritionnels, métaboliques et prophylactiques du champignon ectomycorhizien. De plus, le fait que les plants témoins aient été mycorhizés naturellement à la sortie de la pépinière et que les champignons ectomycorhiziens abondent sur les sites de reboisement du Québec ont réduit les chances d'observer des gains significatifs avec des plants inoculés avec *L. bicolor*, puisque ce champignon se trouvait en situation de compétition avec ceux naturellement présents sur les sites.

Il aurait été intéressant d'utiliser des marqueurs moléculaires afin de vérifier la persistance du champignon ectomycorhizien *L. bicolor* dans les 15 plantations à l'étude. Malheureusement, les méthodes n'étaient pas tout à fait au point à l'époque, dans les années 1980. Maintenant que des marqueurs moléculaires efficaces existent (Gagné *et al.* 2006, Selosse *et al.* 2000), ces sites pourraient servir à étudier la persistance à long terme des différentes souches de *L. bicolor* en plantation.

### 3.2 Cas particulier de l'épinette noire sur un site à éricacées (Juchereau A)

Parmi les 15 plantations étudiées, c'est sur le site à éricacées Juchereau A que les plants d'épinette noire inoculés avec *L. bicolor* ont le mieux performé par rapport aux témoins. En effet, bien que la différence de hauteur après 21 ans ne soit pas statistiquement significative, l'écart relatif entre les 2 traitements était plus faible sur le site Juchereau A, à plus forte présence de *kalmia*, que sur le site voisin de Juchereau, où le taux de recouvrement d'éricacées était moitié moindre. Zeng et Mallik (2006) ont montré que le champignon ectomycorhizien *Paxillus involutus* (Fries) Fries était capable de dégrader les composés phénoliques du *Kalmia angustifolia* en conditions contrôlées. Quant à eux, Walker et Mallik (2009) n'ont pas observé de gain significatif de croissance après la mise en terre de plants d'épinette noire mycorhizés par *Paxillus involutus* sur des sites à *kalmia*, par rapport aux plants témoins non inoculés.

Au Québec, les sites à *kalmia* peu fertiles représentent une proportion importante des sites reboisés avec l'épinette noire. La croissance de celle-ci y est souvent ralentie par le *kalmia*, qui lui fait fortement concurrence pour les éléments nutritifs et favorise l'accumulation d'un humus brut où les nutriments sont peu disponibles (Inderjit et Mallik 1996, LeBel *et al.* 2008, Thiffault *et al.* 2004, Yamasaki *et al.* 1998). Qui plus est, le *kalmia* libère dans le sol des substances allélopathiques (phénols et des tanins) qui inhibent certaines enzymes associées à la décomposition de la matière organique et qui ralentissent la croissance racinaire (Joanisse *et al.* 2007, 2009, Zeng et Mallik. 2006, Zhu et Mallik 1994). Compte tenu des résultats obtenus sur le site Juchereau A, nous croyons que, si de nouvelles études d'inoculation de champignons ectomycorhiziens devaient être effectuées sur des sites forestiers au Québec, il faudrait privilégier les stations à éricacées. C'est là que les avantages des champignons ectomycorhiziens nous semblent avoir le plus de chances de se concrétiser. Une condition essentielle au succès de nouvelles études serait toutefois que les plants soient fortement mycorhizés avec une ou même plusieurs souches (spores ou autre type d'inoculum) de champignon ectomycorhizien.

## Conclusion

Les résultats des mesures finales effectuées de 4 à 21 ans après le reboisement dans 15 plantations de plants mycorhizés du Québec ont montré que la mise en terre de plants en récipients inoculés artificiellement en pépinière forestière avec différentes souches du champignon *L. bicolor* (0101, 92.4 et 92.9) n'a pas conduit à des gains significatifs de hauteur, de diamètre ou du taux de survie par rapport à celle de plants témoins non inoculés.

Cette absence de gain s'expliquerait principalement par le faible taux de mycorhization initial des plants par *L. bicolor* au moment du reboisement, puisque, dans 11 des 15 plantations, *L. bicolor* avait colonisé, en moyenne, moins de la moitié des racines courtes d'absorption (radicelles) de chaque plant inoculé en pépinière. De tels plants n'ont probablement pas pu profiter pleinement des avantages nutritionnels, métaboliques et prophylactiques qu'aurait pu leur procurer ce champignon ectomycorhizien si le taux de mycorhization initial des plants avait dépassé ce seuil minimal de 50%.



## Références bibliographiques

- Bâ, A.M., R. Duponnois, M. Diabaté et B. Dreyfus, 2011. *Les champignons ectomycorhiziens des arbres forestiers en Afrique de l'Ouest. Méthodes d'étude, diversité, écologie, utilisation en foresterie et comestibilité*. Collection Didactiques. IRD Éditions. Marseille (France). 264 p.
- Baar, J., W.A. Ozinga et T.W. Kuyper, 1994. *Spatial distribution of Laccaria bicolor genets reflected by sporocarps after removal of litter and humus layers in a Pinus sylvestris forest*. Mycol. Res. 98: 726–728.
- Berch, S.M. et A.L. Roth, 1993. *Ectomycorrhizae and growth of Douglas fir seedlings preinoculated with Rhizopogon vinicolor and outplanted on eastern Vancouver Island*. Can. J. For. Res. 23: 1711–1715.
- Bledsoe, C.S., K. Tennyson et W. Lopushinsky, 1982. *Survival and growth of outplanted Douglas-fir seedlings inoculated with mycorrhizal fungi*. Can. J. For. Res. 12: 720–723.
- Bolghari, H.A. et V. Bertrand, 1984. *Tables préliminaires de production des principales essences résineuses plantées dans la partie centrale du sud du Québec*. Gouvernement du Québec, ministère de l'Énergie et des Ressources, Service de la recherche (Terres et Forêts). Mémoire de recherche forestière n° 79. 392 p. [[www.mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Divers/Memoire79.pdf](http://www.mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Divers/Memoire79.pdf)]
- Browning, M.H.R. et R.D. Whitney, 1991. *Responses of jack pine and black spruce seedlings to inoculation with selected species of ectomycorrhizal fungi*. Can. J. For. Res. 21: 701–706.
- Browning, M.H.R. et R.D. Whitney, 1992. *Field performance of black spruce and jack pine inoculated with selected species of ectomycorrhizal fungi*. Can. J. For. Res. 22: 1974–1982.
- Browning, M.H.R. et R.D. Whitney, 1993. *Infection of containerized jack pine and black spruce by Laccaria species and Thelephora terrestris and seedling survival and growth after outplanting*. Can. J. For. Res. 23: 330–333.
- 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.
- Campbell, D.B., M.D. Jones, S. Kiiskila et C. Bulmer, 2003. *Two-year field performance of lodgepole pine seedlings: Effects of container type, mycorrhizal fungal inoculants, and site preparation*. J. Ecosyst. Manage. 3(2): 1–11.
- Castellano, M.A., 1996. *Outplanting performance of mycorrhizal inoculated seedlings*. Dans : Mukerji, K.G. (éd.). *Concepts in mycorrhizal research*. Handbook of vegetation science. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht (Pays-Bas). p. 223–301.
- 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.
- Castellano, M.A. et J.M. Trappe, 1991. *Pisolithus tinctorius fails to improve plantation performance of conifers in southwestern Oregon*. New For. 5: 349–358.
- Danielson, R.M. et S. Visser, 1989. *Host response to inoculation and behaviour of introduced and indigenous ectomycorrhizal fungi of jack pine grown on oil-sands tailings*. Can. J. For. Res. 19: 1412–1421.
- Dixon, R.K., H.E. Garrett et H.E. Stelzer, 1987. *Growth and ectomycorrhizal development of Loblolly pine progenies inoculated with three isolates of Pisolithus tinctorius*. Silvae Genet. 36: 240–245.
- Fortin, J.A. et M.S. Lamhamedi, 2009. *Ecophysiology of sporocarp development of ectomycorrhizal basidiomycetes associated with boreal forest gymnosperms*. Chapitre 13. Dans : Khasa, D., Y. Piché et A.P. Coughlan (éds.). *Advances in mycorrhizal science and technology*. NRC Research Press. Ottawa, ON. p. 161–173.
- Fortin, J.A., C. Plenchette et Y. Piché, 2008. *Les mycorhizes : La nouvelle révolution verte*. Éditions MultiMondes, Éditions Quae. Québec, QC. 131 p.

- Gagné, A, J.-L. Jany, J. Bousquet et D.P. Khasa, 2006. *Ectomycorrhizal fungal communities of nursery-inoculated seedlings outplanted on clear-cut sites in northern Alberta*. Can. J. For. Res. 36: 1684–1694.
- Gagnon, J., 1988. *Croissance et mycorhization du pin gris et de l'épinette noire cultivés en récipients en fonction de différents champignons ectomycorhiziens sous une régie nutritionnelle contrôlée*. Mémoire de maîtrise n° 8121. Faculté de foresterie et de géodésie, département des sciences forestières, Université Laval. Sainte-Foy, QC. 56 p.
- Gagnon, J., 1996. *Stimulation of mycorrhization and growth for containerized jack pine seedlings inoculated with Laccaria bicolor and Pseudomonas fluorescens*. Dans : Azcon-Aguilar, C. et J.M. Barea (éds). *Fourth European symposium on mycorrhizas*. 11 au 14 juillet 1994. Final report. European Commission, Directorate General XII, Science, Research and Development. EUR 16728 EN. Grenade (Espagne). p. 634–637.
- Gagnon, J. et M.S. Lamhamedi, 2011. *L'inoculation des plants résineux en récipients par des spores de champignons ectomycorhiziens à l'automne pourrait-elle contribuer à réduire les problèmes d'insuffisance racinaire dans les pépinières forestières du Québec?* Dans : Colas, F. et M.S. Lamhamedi (éds.). *Production de plants forestiers au Québec : la culture de l'innovation*. Colloque de transfert de connaissances et de savoir-faire. 4 au 6 octobre 2011. Québec, QC. Gouvernement du Québec, Ministère des Ressources naturelles et de la Faune. p. 27–32. [[www.mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Gagnon-Jean/Recueil-resume-inoculation-carrefour2011.pdf](http://www.mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Gagnon-Jean/Recueil-resume-inoculation-carrefour2011.pdf)]
- Gagnon, J. et C.-G. Langlois, 1995. *Utilisation pratique des mycorhizes en foresterie : à la croisée des chemins*. Dans : Fortin, J.A., Charest, C. et Y. Piché (éds). *La symbiose mycorhizienne : état des connaissances*. Éditions ORBIS. Montréal, QC. 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.
- Guinberteau, J., M. Ducamp, N. Poitou, M. Mamoun et J.-M. Olivier, 1990. *Ecology of various competitors from an experimental plot of Pinus pinaster inoculated with Suillus granulatus and Lactarius deliciosus*. Agric., Ecosyst. Environ. 28: 161–165.
- Högberg, M.N. et P. Högberg, 2002. *Extramatrixal ectomycorrhizal mycelium contributes one-third of microbial biomass and produces, together with associated roots, half the dissolved organic carbon in a forest soil*. New Phytol. 154: 791–795.
- Hunt, G.A., 1992. *Effects of mycorrhizal fungi on quality of nursery stock and plantation performance in the southern interior of British Columbia*. Forestry Canada et B.C. Ministry of Forests. Victoria, CB. FRDA Report n° 185. 12 p. [<https://www.for.gov.bc.ca/hfd/pubs/docs/fr/FR185.htm>]
- Inderjit et A.U. Mallik, 1996. *The nature of interference potential of Kalmia angustifolia*. Can. J. For. Res. 26: 1899–1904.
- Joanisse, G.D., R.L. Bradley, C.M. Preston et A.D. Munson, 2007. *Soil enzyme inhibition by condensed litter tannins may drive ecosystem structure and processes: the case of Kalmia angustifolia*. New Phytol. 175: 535–546.
- Joanisse, G.D., R.L. Bradley, C.M. Preston et G.D. Bending, 2009. *Sequestration of soil nitrogen as tannin-protein complexes may improve the competitive ability of sheep laurel (Kalmia angustifolia) relative to black spruce (Picea mariana)*. New Phytol. 181: 187–198.
- Khasa, D.P., L. Sigler, P. Chakravarty, B.P. Dancik, L. Erickson et D. McCurdy, 2001. *Effect of fertilization on growth and ectomycorrhizal development of container-grown and bare-root nursery conifer seedlings*. New For. 22: 179–197.
- Kropp, B.R. et C.-G. Langlois, 1990. *Ectomycorrhizae in reforestation*. Can. J. For. Res. 20: 438–451.

- Lamhamedi, M.S., J.A. Fortin, H.H. Kope et B.R. Kropp, 1990. *Genetic variation in ectomycorrhiza formation by Pisolithus arhizus on Pinus pinaster and Pinus banksiana*. New Phytol. 115: 689–697.
- Lamhamedi, M.S., J.A. Fortin et P.Y. Bernier, 1991. *La génétique de Pisolithus sp. : une nouvelle approche de biotechnologie forestière pour assurer une meilleure survie des plants en conditions de sécheresse*. Sécheresse 2: 251–258.
- Lamhamedi, M.S., M. Abourouh et J.A. Fortin, 2009. *Technological transfer: the use of ectomycorrhizal fungi in conventional and modern forest tree nurseries in northern Africa*. Chapitre 11. Dans : Khasa, D., Y. Piché et A.P. Coughlan (éds.). *Advances in mycorrhizal science and technology*. NRC Research Press. Ottawa, ON. p. 139–152.
- 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.A. Fortin, 1982. *Mycorrhizal development on containerized tree seedlings*. Dans : Scarrat, J.B., C. Glerum et C.A. Plexman (éds). *Proceedings of the Canadian containerized tree seedling symposium*. 14 au 16 septembre 1981. Toronto, ON. Service canadien des Forêts, Great Lake Forest Research Centre. Sault Ste-Marie, ON. COJFRC Symp. Proc. O-P-10. p. 183–202.
- Langlois, C.-G. et J. Gagnon, 1988. *The production of mycorrhizal conifer seedlings in Quebec : the progression of the project*. Dans : Lalonde, M. et Y. Piché (éds). *Canadian workshop on mycorrhizae in forestry*. Centre de recherche en biologie forestière, Université Laval. 1 au 4 mai 1988. Sainte-Foy, QC. p. 9–13.
- LeBel, P., N. Thiffault et R.L. Bradley, 2008. *Kalmia removal increases nutrient supply and growth of black spruce seedlings: An effect fertilizer cannot emulate*. For. Ecol. Manage. 256: 1780–1784.
- Le Tacon, F., J. Garbaye, D. Bouchard, G. Chevalier, J.M. Olivier, J. Guimberteau, N. Poitou et H. Frochot, 1988. *Field results from ectomycorrhizal inoculation in France*. Dans : Lalonde, M. et Y. Piché (éds). *Canadian workshop on mycorrhizae in forestry*. Centre de recherche en biologie forestière, Université Laval. 1 au 4 mai 1988. Sainte-Foy, QC. p. 51–74.
- Le Tacon, F., I.F. Alvarez, D. Bouchard, B. Henrion, R.M. Jackson, S. Luff, J.I. Parlade, J. Pera, E. Stenström, N. Villeneuve et C. Walker, 1992. *Variations in field response of forest trees to nursery ectomycorrhizal inoculation in Europe*. Dans : Read, D.J., D.H. Lewis, A.H. Fitter et I.J. Alexander (éds). *Mycorrhizas in ecosystems*. CAB International. Wallingford (Royaume-Uni). p. 119–134.
- Le Tacon, F., D. Mousain, J. Garbaye, D. Bouchard, J.-L. Churin, C. Argillier, J.-M. Amirault et B. Généré, 1997. *Mycorhizes, pépinières et plantations forestières en France*. Rev. For. Fr. XLIX (numéro spécial): 131–154.
- Malajczuk, N., P. Redell et M. Brundrett, 1994. *The role of ectomycorrhizal fungi in minesite reclamation*. Dans : Pflieger, F.L. et R.G. Linderman (éds). *Mycorrhizae and plant health*. American Phytopathological Society Press. St Paul, MN (États-Unis). p. 83–100.
- Marx, D.H., 1980. *Ectomycorrhiza fungus inoculations: a tool for improving forestation practices*. Dans : Mikola, P. (éd). *Tropical mycorrhiza research*. Oxford University Press. Oxford (Royaume-Uni). p. 13–71.
- Marx, D.H., 1991. *The practical significance of ectomycorrhizae in forest establishment*. Dans : Hägglund, B. (éd). *Ecophysiology of mycorrhizae of forest trees*. 27 septembre 1991. Stockholm (Suède). *The Marcus Wallenberg Foundation Symposia Proceedings 7*: 54–90.
- Marx, D.H. et C.E. Cordell, 1988. *Specific ectomycorrhizae improve reforestation and reclamation in the eastern United States*. Dans : Lalonde, M. et Y. Piché (éds). *Canadian workshop on mycorrhizae in forestry*. Centre de recherche en biologie forestière, Université Laval. 1 au 4 mai 1988. Sainte-Foy, QC. p. 75–86.
- Marx, D.H., A.B. Hatch et J.F. Mendicino, 1977. *High soil fertility decreases sucrose content and susceptibility of loblolly pine roots to ectomycorrhizal infection by Pisolithus tinctorius*. Can. J. Bot. 55: 1569–1574.
- Marx, D.H., J.L. Ruehle, D.S. Kenny, C.E. Cordell, J.W. Riffle, R.J. Molina, W.H. Pawuck, S. Navratil, R.W. Tinus et O.C. Goodwin, 1982. *Commercial vegetative inoculum of Pisolithus tinctorius and inoculation techniques for development of ectomycorrhizae on container grown tree seedlings*. For. Sci. 28: 373–400.

- Marx, D.H., C.E. Cordell et A. Clark, 1988. *Eight-year performance of loblolly pine with Pisolithus ectomycorrhizae on a good-quality forest site*. South. J. Appl. For. 12: 275–280.
- Marx, D.H., B.M. Stephen et C.E. Cordell, 1992. *Application of specific ectomycorrhizal fungi in world forestry*. Dans : Leatham, G.F. (éd). *Frontiers in industrial mycology*. Chapman & Hall. New York, NY (États-Unis). p. 78–98.
- McAfee B.J. et J.A. Fortin, 1986. *Competitive interactions of ectomycorrhizal mycobionts under field conditions*. Can. J. Bot. 64: 848–852.
- [MFFP] Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, 2015. *Norme de stratification écoforestière, quatrième inventaire écoforestier (réédition 2015)*. Gouvernement du Québec, Direction des inventaires forestiers. 111 p. [<https://www.mffp.gouv.qc.ca/forets/inventaire/pdf/norme-stratification.pdf>]
- Prégent, G., V. Bertrand et L. Charrette, 1996. *Tables préliminaires de rendement pour les plantations d'épinette noire au Québec*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources Naturelles, Direction de la recherche forestière. Mémoire de recherche forestière n° 118. 70 p. [[mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Pregent-Guy/Memoire118.pdf](https://www.mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Pregent-Guy/Memoire118.pdf)]
- Quoreshi, A.M., et V.R. Timmer, 2000. *Early outplanting performance of nutrient-loaded containerized black spruce seedlings inoculated with Laccaria bicolor: a bioassay study*. Can. J. For. Res. 30: 744–752.
- Quoreshi, A.M., G. Kernaghan et G.A. Hunt, 2009. *Mycorrhizal fungi in Canada forest nurseries and field performance of inoculated seedlings*. Chapitre 9. Dans : Khasa, D., Y. Piché et A.P. Coughlan (éds.). *Advances in mycorrhizal science and technology*. NRC Research Press. Ottawa, ON. p. 115–127.
- Rosado, S.C.S., B.R. Kropp et Y. Piché, 1994a. *Genetics of ectomycorrhizal symbiosis. I. Host plant variability and heritability of ectomycorrhizal fungi*. New Phytol. 126: 105–110.
- Rosado, S.C.S., B.R. Kropp et Y. Piché, 1994b. *Genetics of ectomycorrhizal symbiosis. II. Fungal variability and heritability of ectomycorrhizal traits*. New Phytol. 126: 111–117.
- Ruehle, J.L., 1982. *Field performance of container-grown loblolly pine seedlings with specific ectomycorrhizae on a reforestation site in South Carolina*. South. J. Appl. For. 6: 30–33.
- Ruehle, J.L. et C.G. Wells, 1984. *Development of Pisolithus tinctorius ectomycorrhizae on container-grown pine seedlings as affected by fertility*. For. Sci. 30: 1010–1016.
- SAS Institute Inc., 2009. *SAS/STAT® 9.2 User's Guide*. Second Edition. Cary, NC (États-Unis). SAS Institute Inc.
- Saucier, J.-P., P. Grondin, A. Robitaille et J.-F. Bergeron, 2003. *Zones de végétation et domaines bioclimatiques du Québec*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles, de la Faune et des Parcs, Direction des inventaires forestiers. Carte couleur. [<https://www.mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/zone-f.pdf>]
- Selosse, M.-A., D. Bouchard, F. Martin et F. Le Tacon, 2000. *Effect of Laccaria bicolor strains inoculated on Douglas-fir (Pseudotsuga menziesii) several years after nursery inoculation*. Can. J. For. Res. 30: 360–371.
- Shaw, C.G.III., R. Molina et J. Walden, 1982. *Development of ectomycorrhizae following inoculation of containerized Sitka and white spruce seedlings*. Can. J. For. Res. 12: 191–195.
- Smith, S.E. et D.J. Read, 1997. *Mycorrhizal symbiosis*. 2<sup>nd</sup> Edition. Academic Press, San Diego, CA (États-Unis). 605 p.
- Teste, F.P., M.G. Schmidt, S.M. Berch, C. Bulmer et K. Egger, 2004. *Effects of ectomycorrhizal inoculants on survival and growth of interior Douglas-fir seedlings on reforestation sites and partially rehabilitated landings*. Can. J. For. Res. 34: 2074–2088.
- 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.
- Veilleux, P., J.Y. Allard, F. Bart, B.M. Gingras, D. Boyer Groulx, D. Labrecque et A. Murray, 2014. *Guide terrain. Inventaire de qualification des plants résineux cultivés en récipients*. Document de travail, livraison 2014. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles, Direction générale de la production de semences et de plants forestiers. 141 p.
- Villeneuve, N., F. Le Tacon et D. Bouchard, 1991. *Survival of inoculated Laccaria bicolor in competition with native ectomycorrhizal fungi and effects on the growth of outplanted Douglas-fir seedlings*. Plant Soil 135: 95–170.

- 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*. For. Ecol. Manage. 105: 197–207.
- Zeng, R.-S. et A.U. Mallik, 2006. *Selected ectomycorrhizal fungi of black spruce (Picea mariana) can detoxify phenolic compounds of Kalmia angustifolia*. J. Chem. Ecol. 32: 1473–1489.
- Zhu, H. et A.U. Mallik, 1994. *Interactions between Kalmia and black spruce: isolation and identification of allelopathic compounds*. J. Chem. Ecol. 20(2): 407–421.



# Annexes

**Annexe 1.** Caractéristiques écologiques et coordonnées des sites de plantation des dispositifs établis de 1985 à 1995.

Catégorie de site	Essence	Nom du site de reboisement	Année de mise en terre des plants	Unité de gestion	Coordonnées	Type écologique <sup>1</sup>	Dépôt de surface <sup>2</sup>	Classe de pente <sup>3</sup>	Classe de drainage	
Forestier	Épinette noire	Lacoste B	1989	Charlevoix	47° 46' 46" N, 70° 28' 33" O.	MS22	1aY	Modérée	Bon	
		Juchereau	1990	Saint-Félicien	49° 50' 20" N, 72° 37' 51" O.	RS22	1a	Faible	Modéré	
	Épinette blanche	Juchereau A	1990	Saint-Félicien	49° 52' 48" N, 72° 38' 8" O.	RE21	2a	Douce	Bon	
		Asselin	1989	Grand-Portage	47° 48' 10" N, 68° 27' 13" O.	MS12	1a	Faible	Modéré	
	Pin gris	Berry	Berry	1985	Harricana-Sud	48° 44' 56" N, 78° 22' 25" O.	RS21	4gs	Nulle	Bon
			Soisson 1	1985	Harricana-Sud	49° 10' 18" N, 77° 56' 30" O.	ME13	4ga	Faible	Modéré
		Soisson 2	1985	Harricana-Sud	49° 09' 55" N, 77° 54' 27" O.	RS21	4gs	Faible	Modéré	
		Desautels A	1989	Saint-Félicien	49° 23' 40" N, 73° 18' 08" O.	RE21	2be	Nulle	Bon	
		Desautels B	1989	Saint-Félicien	49° 23' 00" N, 73° 17' 00" O.	RS22	1a	Faible	Modéré	
		Desautels C	1989	Saint-Félicien	49° 22' 25" N, 73° 16' 45" O.	RE25	1a	Faible	Imparfait	
Méleze laricin	Basserode	1989	Rouyn-Noranda	47° 55' 09" N, 78° 46' 07" O.	RS26	4ga	Nulle	Imparfait		
	Montbray	1989	Rouyn-Noranda	48° 25' 41" N, 79° 21' 18" O.	MS22	1a	Faible	Modéré		
Friche agricole	Pin gris	Princeville	1994	Bas Saint-Maurice	46° 08' 49" N, 71° 49' 24" O.	MJ11	2bd	Faible	Modéré	
		Saint-Cyrille-de-Wendover (2 dispositifs)	1995	Bas Saint-Maurice	45° 53' 07" N, 72° 25' 24" O.	MJ14	5s	Nulle	Imparfait	

<sup>1</sup> Codes des types écologiques (MFFP 2015) :

**MS22** : sapinière à bouleau blanc sur dépôt de mince à épais, de texture moyenne et de drainage mésique.

**RS22** : sapinière à épinette noire sur dépôt de mince à épais, de texture moyenne et de drainage mésique.

**RE21** : pessière noire à mousses ou à éricacées sur dépôt de mince à épais, de texture grossière et de drainage xérique ou mésique.

**MS12** : sapinière à bouleau jaune sur dépôt de mince à épais, de texture moyenne et de drainage mésique.

**RS21** : sapinière à épinette noire sur dépôt de mince à épais, de texture grossière et de drainage xérique ou mésique.

**ME13** : pessière noire à peuplier faux tremble sur dépôt de mince à épais, de texture fine et de drainage mésique.

**RE25** : pessière noire à mousses ou à éricacées sur dépôt de mince à épais, de texture moyenne et de drainage subhydrique.

**RS26** : sapinière à épinette noire sur dépôt de mince à épais, de texture fine et de drainage subhydrique.

**MJ11** : bétulaie jaune à sapin et érable à sucre sur dépôt de mince à épais, de texture grossière et de drainage xérique ou mésique.

**MJ14** : bétulaie jaune à sapin et érable à sucre sur dépôt de mince à épais, de texture grossière et de drainage subhydrique.

<sup>2</sup> Codes des dépôts de surface (MFFP 2015) :

**1aY** : dépôt glaciaire, sans morphologie particulière, till indifférencié, épaisseur moyenne de 50 cm à 1 m avec affleurments rocheux rares à très rares.

**1a** : dépôt glaciaire, sans morphologie particulière, till indifférencié.  
**2a** : dépôt fluvio-glaciaire, juxta-glaciaire.

**4gs** : dépôt lacustre, glacio-lacustre, (faciès d'eau peu profonde).

**4ga** : dépôt lacustre, glacio-lacustre, (faciès d'eau profonde).

**2be** : dépôt fluvio-glaciaire, pro-glaciaire, épanchage.

**2bd** : dépôt fluvio-glaciaire, pro-glaciaire, delta fluvio-glaciaire.

**5s** : dépôt marin, marin (faciès d'eau peu profonde).

<sup>3</sup> Codes des classes de pentes (MFFP 2015) :

**Modérée** : inclinaison de 16 à 30 %.

**Faible** : inclinaison de 4 à 8 %.

**Douce** : inclinaison de 9 à 15 %.

**Nulle** : inclinaison de 0 à 3 %.

**Annexe 2.**

Caractéristiques physicochimiques du sol des sites de plantation au moment de l'installation des dispositifs sur 12 sites forestiers et 2 sites de friches agricoles. Tous les sols ont été prélevés dans la zone racinaire des plants (0-20 cm). Pour les sites Berry, Soisson 1 et Soisson 2 : n = 3 échantillons composites constitués du mélange de 60 sols, soit 10 sols/bloc x 6 blocs. Pour les autres dispositifs : n = 3 échantillons composites constitués du mélange de 140 sols, soit 10 sols/bloc x 14 blocs.

Catégorie de site	Essence	Nom du site de reboisement	Année de mise en terre des plants	M.O.*	Carbone (%)	N Kjeldahl (N <sub>k</sub> )	C/N	pH (CaCl <sub>2</sub> )	N <sub>min</sub> <sup>†</sup> (KCl) mg/kg	Éléments échangeables (Mehlich-3)			Classe texturale	
										P	K	Ca Mg		
Forestier	Épinette noire	Lacoste B	1989	7,7	4,4	0,16	28	4,00	4	33	29	151	15	Loam sableux
		Juchereau	1990	6,3	3,7	0,08	46	3,23	10	35	27	149	29	Loam sableux
		Juchereau A	1990	6,6	3,8	0,07	55	3,50	2	69	23	85	18	Loam sableux
	Épinette blanche	Asselin	1989	5,4	3,1	0,18	17	4,26	9	27	37	40	3	Loam
		Berry	1985	1,2	0,7	0,04	17	4,65	3	96	6	17	3	Sable
		Soisson 1	1985	5,2	3,0	0,12	25	3,91	18	146	135	318	131	Argile lourde
	Pin gris	Soisson 2	1985	3,3	1,9	0,07	25	4,02	4	191	29	51	14	Sable loameux
		Desautels A	1989	1,6	0,9	0,03	28	3,60	3	17	9	34	7	Sable
		Desautels B	1989	4,4	2,5	0,10	26	3,40	3	144	31	104	19	Loam sableux
	Mélèze laricin	Desautels C	1989	4,4	2,5	0,09	29	4,20	5	10	14	73	7	Loam sableux
		Basserode	1989	19,0	11,0	0,44	25	3,90	9	24	115	371	139	Argile sableuse
		Montbray	1989	6,0	3,5	0,19	18	4,20	8	22	240	1390	287	Argile lourde
Friche agricole	Pin gris	Princeville	1994	43,7	25,4	0,15	17	4,46	3	31	33	106	10	Sable loameux
		Saint-Cyrille-de-Wendover (2 dispositifs)	1995	3,2	1,9	0,10	19	4,44	3	31	22	101	8	Sable

\* M.O. : Matière organique. Pourcentage estimé en multipliant la concentration en carbone par 1,724.

† L'azote minéral (N<sub>min</sub>) est sous la forme d'ammonium (NH<sub>4</sub>) seulement, puisque les sols ne renfermaient pas de nitrate (NO<sub>3</sub>).

**Annexe 3.** Variables morphologiques et concentration foliaire en azote (N) mesurées avant la mise en terre des plants en récipients de 4 essences inoculés avec 3 souches du champignon *Laccaria bicolor* ainsi que des plants témoins non inoculés.

Catégorie de site	Essence	Nom du site de reboisement	Type de récipient (Date de mesure avant le reboisement)	Traitements	Masses sèches (g)		Rapport tiges/racines	Concentration foliaire en N (%)		
					Tiges	Racines			Totale	
Forestier*	Épinette noire	Lacoste B	45-110 (5 juin 1989)	<i>Laccaria bicolor</i> 0101	3,1	0,6	3,7	5,1	1,0	
				Témoin	3,1	0,6	3,8	4,9	1,0	
		Juchereau, Juchereau A	45-110 (16 oct. 1989)	<i>Laccaria bicolor</i> 0101	1,7	0,4	2,1	4,1	1,7	
				Témoin	1,7	0,5	2,1	3,6	1,7	
		Épinette blanche	Asselin	45-110 (30 mai 1989)	<i>Laccaria bicolor</i> 0101	2,0	0,6	2,6	3,1	1,2
			Berry, Soisson 1 et 2	45-110 (7 juillet 1985)	<i>Laccaria bicolor</i> 0101	-	-	-	-	-
					Témoin	-	-	-	-	-
		Pin gris	Desautels A, B et C	45-110 (19 juin 1989)	<i>Laccaria bicolor</i> 0101	2,4	0,8	3,2	2,9	1,1
					Témoin	2,9	0,9	3,8	3,3	1,4
		Mélèze laricin	Basserode, Montbray	45-110 (10 juillet 1989)	<i>Laccaria bicolor</i> 0101	2,0	0,6	2,6	3,4	0,8
Friche agricole†	Pin gris	Princeville	45-340 (4 juillet 1994)	<i>Laccaria bicolor</i> 92.9	4,0	1,1	5,1	3,6	1,6	
					Témoin	3,4	1,0	4,5	3,3	1,4
			Saint-Cyrille-de-Wendover (2 dispositifs)	25-350A (19 juin 1995)	<i>Laccaria bicolor</i> 92.9	2,8	0,7	3,5	3,9	1,5
					Témoin	2,8	0,7	3,5	4,0	1,4
				45-340 (19 juin 1995)	<i>Laccaria bicolor</i> 92.4	2,2	0,8	3,0	3,0	1,2
					Témoin	2,5	0,9	3,4	2,7	1,5

\* Pour les dispositifs en sites forestiers, 72 plants par traitement ont été prélevés en pépinière pour les mesures des masses sèches (n = 72), puis regroupés en 3 échantillons composites de 24 plants pour l'analyse de la concentration foliaire en N (n = 3).

† Pour les dispositifs sur friches agricoles, 48 plants par traitement ont été prélevés en pépinière pour les mesures des masses sèches (n = 48), puis regroupés en 3 échantillons composites de 16 plants pour l'analyse de la concentration foliaire en N (n = 3).

- Données manquantes.







Les chercheurs en production de semences et de plants de la Direction de la recherche forestière innovent pour aider les pépiniéristes à produire des semences et des plants de haute qualité morpho-physiologique, dans le respect de considérations environnementales. Leurs recherches visent entre autres à optimiser la germination et la conservation des semences, à protéger les plants du gel, à optimiser l'irrigation et la fertilisation pour mieux protéger les eaux souterraines, et à comprendre les effets des différents stress environnementaux sur la croissance, la physiologie et la tolérance aux stress des plants, tout en réduisant les coûts de production.

Plusieurs études ont démontré que les champignons ectomycorhiziens procurent des avantages nutritionnels, métaboliques et prophylactiques aux plants forestiers. Ils améliorent notamment la capacité d'absorption de l'eau et des éléments minéraux du sol, en augmentant la surface d'absorption du système racinaire des plants. L'objectif de ce projet était de vérifier, pour 4 espèces résineuses, si la mise en terre de plants en récipients inoculés artificiellement en pépinière avec de tels champignons pouvait améliorer leur croissance et leur survie sur différents sites de reboisement, par rapport à des plants témoins non inoculés. Ce mémoire présente les résultats des mesurages finaux de ces plants dans 15 plantations réparties dans 6 régions du Québec.