

Titre : Évaluation de la qualité morpho-physiologique du système racinaire des plants du mélèze laricin : les racines foncées ou noires peuvent-elles être considérées mortes*?

Année d'exécution : 2011

Responsable : Mohammed S. Lamhamedi*, ing.f., M. Sc., Ph. D.

Équipe technique : Mario Renaud, techn. for. spécialiste, Pascal Desjardins, techn. for., et Linda Veilleux, techn. lab.

* Les résultats publiés dans cet avis technique sont spécifiques au mélèze laricin



Légende des photos :

a- Plants de mélèze laricin (2+0) produits dans le récipient 15-320 à la pépinière de Saint-Modeste;
b- Deux systèmes racinaires de mélèze laricin de deux couleurs différentes (brune et noire ou foncée).

* Correspondance : mohammed.lamhamedi@mrf.gouv.qc.ca

Page du chercheur :

<http://www.mrn.gouv.qc.ca/forets/connaissances/recherche/repertoires/cv/LamhamediMohammedSghir.jsp>

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

On peut citer tout ou partie de ce texte en indiquant la référence

© Gouvernement du Québec

Avant propos

Cet avis scientifique est réalisé à la suite d'une demande de la pépinière de Saint-Modeste de la Direction générale des pépinières et des stations piscicoles (DGPSP) du ministère des Ressources naturelles et de la Faune (MRNF) du Québec. Cet avis scientifique préliminaire sera complété par une publication des différents résultats sous forme d'un mémoire de recherche.

Cet avis scientifique présente une synthèse des principaux résultats et observations préliminaires reliées à l'évaluation de la qualité morpho-physiologique du système racinaire des plants de mélèze laricin produits en récipients en pépinière forestière.

La réalisation de cet avis scientifique s'intègre dans le cadre de l'accompagnement, du transfert de connaissances et du savoir-faire auprès des pépinières forestières gouvernementales et privées du Québec. Il a pour objectif de porter un éclairage sur les spécificités du système racinaire des plants de mélèze laricin.

Le financement des activités reliées à cet avis est assuré entièrement par la Direction de recherche forestière du MRNF accordé à M. Mohammed S. Lamhamedi (n° projet : 112310038).

Remerciements

Nous tenons à remercier M. Michel Rioux, Mme Julie Gravel-Grenier, Mme Corine Rioux et le personnel de la pépinière de Saint-Modeste pour leur aide tout au long de la durée de réalisation de ce travail. Nos remerciements s'adressent également à MM. Denis Gélinas et Louis Labrecque, ainsi qu'à Mme Sylvie Goulet d'avoir mis à notre disposition des plants et des données sur les régies de culture de cette essence appliquées à la pépinière de Grandes-Piles. Nous remercions Mme Julie Samson d'avoir mis à notre disposition toute sa collection de diapositives sur les champignons ectomycorhiziens du mélèze laricin et les résultats de sa maîtrise, ainsi que le Dr. Christian Godbout pour son aide précieuse lors de la détermination de certains champignons ectomycorhiziens.

Nous remercions tout le personnel du laboratoire de chimie organique et inorganique de la Direction de la recherche forestière (DRF) du ministère des Ressources naturelles et de la Faune (MRNF) du Québec pour les analyses minérales des échantillons, Mme Sylvie Bourassa pour la mise en page et à Mme Denise Tousignant de la DRF, pour la révision complète et l'édition de cet avis scientifique.

Résumé exécutif

1- Les objectifs généraux de ce résumé long préliminaire consistent à : i) évaluer la qualité du système racinaire chez le mélèze laricin, tout en mettant l'accent sur la compréhension des facteurs qui pourraient expliquer la proportion élevée des racines foncées chez cette espèce, par rapport aux racines brunes normales; ii) certifier si ces racines foncées ou noires sont mortes ou vivantes; iii) évaluer la capacité des plants du mélèze laricin à régénérer de nouvelles racines en conditions contrôlées, selon leurs concentrations tissulaires initiales déterminées en présence d'aiguilles vertes et en l'absence d'aiguilles; et iv) caractériser les variables morphologiques et de nutrition minérale des plants du mélèze laricin, en relation avec le calendrier de fertilisation appliquée en pépinière.

2- Le mélèze laricin se distingue par sa large distribution dans les dix provinces et les trois territoires du Canada (Figure 1). Il pousse dans les stations froides, mouillées et mal drainées, comme les tourbières. Il préfère cependant les sols humides, légers et bien drainés, où il croît en mélange avec différentes essences (épinette noire, épinette blanche, peuplier faux-tremble, bouleau à papier, etc.) et peut former également des peuplements presque purs.

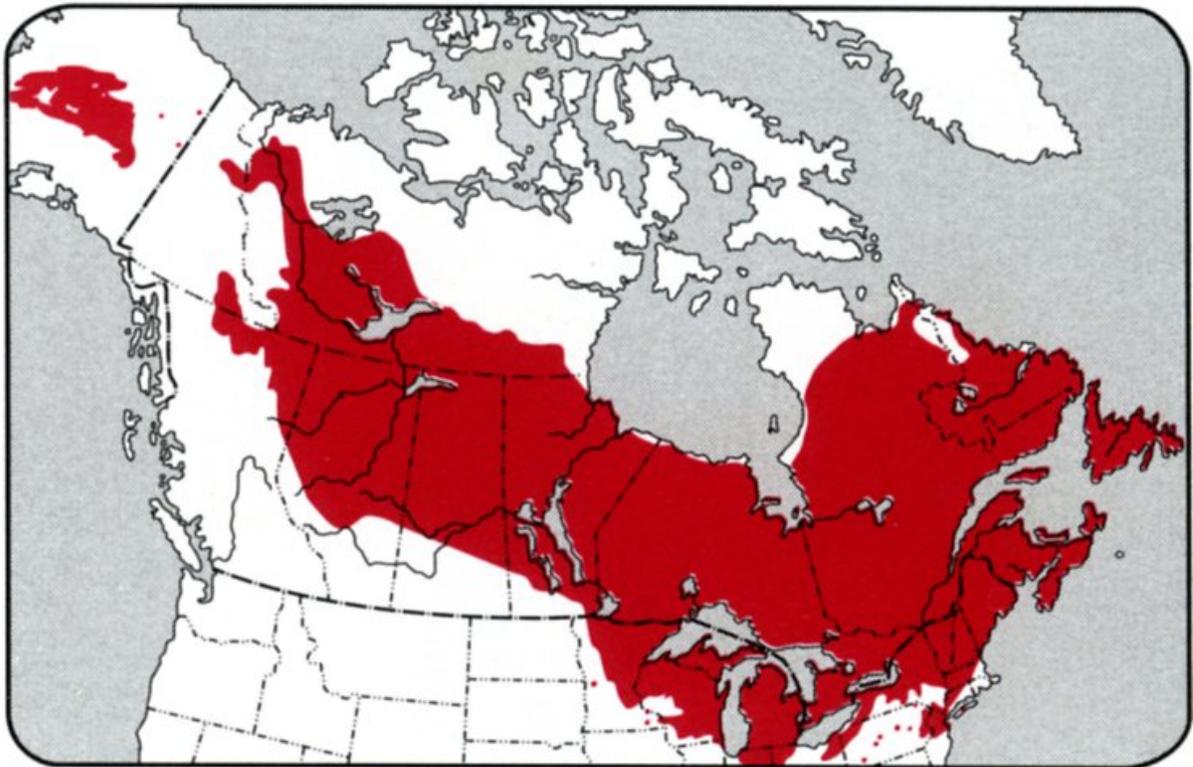


Figure 1. Aire de distribution du mélèze laricin au Canada (FARRAR 1999).

Au Québec, les plans d'ensemencement montrent que la production moyenne (2006-2010) des plants en récipients de mélèze laricin dans les pépinières forestières représente 1,1 % de la production annuelle totale (166 775 000 plants).

3- Pour répondre aux objectifs spécifiques à l'évaluation de la qualité des racines des plants de mélèze laricin (2+0) produits en récipients en pépinière forestière, différentes approches et analyses ont été effectuées, notamment une visite à la pépinière de Saint-Modeste, des examens approfondis des systèmes racinaires d'échantillons de plants issus de deux lots (2+0) de mélèze laricin (codes de culture : MO35MEL09-E77-A [15-320] et MO20MEL09-E76-A [36-200]), des analyses minérales du substrat, des aiguilles, des racines, des rameaux et des tiges, l'évaluation des variables de croissance des plants des deux lots, l'installation d'un dispositif expérimental pour évaluer la viabilité des racines et la capacité de régénération de nouvelles racines, un examen des calendriers de fertilisation et une revue de littérature.

4- Seuls les plants des deux lots qui ont montré à la fois une bonne colonisation de la carotte par les racines, et une bonne cohésion de la carotte, ont été utilisés dans cette étude. Cependant, l'examen du système racinaire de 90 plants produits dans le récipient 15-320, de même que 72 plants produits dans le récipient 36-200, a montré que les carottes sont colonisées de façon naturelle, et à différents degrés, par une diversité exceptionnelle de champignons ectomycorhiziens.



Figure 2. Exemple de colonisation des racines et des carottes par différents champignons ectomycorhiziens.

5- Le degré d'extension et de colonisation (EC) de la phase extramatricielle des champignons mycorhiziens des parties superficielles des carottes a été évalué selon différentes classes.

- Classe **A** : extension et colonisation de la phase extramatricielle sur plus de 75 % de la carotte ($\geq 75\%$);
- Classe **B** : Extension et colonisation de la phase extramatricielle : $50\% \leq EC < 75\%$;
- Classe **C** : Extension et colonisation de la phase extramatricielle : $25\% \leq EC < 50\%$;
- Classe **D** : Extension et colonisation de la phase extramatricielle : $< 25\%$;
- Classe **E** : Présence de mycorhizes et extension de la phase extramatricielle très réduite;
- Classe **F** : Absence de mycorhizes.

Pour faciliter l'évaluation de l'extension et de la colonisation de la phase extramatricielle, la carotte de chaque plant a été divisée en quatre sections. Des photos ont été prises sur des carottes représentatives des deux lots. Des observations sous binoculaire ont également été effectuées sur les racines et les ectomycorhizes. Plus de 70 % des carottes des deux lots ont été classées A ou B.

6- Une mycorhize est une association entre un organisme photosynthétique, ici des plants de mélèze laricin, et un champignon filamenteux. D'origine gréco-latine, le mot mycorhize signifie champignon-racine. Il existe plusieurs formes d'associations mycorhiziennes (voir livre de FORTIN *et al.* 2008). Dans le cas présent, il s'agit d'ectomycorhizes, qui se caractérisent par un mycélium ne se développant pas dans les cellules, mais entre celles-ci (Figure 3), et formant ce qu'on appelle le réseau de Hartig. Lorsqu'on fait des coupes longitudinales et transversales de racines mycorhizées, le réseau de Hartig est confiné à l'épiderme chez les feuillus. Par contre, dans le cas des résineux, il s'étend aussi bien entre les cellules de l'épiderme qu'entre les cellules corticales, sans toutefois dépasser l'endoderme (Figure 3). On remarque également la présence du manteau fongique (Figure 3, m) qui couvre une portion considérable des racines. Celui-ci joue à la fois un rôle de réservoir d'eau et de protection contre la dessiccation en période de sécheresse.

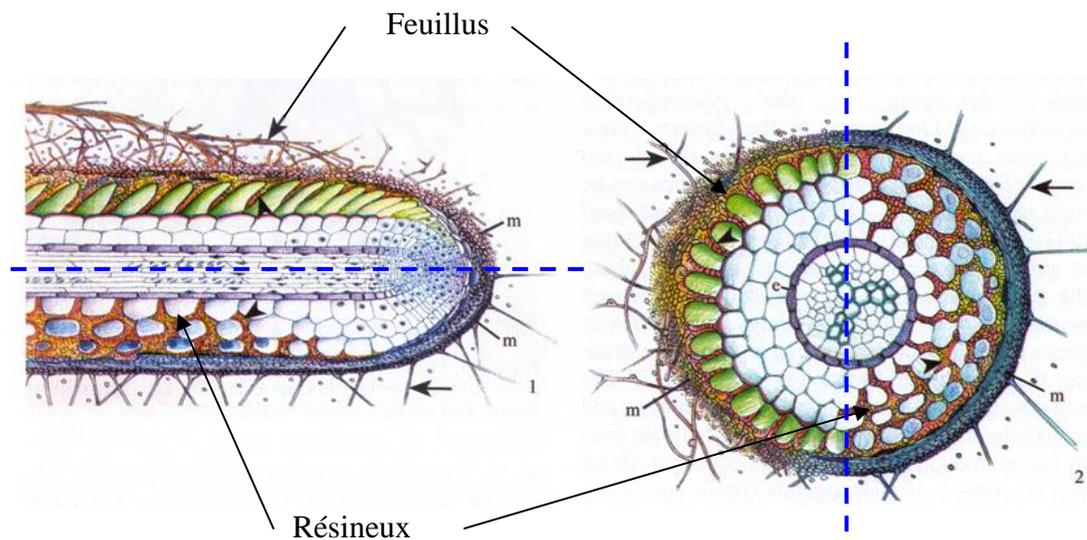


Figure 3. Coupes longitudinales et transversales schématisées de racines ectomycorhizées et comparaison des modalités de pénétration du mycélium entre les cellules des racines des essences feuillues (en haut pour [1] et à gauche pour [2]) et résineuses (en bas pour [1] et à droite pour [2]). m : manteau fongique. Source : PETERSON *et al.* 2004. Mycorrhizas : Anatomy and cell biology. NRC Research Press, Ottawa.

Ainsi, le réseau de Hartig constitue le lieu d'échange entre les deux partenaires (champignon et plant forestier). Lorsque le qualificateur des plants forestiers en pépinière forestière gratte des racines lors de l'évaluation de l'insuffisance racinaire (critère 01), il doit tenir compte de la complexité de cette structure fonctionnelle (couleur, etc.).

7- Les champignons ectomycorhiziens constituent une extension et une partie intégrante du système racinaire. La présence du champignon, notamment sa phase extramatricielle, constituée par des hyphes fins et des cordons mycéliens, augmente largement à la fois la longueur des racines (10 m / g de sol, soit plusieurs centaines de mètres à l'échelle d'un plant) et le nombre de points d'entrée (200 points d'entrée / mm de racine; 14,2 m / cm de racine). Les hyphes fins et les cordons mycéliens contribuent de façon significative à l'amélioration de la nutrition minérale et de l'alimentation hydrique des plants forestiers, aussi bien en pépinière qu'en site de reboisement. Ils peuvent pénétrer dans des micropores

du sol que les racines ne peuvent atteindre, contribuant ainsi à l'exploration d'un plus grand volume de substrat. Ceci permettra l'augmentation de la surface racinaire et l'accès à des quantités importantes d'eau et d'éléments minéraux peu mobiles. Par exemple, la zone d'épuisement du phosphore est de 1 mm autour des racines. À cet égard, les mycorhizes contribueront à absorber le phosphore du substrat plus loin en périphérie des racines, le rendant disponible à la plante. De cette façon, les mycorhizes constituent un allié de taille pour diminuer le lessivage des éléments minéraux et assurer une protection accrue de la qualité des eaux souterraines. Les mycorhizes libèrent également des substances antifongiques contre les agents pathogènes et constituent un moyen de lutte biologique. Ils libèrent aussi des substances de croissance qui contribuent à améliorer la croissance des racines et la résistance des plants contre différents stress environnementaux (sécheresse, etc.).

8- À l'inverse des autres essences, le mélèze laricin s'associe avec plusieurs espèces de champignons ectomycorhiziens, aussi bien en pépinière qu'en conditions naturelles, dont plusieurs sont spécifiques au mélèze. Ceux identifiés comme spécifiques au mélèze laricin (*Suillus grevillei*, *S. cavipes*, *Fuscoboletinus aeruginascens*, *F. spectabilis*, *F. paluster* et *F. grisellus*) montrent un développement ectomycorhizien beaucoup plus rapide et étendu (SAMSON 1987, SAMSON et FORTIN 1988). Pendant le vieillissement, les mycorhizes changent de couleur généralement du clair au foncé et l'état de la surface du manteau peut considérablement évoluer. L'abondance de la couleur foncée pourrait aussi être due à l'interaction de la diversité des substances libérées par les champignons ectomycorhiziens et celles qui existent dans la solution du substrat de façon naturelle ou suite aux régies de culture (substances libérées par les racines, fertilisation, produits chimiques, etc.). Nous n'avons pas observé la présence ou la colonisation des racines par le champignon ectomycorhizien *Cenococcum geophilum* de couleur noire.

9- La présence de certains champignons ectomycorhiziens spécifiques du mélèze, par exemple *Fuscoboletinus spectabilis*, confère aux racines une coloration foncée ou noire (Figures 11, 16, 17 et 18), surtout pendant la phase de vieillissement des mycorhizes. Ces dernières perdent alors leur manteau fongique externe de couleur blanche (Figures 17 et 18). De telles mycorhizes et de telles racines sont bien vivantes. En automne, lors de l'évaluation des lots de mélèze laricin, la proportion des racines foncées pourrait devenir forte, car il s'agit d'une période très active en matière de formation et de développement des mycorhizes (spécifiques et non spécifiques au mélèze). Cette période coïncide avec une phase de croissance active des racines, l'abondance des fructifications de champignons et la diminution des apports de fertilisants. Au printemps, après la fonte nivale et la perte des manchons fongiques, la proportion des racines foncées chez le mélèze laricin pourrait devenir encore plus importante. En effet, les racines des mélèzes sont lavées par la fonte nivale, deviennent relativement lisses et la couleur foncée des racines devient plus prononcée. Lorsque les conditions sont favorables, le mycélium qui se trouve à l'intérieur de la racine (réseau de Hartig, Figures 3 et 19) permettra, lors de la reprise des plants, le développement de nouveaux manteaux externes, des hyphes et des cordons mycéliens. Ceci permettra de rétablir le contact avec les particules du sol et de coloniser les racines courtes nouvellement formées.

10- À la pépinière de Saint-Modeste, la colonisation exceptionnelle des racines de mélèze laricin par plusieurs espèces de champignons ectomycorhiziens se fait naturellement (Figure 4). La mycorhization peut provenir des pluies de spores issues des peuplements

proches de la pépinière, du substrat et de l'environnement de la pépinière. La phase extramatricielle du champignon ectomycorhizien, constituée par des hyphes fins et des cordons mycéliens, améliore la structure du substrat (mode d'arrangement des agrégats) et la cohésion de la carotte.

Cette phase extramatricielle constitue une extension et un prolongement du système racinaire. Dans certains pays, l'inoculation artificielle des plants par des champignons mycorhiziens figure parmi les techniques culturales recommandées pour améliorer la qualité des plants et leur conférer une tolérance accrue aux stress environnementaux (augmentation du taux de survie dans des sites miniers, sécheresse, etc.). Cette inoculation contribue même à l'augmentation du coût de production de plants forestiers en pépinière forestière. Ceci ne signifie pas qu'on recommande aux pépiniéristes du Québec de recourir à l'inoculation artificielle des plants en pépinière forestière.



Figure 4. Colonisation de la carotte et des racines du mélèze laricin par des champignons ectomycorhiziens.

La colonisation naturelle des racines des plants, en pépinière, par des champignons ectomycorhiziens très diversifiés et adaptés aux conditions écologiques du Québec, constitue donc un moyen de conservation et d'introduction de la biodiversité dans les sites pauvres et dépourvus de champignons ectomycorhiziens (landes, site agricole, sol décapé, etc.). Toutefois, leur présence dans les racines ne peut pas se maintenir jusqu'à l'âge de maturité du peuplement, car il existe une succession de champignons en fonction des stades de croissance et de développement des peuplements forestiers. Par ailleurs, la colonisation des racines et le développement de fructifications de champignons ectomycorhiziens a un coût énergétique important, car il y a une allocation de quantités considérables des produits de la photosynthèse vers le champignon, qui ne seront pas allouées à la croissance des racines. Malgré cette compétition intense entre le champignon et la plante hôte, il n'est pas recommandé d'utiliser des produits chimiques en pépinière forestière (fertilisants riches en phosphore, pesticides, etc.) pour éliminer la présence et la colonisation naturelle des racines des plants par des champignons ectomycorhiziens.

11- Les champignons ectomycorhiziens ne peuvent pas se développer sans la présence de racines viables d'une plante hôte. Les ectomycorhizes, ainsi que leurs fructifications, ne se développeront pas si les racines du mélèze laricin sont non fonctionnelles ou si elles sont mortes. La présence des ectomycorhizes et des fructifications est donc un excellent indicateur qui certifie, hors de tout doute, la viabilité du système racinaire, quelle que soit sa couleur, brune ou foncée (voir figures et photos à la fin de ce résumé). Cette présence confirme, du même coup, l'optimisation de la régie de fertilisation lors du développement racinaire à l'automne, et la protection de l'environnement contre la pollution par les fertilisants.

Lors de la qualification de l'insuffisance racinaire (critère 01) et en présence d'une colonisation de la carotte et des racines (> 50 %) du plant de mélèze laricin par le champignon ectomycorhizien, l'évaluateur ne doit pas juger de leur viabilité en grattant les racines (Figures 7, 11, 16, 17 et 18). La présence de racines nécrosées est tout à fait naturelle et indique la mortalité naturelle des racines courtes. Dans le cas des mélèzes et à cause de sa spécificité de certains champignons ectomycorhiziens qui augmentent la proportion de racines foncées et viables, la couleur des racines ne doit pas être utilisée comme critère pour leur qualification (Figures 7, 11, 16, 17 et 18). À cet égard, dans le cadre d'une visite de plantation de mélèze à la Tuque, BART et TOURIGNY (2010) ont observé que, pour un lot donné, 24 % des plants de mélèze ont présenté des racines foncées, plus ou moins nécrosées sous un niveau de 33 %, qui est le niveau établi pour que ces plants soient rejetés.

12- La présence de mycorhizes, surtout l'extension de la phase extramatricielle, doit être considérée comme une compensation au manque de racines. Donc, lors de l'évaluation du critère (01), il faut tenir compte non seulement de la colonisation de la carotte par les racines, mais également du degré de colonisation de la carotte par les champignons ectomycorhiziens. La littérature scientifique considère que la colonisation des racines par des mycorhizes (> 50 %) confère aux plants une qualité supérieure (croissance, survie, etc.). Lors de la qualification du critère (01) des racines du mélèze en automne, il faudrait ajouter un critère qui tient compte de la colonisation des racines par les ectomycorhizes, pour éviter de tomber dans le piège de rejeter le lot des plants à cause de l'augmentation de l'abondance des racines foncées lors de la qualification printanière. Cependant, les plants qui ne montrent pas une bonne cohésion de la carotte, même s'ils sont mycorhizés, doivent être rejetés.

13- Pour les deux lots de plants produits dans les deux récipients à la pépinière de Saint-Modeste, les variables de croissance des plants de mélèze sont indiquées dans la figure 20, alors que les concentrations des éléments minéraux dans les différentes parties des plants des deux lots (20 septembre et 17 novembre 2010) sont synthétisées dans la figure 21. À la mi-novembre, il ressort que les concentrations en azote des parties aériennes des plants (absence d'aiguilles) produits dans le récipient 36-200 ([N] = 1,61 %) étaient presque le double de celles des parties aériennes du récipient 15-320 ([N] = 0,86 %). Ces différences de concentrations sont le résultat des différences observées dans les calendriers de fertilisations (Figures 22 et 23) entre les deux types de cultures. Ainsi, les plants en récipients 36-200 ont montré un débourrement hâtif et plus rapide par rapport aux plants en récipients 15-320 (Figure 23). Ces différences de concentrations pourraient affecter l'initiation et le développement de nouvelles racines. Ces différents points seront examinés ultérieurement, après échantillonnage des plants actuellement en croissance en serre (Figure 23).

Plants de mélèze laricin produits dans le récipient 15-320



Figure 5. État général du lot de plants du mélèze laricin produit dans le récipient 15-320. Seuls les plants ayant montré une bonne cohésion de la carotte ont été utilisés dans notre étude. Remarquez la colonisation des carottes de plusieurs plants avec des champignons ectomycorhiziens.



Figure 6. Carotte colonisée uniquement par des racines de couleur brune en l'absence de colonisation par des champignons ectomycorhiziens



Figure 7. La flèche bleue indique clairement l'initiation d'un petit renflement rouge et plus clair à l'extrémité d'une racine noire. Le cercle jaune indique l'extension de la phase extramatricielle en présence de racines noires et d'une densité faible de racines. Or, la présence du champignon ectomycorhizien ou l'extension de la phase extramatricielle devrait être considéré comme une partie intégrante du système racinaire. La colonisation de la carotte (> 50 %) par des champignons ectomycorhiziens doit être prise en compte dans l'évaluation de la qualité du système racinaire (critère 01). La présence de mycorhizes, surtout l'extension de la phase extramatricielle, doit être considérée comme une compensation au manque de racines. Donc, lors de l'évaluation du critère (01), il faut tenir compte non seulement de la colonisation de la carotte par les racines, mais également du degré de la colonisation de la carotte par les champignons ectomycorhiziens. La littérature scientifique considère que la colonisation des racines par des mycorhizes (> 50 %) confère aux plants une qualité supérieure.



Figure 8. L'ellipse verte indique la couleur des racines brunes dans une portion de la carotte qui n'est pas encore colonisée par le champignon ectomycorhizien, aussi caractérisée par l'absence d'initiation de racines courtes. Le cercle jaune indique un développement très dense des hyphes fins du champignon ectomycorhizien et une initiation très abondante de racines courtes. Les champignons ectomycorhiziens secrètent des hormones de croissance (auxines) qui améliorent la croissance des racines. Les hyphes fins peuvent pénétrer dans les micropores du substrat pour chercher l'eau et les éléments minéraux où les racines ne peuvent accéder.



Figure 9. Colonisation séparée des racines du mélèze laricin et de la carotte par différentes espèces de champignons ectomycorhiziens, qui se différencient par la couleur et du degré d'extension de leur phase extramatricielle. Chaque section de la carotte est colonisée majoritairement par un seul champignon (*Piloderma bicolor* : couleur jaune des ectomycorhizes et des hyphes, *Laccaria bicolor* : couleur blanche des ectomycorhizes et des hyphes).



Figure 10. Colonisation simultanée des racines du mélèze laricin et de la carotte par différentes espèces de champignons ectomycorhiziens, qui se différencient par la couleur et du degré d'extension de la phase extramatricielle. Remarquez la présence de mycorhizes et des cordons mycéliens blancs de gros diamètre.



Système racinaire d'un plant de mélèze laricin **non mycorhizé** et lavé. Notez l'abondance de racines brunes et l'absence de racines noires foncées

Système racinaire de mélèze laricin **mycorhizé** et lavé. Notez l'abondance de racines noires foncées (> 33%)

Figure 11. Le système racinaire non mycorhizé (à gauche) a une couleur brune normale, alors que les racines mycorhizées du plant (à droite) ont une couleur noire (foncée). Le plant de droite porte encore des racines courtes mycorhizées. À l'inverse des autres essences, le mélèze laricin s'associe avec plusieurs espèces de champignons ectomycorhiziens aussi bien en pépinière qu'en conditions naturelles, dont plusieurs sont spécifiques au mélèze en conditions naturelles. Pendant le vieillissement, les mycorhizes changent de couleur, généralement du clair au foncé, et l'état de surface du manteau peut considérablement évoluer. L'abondance de couleur foncée ou noire de racines pourrait aussi être due à l'interaction de la diversité des substances libérées par les champignons ectomycorhiziens et celles qui existent dans la solution du substrat de façon naturelle ou suite aux régies de culture (substances libérées par les racines, fertilisation, produits chimiques, etc.).

Plants de mélèze laricin produits dans le récipient 36-200

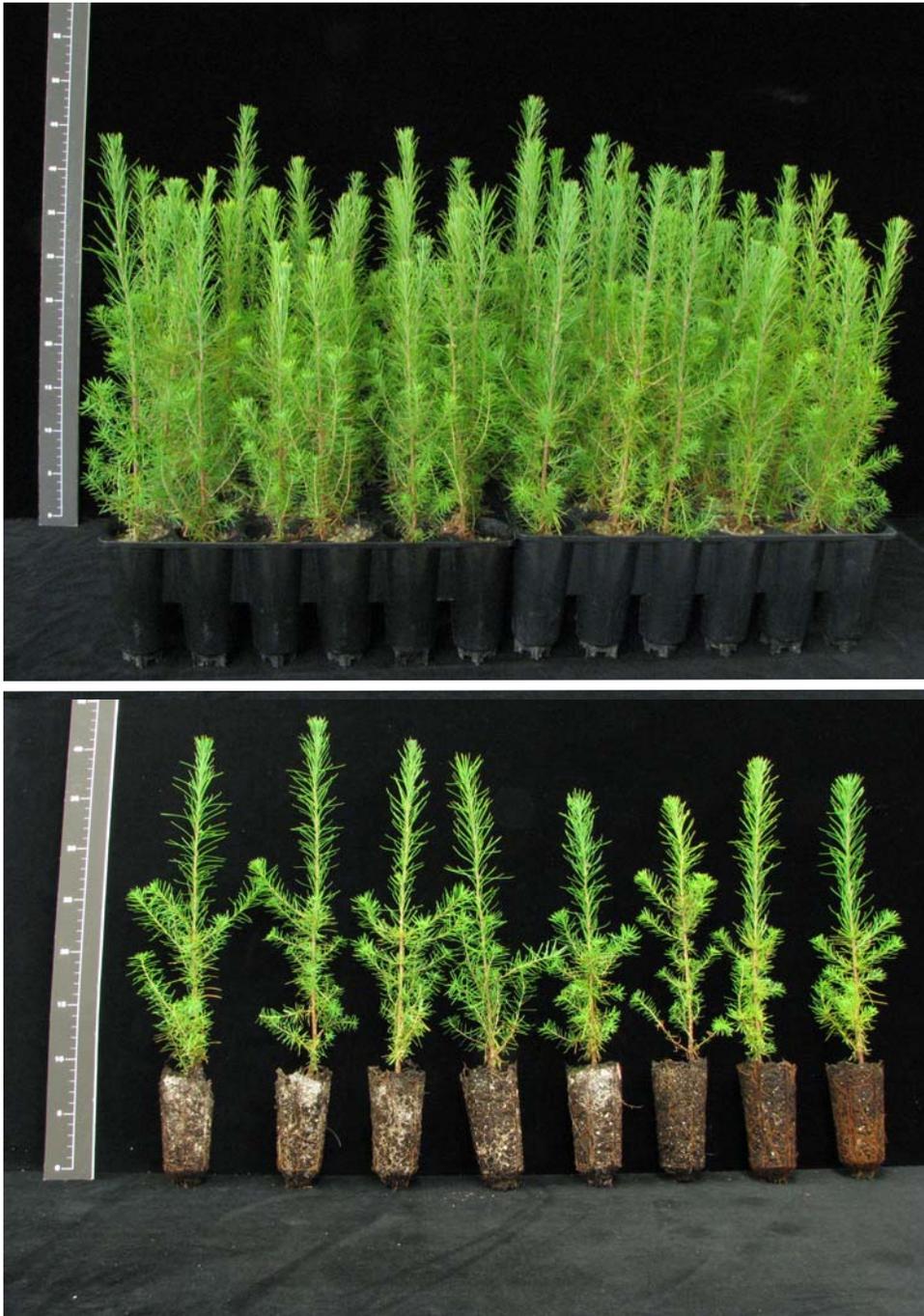


Figure 12. État général du lot de plants du mélèze laricin produit dans le récipient 36-200. Seuls les plants ayant montré une bonne cohésion de la carotte ont été utilisés dans notre étude.

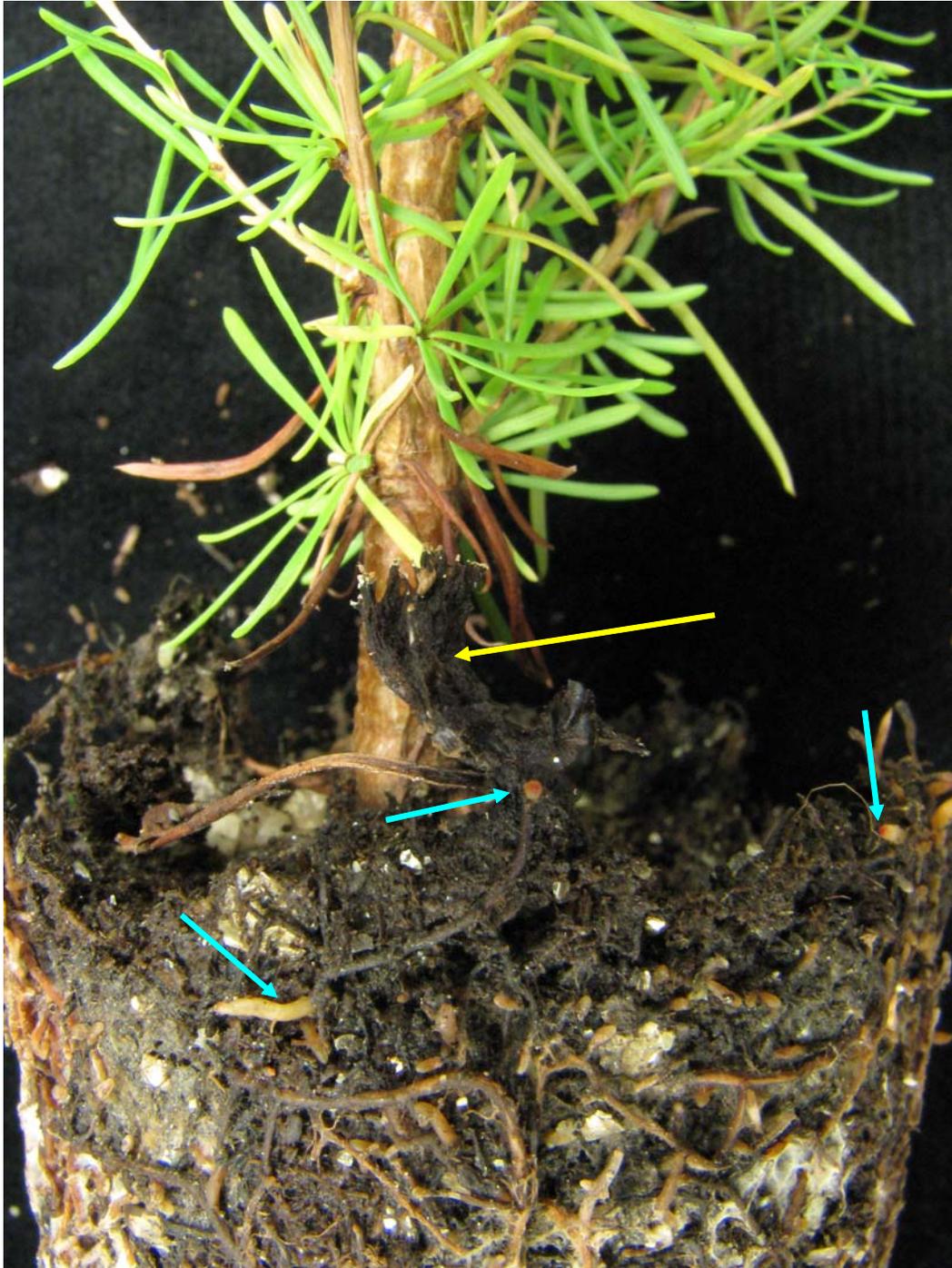


Figure 13. Les flèches bleues montrent clairement l'initiation de nouvelles racines courtes vivantes à partir de racines noires ou foncées (petits renflements rouges et plus clairs). Ceci confirme que les racines de couleur foncée ou noire ne sont pas mortes. La flèche jaune indique la présence d'une fructification du champignon ectomycorhizien *Telephora terrestris*.



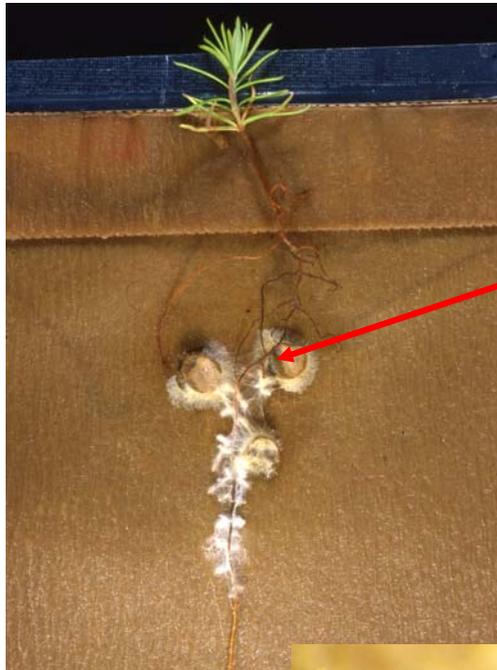
Figure 14. Les flèches bleues montrent clairement la colonisation des racines courtes par un champignon ectomycorhizien. Ces racines prennent leur origine de racines noires (foncées). Ceci confirme que les racines noires ne sont pas mortes. La flèche verte indique la formation et l'abondance de la présence des cordons mycéliens.



Figure 15. Les flèches bleues montrent clairement la viabilité des apex des racines noires ou foncées. Notez que la présence de ces apex de couleur blanche sont initiées à partir de racines noires presque superficielles non couvertes par du substrat. Ceci confirme donc que les racines de couleur foncée ne sont pas mortes. Les flèches vertes indiquent également l'initiation de jeunes carpophores de *Laccaria bicolor*. Le développement et la croissance de ces derniers sont intimement liés aux produits de la photosynthèse courante. Si les racines sont mortes ou ne sont pas fonctionnelles, ces carpophores ne peuvent pas se développer. Les flèches rouge et jaune indiquent respectivement la présence de cordons mycéliens et d'hyphes fins. La phase extramatricielle du champignon ectomycorhizien, constituée par des hyphes fins et des cordons mycéliens, améliore la structure du substrat (mode d'arrangement des agrégats) et la cohésion de la carotte. Cette phase extramatricielle constitue une extension et un prolongement du système racinaire.



Figure 16. Le système racinaire (à gauche) non mycorhizé a une couleur brune normale alors que les racines mycorhizées ont une couleur noire ou foncée. Le plant complètement à droite porte encore des racines courtes mycorhizées. À l'inverse des autres essences, le mélèze laricin s'associe avec plusieurs espèces de champignons ectomycorhiziens, aussi bien en pépinière qu'en conditions naturelles. Cependant, en conditions naturelles, il existe plusieurs espèces de champignons ectomycorhiziens spécifiques au mélèze. Pendant le vieillissement, les mycorhizes changent de couleur, généralement du clair au foncé, et l'état de surface du manteau peut considérablement évoluer. Un point important à considérer concerne l'interaction potentielle de la diversité des substances libérées par les champignons ectomycorhiziens et celles qui existent dans la solution du substrat de façon naturelle ou suite aux régies de culture (fertilisation, produits chimiques, etc.) sur la couleur des racines.



Pastille du champignon ectomycorhizien
Fuscoboletinus spectabilis

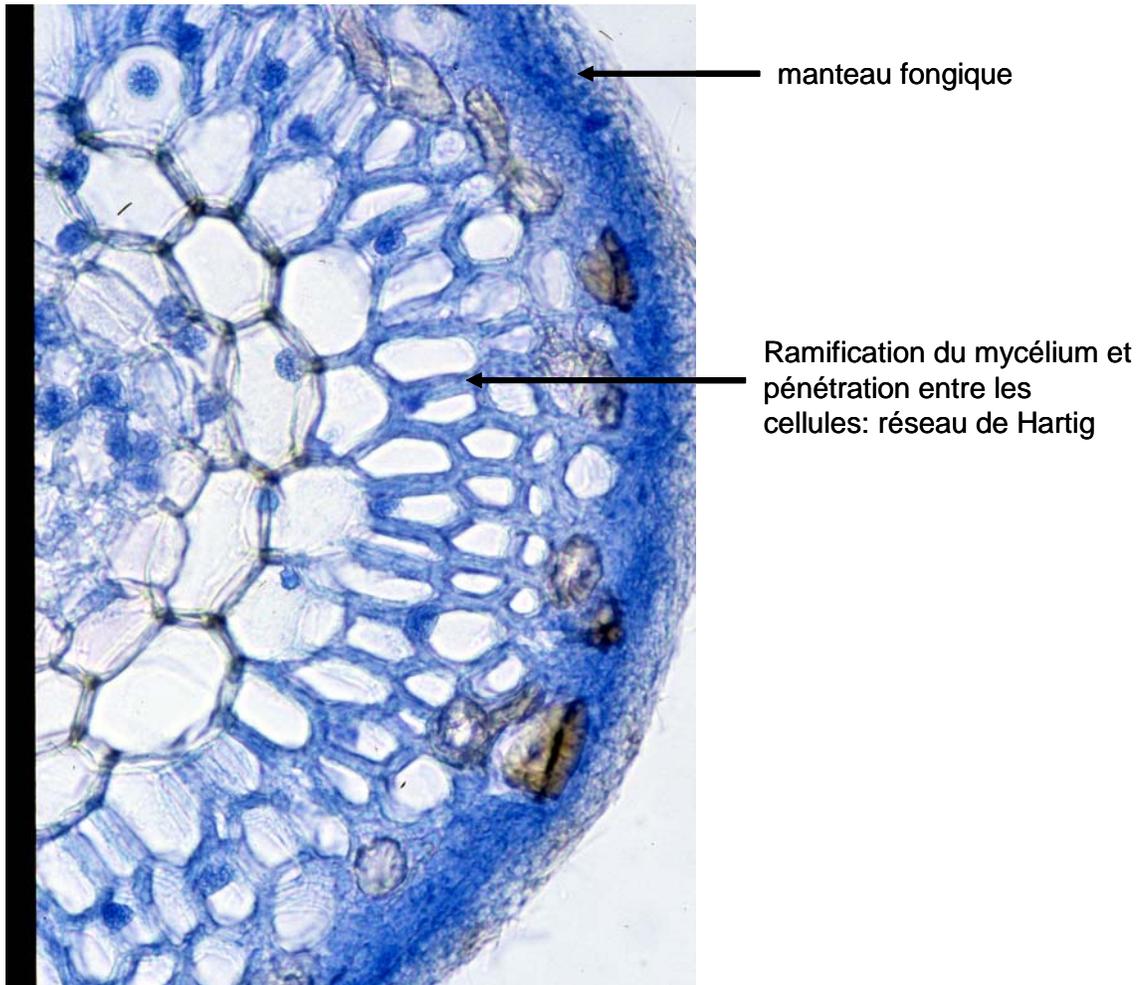


Source : Photos prises dans le cadre de la maîtrise de Julie Samson, 1987. *Les symbioses ectomycorhiziennes chez le mélèze laricin*. Thèse de maîtrise. Université Laval, Québec. 67 p.

Figure 17. La photo en haut montre une inoculation artificielle du mélèze laricin par un champignon ectomycorhizien *Fuscoboletinus spectabilis* en laboratoire, en utilisant la technique du sachet de croissance. La photo en bas montre que lors du vieillissement, les mycorhizes perdent leur manteau fongique externe de couleur blanche (flèche verte) et deviennent noires. Il s'agit d'une spécificité de ce champignon. De telles mycorhizes et de telles racines sont bien vivantes.



Figure 18. Observations effectuées sous binoculaire de racines mycorhizées du mélèze laricin, montrant différents stades de leur évolution (pépinière Saint-Modeste). La flèche jaune indique une mycorhize jeune nouvellement formée de *Fuscoboletinus spectabilis*, la flèche bleue indique un début de perte du manchon fongique de couleur blanche, combiné à un changement de couleur. Les flèches vertes montrent la perte totale des manchons fongiques et la coloration noire. Ces mycorhizes et ces racines sont bien vivantes et le mycélium du champignon s'étend aussi bien dans les cellules de l'épiderme que corticales, sans pénétrer dans l'endoderme, pour former le réseau de Hartig. En automne, lors de l'évaluation des lots de mélèze laricin, la proportion des racines foncées pourrait être faible. Par contre, au printemps et après la fonte nivale et la perte des manchons fongiques, la proportion des racines noires devient plus importante.



Source : Julie Samson, 1987. *Les symbioses ectomycorhiziennes chez le mélèze laricin*. Thèse de maîtrise. Université Laval, Québec. 67 p.

Figure 19. Coupe transversale d'une ectomycorhize chez le mélèze laricin.

**Variables de croissance, nutrition minérale et
calendriers de fertilisation des deux lots
de plants de mélèze laricin**

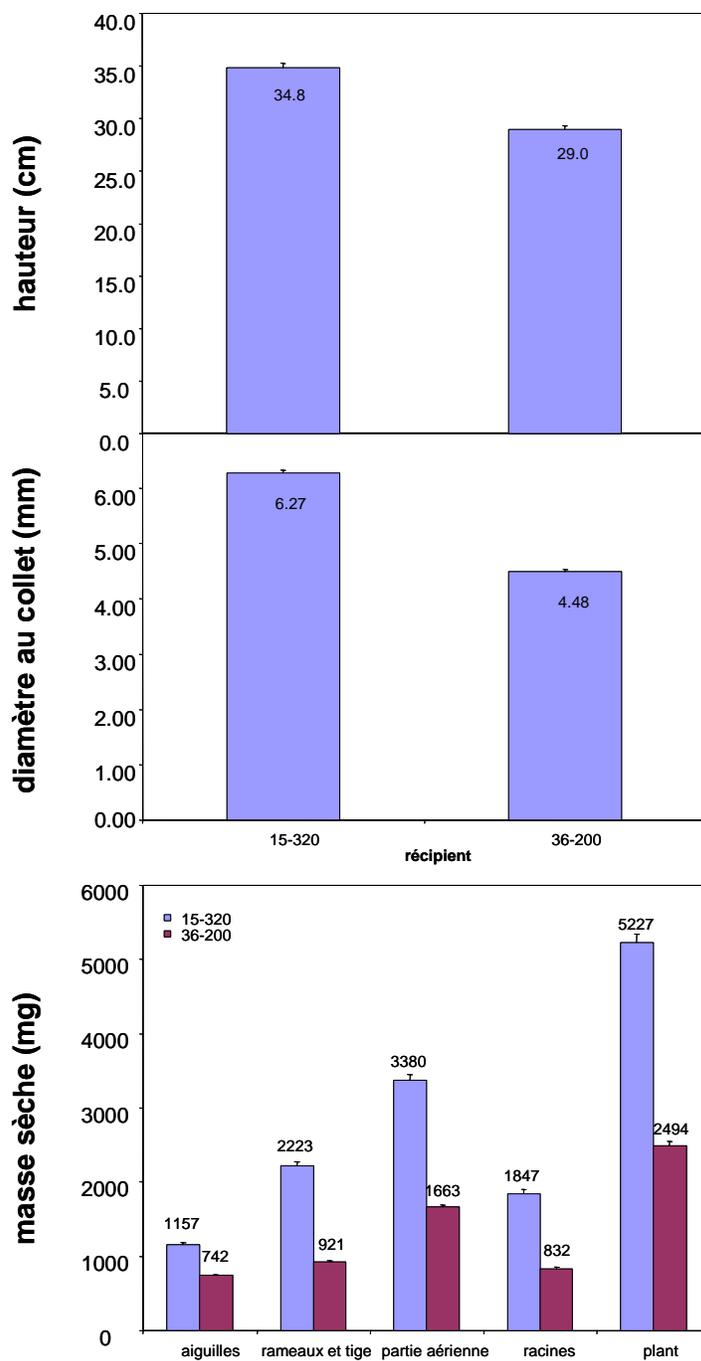


Figure 20. Variables de croissance des plants des deux lots de mélèze laricin produits dans les récipients 15-320 ($n = 90 \pm$ erreur standard) et 36-200 ($n = 72 \pm$ erreur standard) à la pépinière de Saint-Modeste (20 septembre 2010).

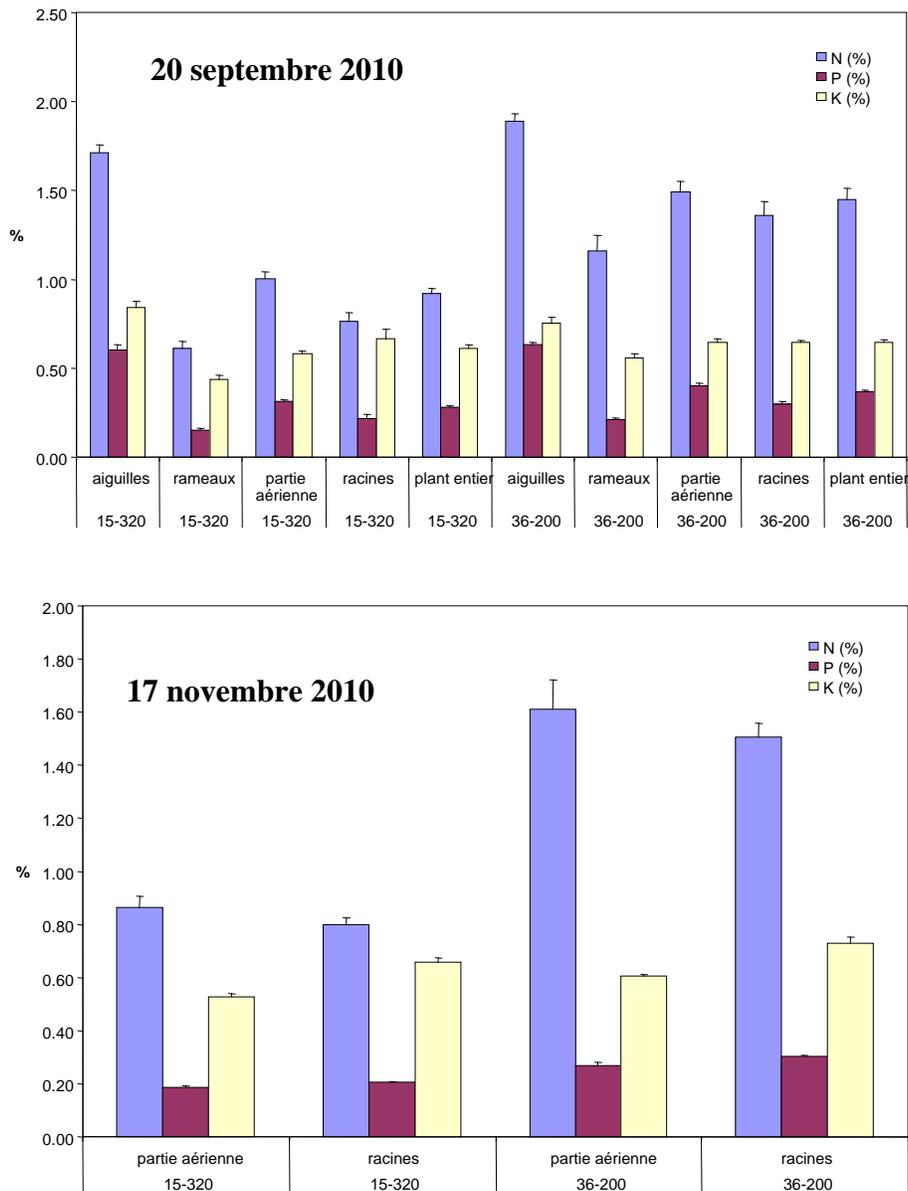


Figure 21. Concentrations des éléments minéraux (%; N, P et K) dans les différentes parties des plants des deux lots de mélèze laricin produits dans les récipients 15-320 et 36-200 à la pépinière de Saint-Modeste (20 septembre : n = 6 échantillons composites, échantillon composite = 3 à 9 plants et 17 novembre 2010 : n = 3 échantillons composites, échantillon composite = 5 plants).

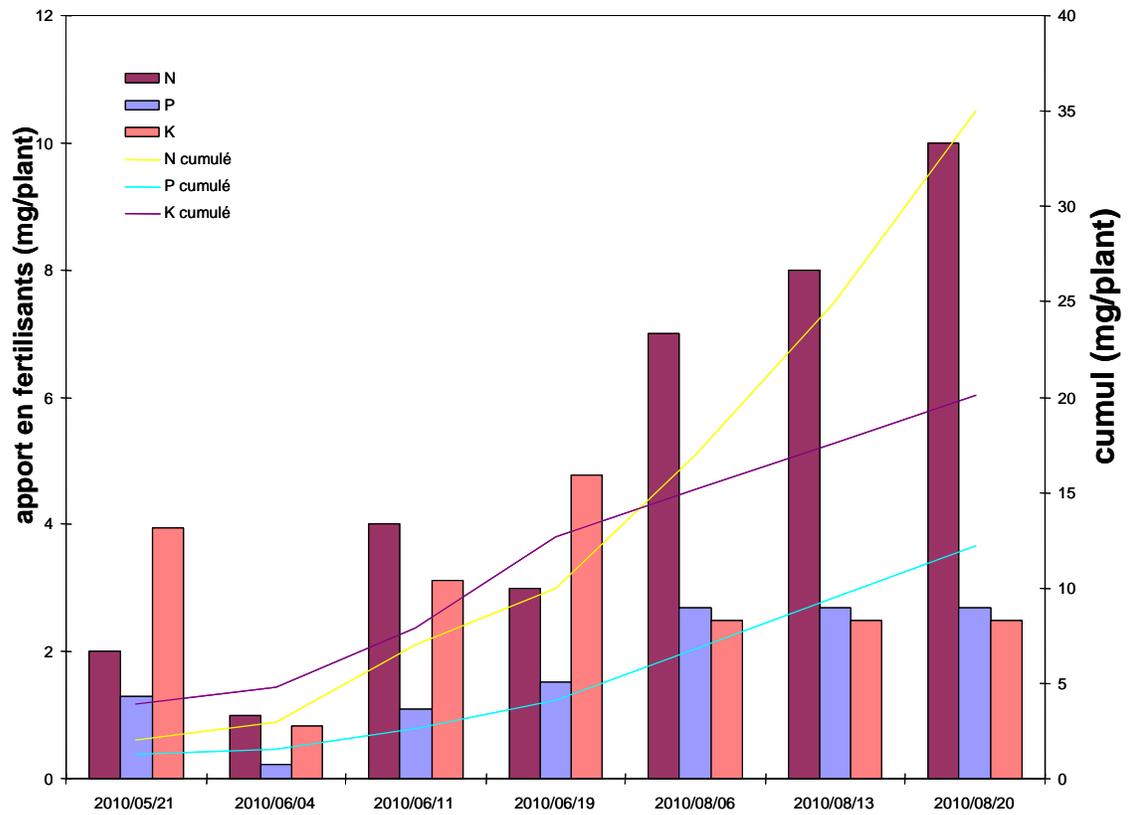


Figure 22. Apports en éléments minéraux (N, P et K) lors des fertilisations et leurs quantités cumulatives appliquées tout au long de la saison de croissance (2+0) des plants de mélèze laricin produits dans les récipients 15-320 à la pépinière de Saint-Modeste.

Capacité des plants de mélèze laricin à régénérer de nouvelles racines en conditions contrôlées



Figure 23. Dispositif expérimental installé en serre (17 novembre 2010) pour évaluer la qualité des plants et la viabilité des racines des deux lots des plants de mélèze laricin produits dans les réceptients 15-320 et 36-200 à la pépinière de Saint-Modeste. Remarquez la différence de débourrement et de vigueur des parties aériennes entre les deux lots.

Références bibliographiques

- BART, F. et M. TOURIGNY, 2010. *Dispositifs du groupe Triade en zone de sylviculture intensive*. Rapport de visite du 16 septembre à la Tuque. 4 p.
- BRUNDRETT, M., N. BOUGHER, B. DELL, T. GROVE et N. MALAJCZUK, 1996. *Working with mycorrhizas in forestry and agriculture*. ACIAR Monograph 32. Australian Centre for International Agricultural Research, Canberra, Australia. 374 p.
- CASTELLANO, M.A., 1996. *Outplanting performance of mycorrhizal inoculated seedlings*. Dans : *Concepts in Mycorrhizal Research*. Mukerji, K.G. (éditeur). Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands. p. 223-301.
- CASTELLANO, M.A. et R. MOLINA, 1989. Mycorrhizae. Dans : *The container tree nursery manual, volume 5*. Landis, T.D., R.W. Tinus, S.E. McDonald et J.P. Barnett (éditeurs). Agric. Handbook, n° 674. Washington D.C.: U.S. Department of agriculture, Forest Service. p. 101-167.
- FARRAR, J.L., 1999. *Les arbres du Canada*. Fides et Service Canadien des Forêts, Canada. 502 p.
- FORTIN, J.A. et M.S. LAMHAMEDI, 2009. *Ecophysiology of sporocarp development of ectomycorrhizal basidiomycetes associated with boreal forest gymnosperms*. Dans : *Advances in mycorrhizal science and technology*. Khasa, D., Y. Piché et A.P. Coughlan (éditeurs). NRC Research Press, Canada. p. 161-173.
- FORTIN, J.A., C. PLENCHETTE et Y. PICHÉ, 2008. *Les mycorrhizes : La nouvelle révolution verte*. Éditions multiMondes, Éditions Quae, Québec, Canada. 131 p.
- 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*. Rev. Can. Rech. For. 17 : 840-945.
- GAGNON, J., C.G. LANGLOIS et J.A. FORTIN, 1988. *Growth and ectomycorrhiza formation of containerized black spruce seedlings in function of nitrogen fertilization, inoculation type and symbiont*. Rev. Can. Rech. For. 18 : 922-929.
- GODBOUT, C. et J.A. FORTIN, 1990. *Cultural control of basidiome formation in Laccaria bicolor with container-grown white pine seedlings*. Mycol. Res. 94 : 1051-1058.
- GODBOUT, C. et J.A. FORTIN, 1992. *Effects of nitrogen fertilization and photoperiod on basidiome formation of Laccaria bicolor associated with container-grown jack pine seedlings*. Rev. Can. Bot. 70 : 181-185.
- HÖGBERG, P., A. NORDGREN, N. BUCHMANN, A.F.S. TAYLOR, A. EKBLAD, M.N. HÖGBERG, G. NYBERG, D. OTTOSSON-LÖFVENIUS et D.J. READ, 2001. *Large-scale forest girdling show that current photosynthesis drives soil respiration*. Nature 411 : 789-792.

- LAMHAMEDI, M.S., 1991. *Variabilité génétique de Pisolithus sp en relation avec le stress hydrique chez Pinus pinaster*. Thèse de doctorat. Université Laval, Québec. 120 p.
- LAMHAMEDI, M.S. et J.A. FORTIN, 1991. *Genetic variations of ectomycorrhizal fungi: extramatrical phase of Pisolithus sp*. Rev. Can. Bot. 69 : 1927-1934.
- LAMHAMEDI, M.S., M. ABOUROUH, et J.A. FORTIN, 2009. *Technological transfer: The use of ectomycorrhizal fungi in conventional and modern forest tree nursery in northern Africa*. Dans : *Advances in mycorrhizal science and technology*. Khasa, D., Y. Piché et A.P. Coughlan (éditeurs). NRC Research Press, Canada. p. 139-152.
- LAMHAMEDI, M.S., P.Y. BERNIER et J.A. FORTIN, 1992a. *Growth, nutrition and water stress tolerance of Pinus pinaster inoculated with ten dicaryotic strains of Pisolithus sp*. Tree Physiol. 10 : 153-167.
- LAMHAMEDI, M.S., P.Y. BERNIER et J.A. FORTIN. 1992b. *Hydraulic conductance and soil water potential at the soil-root interface of Pinus pinaster seedlings inoculated with different dikaryons of Pisolithus sp*. Tree Physiol. 10 : 231-244.
- 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., C. GODBOUT et J.A. FORTIN, 1994. *Dependence of Laccaria bicolor fruit body development on current photosynthesis of Pinus strobus seedlings*. Rev. Can. Rech. For. 24 : 1797-1804.
- LAMHAMEDI, M.S., B. FECTEAU, L. GODIN et C. GINGRAS. 2006. *Guide pratique de production en hors sol de plants forestiers, pastoraux et ornementaux en Tunisie*. ISBN 9973-914-08-2. 88 p (+ Annexes).
- 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.
- PETERSON, R.L., H. MASSICOTTE et L.H. MELVILLE, 2004. *Mycorrhizas : Anatomy and cell biology*. NRC Research Press, Ottawa. 177 p.
- READ, D.J., J.R. LEAKE et J. PEREZ-MORENO, 2004. *Mycorrhizal fungi as drivers of ecosystem processes in heathland and boreal forest biomes*. Rev. Can. Bot. 82 : 1243-1263.
- SAMSON, J., 1987. *Les symbioses ectomycorhiziennes chez le mélèze laricin*. Thèse de maîtrise. Université Laval, Québec. 67 p.
- SAMSON, J. et J.A. FORTIN, 1988. *Structural characterization of Fuscoboletinus and Suillus ectomycorrhizae synthesized on Larix laricina*. Mycologia 80(3) : 382-392.