

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À CHICOUTIMI

**DÉVELOPPEMENT DU SYSTÈME RACINAIRE ADVENTIF DE L'ÉPINETTE NOIRE
EN LIEN AVEC L'ENFOUISSEMENT DE LA TIGE**

PAR

RICHARD LAURIN

B.SC (BIOLOGIE)

MÉMOIRE PRÉSENTÉ
À L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À CHICOUTIMI
COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN RESSOURCES RENOUVELABLES

DÉCEMBRE 2013

Résumé

L'objectif de cette étude était de vérifier si l'enfouissement de la tige lors de l'établissement d'une plantation favorise un développement plus précoce du système racinaire adventif chez l'épinette noire. Il visait également à vérifier si ce développement plus rapide des racines adventives permet une croissance plus élevée et une réduction du stress hydrique. Trois méthodes de mise en terre ont été comparées quant à leurs effets sur les paramètres de croissance, soit la méthode enfouie, pré-enfouie et standard. Dans la méthode standard, les semis sont plantés de façon à ce que le niveau du collet, c'est-à-dire l'interface entre la tige et la partie racinaire, se retrouve au niveau du sol. Dans la méthode enfouie, les semis ont été plantés de façon à ce qu'une partie de la tige se retrouve sous le niveau du sol au moment de la mise en terre en forêt alors que dans la méthode pré-enfouie, la tige des semis avait été préalablement enfouie dans le substrat lors de la culture en serre. Deux types de substrats liés au microsite de plantation ont également été étudiés, soit le substrat minéral et organique. Un échantillonnage d'épinettes noires provenant d'une plantation expérimentale dans le secteur de Chapais, près de Chibougamau, a été réalisé après 10 et 15 années de croissance. Les paramètres mesurés étaient la taille de la tige et la croissance aérienne, le développement du système racinaire, la capacité photosynthétique et le statut hydrique. Un développement plus important du système racinaire adventif par rapport au système racinaire initial a été observé chez les plants enfouis et pré-enfouis. Toutefois, la méthode de mise en terre n'a pas influencé la croissance aérienne de l'épinette noire. Le statut hydrique et la capacité de photosynthèse n'ont également pas été influencés par la méthode de mise en terre. Par conséquent, bien que l'enfouissement du collet ait modifié le développement du système racinaire, cela n'a pas favorisé le statut hydrique, la capacité photosynthétique ni la croissance de l'épinette noire en plantation. Bien que l'enfouissement du collet et la modification de la structure du système racinaire qui en a résulté n'ait pas favorisé la croissance aérienne, il n'a également eu aucun effet nuisible sur les épinettes.

Remerciements

Je tiens d'abord à remercier ma directrice, Cornelia Krause et ma co-directrice, Annie DesRochers, qui ont démontré une généreuse disponibilité pour m'aider et qui m'ont bien dirigé tout le long de mon cheminement. Je tiens également à remercier Line Blackburn, qui a été d'un soutien immense pour réaliser l'échantillonnage sur le terrain, Pierre-Yves Plourde, qui m'a beaucoup aidé pour la logistique et Marc Mazerolle, qui m'a très bien conseillé en ce qui concerne les statistiques. Je remercie également Daniel Gagnon et Jacques Allaire pour le partage de leurs connaissances et leurs conseils concernant l'identification des échantillons et les mesures, ainsi que Maxime Larouche, Isabelle Grenon, Benoît Allaire et René Samson pour l'échantillonnage et la préparation terrain. Finalement, je tiens à remercier le Fond de Recherche Nature et Technologies Québec (FQRNT) pour leur soutien financier au projet.

Table des Matières

Résumé	ii
Remerciements	iii
Table des Matières	iv
Liste des Tableaux.....	v
Liste des Figures.....	vii
Liste des Annexes.....	viii
Introduction	1
Problématique.....	1
Objectifs	4
Matériel et Méthodes.....	5
Mesures aériennes	10
Mesure des racines	11
Analyses statistiques.....	15
Résultats	17
Partie aérienne	17
Système racinaire	21
Paramètres physiologiques	27
Discussion	30
Limites de l'étude.....	33
Conclusion.....	33
Références	35
Annexes.....	40

Liste des Tableaux

Tableau 1 : Sommaire des mesures effectuées sur les tiges des épinettes noires échantillonnées en 2006 et 2011.....	10
Tableau 2 : Analyse de variance linéaire mixte du log de la hauteur de la tige par rapport à la méthode de mise en terre et le type de substrat pour les années d'échantillonnages 2006 et 2011.	18
Tableau 3: Analyse de variance linéaire mixte à mesures répétées de la longueur des pousses apicales annuelles par rapport à la méthode de mise en terre et le type de substrat pour les années de croissance de 2002 à 2011.....	18
Tableau 4 : Analyse de variance linéaire mixte de la variable log du diamètre au niveau du collet (DHC) de la tige par rapport à la méthode de mise en terre et le type de substrat pour les années d'échantillonnages 2006 et 2011.	19
Tableau 5 : Analyse de variance linéaire mixte de la variable log surface transversale totale des racines par rapport à la méthode de mise en terre et le type de substrat pour les années d'échantillonnage 2006 et 2011.....	22
Tableau 6 : Analyse de variance linéaire mixte de la variable âge des racines adventives par rapport à la méthode de mise en terre et le type de substrat pour les années d'échantillonnage 2006 et 2011.....	23
Tableau 7 : Analyse de variance linéaire mixte du ratio de racines adventives sur le nombre total de racines (%) par rapport à la méthode de mise en terre et le type de substrat pour les années d'échantillonnage 2006 et 2011.....	24
Tableau 8 : Analyse de variance linéaire mixte de la profondeur moyenne des racines par rapport au niveau du collet selon la méthode de mise en terre et type de substrat pour les années d'échantillonnage 2006 et 2011.	25
Tableau 9 : Analyse de variance linéaire mixte de la photosynthèse nette de l'épinette noire selon la méthode de mise en terre et le type de substrat après 15 ans de croissance.....	27
Tableau 10 : Analyse de variance linéaire mixte du potentiel hydrique de l'épinette noire selon la méthode de mise en terre et le type de substrat après 15 ans de croissance.	28
Tableau 11 : Analyse de variance linéaire mixte du ratio de carbone isotopique ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$) de l'épinette noire selon la méthode de mise en terre et le type de substrat après 15 ans de croissance.....	28

Tableau 12 : Valeurs moyennes de photosynthèse nette, de potentiel hydrique et du ratio de carbone isotopique pour chaque méthode de plantation (std= standard, pre= pré-enfoui, enf= enfoui) et type de substrat (min= minéral et org= organique). Les erreurs standard à la moyenne sont présentées entre parenthèses.....29

Liste des Figures

Figure 1 : Aire d'étude de la plantation expérimentale d'épinettes noires de Chapais	6
Figure 2 : Dispositif de la plantation expérimentale d'épinette noire de Chapais. Les petites boîtes à l'intérieur des cinq grandes boîtes représentent les parcelles incluses à l'intérieur de chaque répétition. Le nombre présent dans chacune des boîtes représente l'année d'échantillonnage.....	7
Figure 3 : Schéma des méthodes de plantation. STANDARD signifie que les semis étaient plantés au collet; ENFOUI signifie l'enfouissement des cinq premiers centimètres de tige lors de la plantation; PRÉ-ENFOUI signifie l'enfouissement des cinq premiers centimètres de tige 16 semaines après le début de la période de production des semis en serre (adaptée de Gagnon 2002).....	9
Figure 4 : Illustration de l'ensemble des mesures réalisées sur le système racinaire. Pour la profondeur, une valeur positive (+) signifie que la racine est située au-dessus du collet et une valeur négative (-), située sous le collet.....	12
Figure 5 : Diamètre moyen au niveau du collet (DHC) de la tige chez l'épinette noire selon la méthode de mise en terre (std= standard, pre= pré-enfoui, enf= enfoui) et le type de substrat (min= minéral et org= organique). Les barres d'erreur représentent l'erreur standard de la moyenne. Les barres avec la même lettre parmi la même méthode ou le substrat ne sont pas significativement différentes.....	20
Figure 6 : Surface transversale totale des racines selon la méthode de mise en terre (std= standard, pre= pré-enfoui, enf= enfoui) et le type de substrat (minéral et organique). Les barres d'erreur représentent l'erreur standard de la moyenne.	22
Figure 7 : Moyennes du ratio de racines adventives (%) chez l'épinette noire en plantation selon la méthode de mise en terre (std= standard, pre= pré-enfoui, enf= enfoui) et le type de substrat (minéral et organique). Les barres d'erreur représentent l'erreur standard de la moyenne. Les barres avec lettres identiques à l'intérieur d'une même méthode ou substrat représentent des valeurs similaires qui contrastent avec celles ayant d'autres lettres, selon le test de Tukey.....	24
Figure 8 : Profondeur moyenne des racines par rapport au niveau du collet selon la méthode de mise en terre (std= standard, pre= pré-enfoui, enf= enfoui) et le type de substrat (minéral et organique). Une valeur positive signifie que la profondeur moyenne des racines se situait au-dessus du collet alors qu'une valeur négative signifie sous le collet. Les barres d'erreur représentent l'erreur standard de la moyenne.....	26

Liste des Annexes

Annexe 1 : Hauteur et diamètre moyens des semis échantillonnés après 10 ans de croissance (2006) en plantation	40
Annexe 2 : Hauteur et diamètre moyens des semis échantillonnés après 15 ans de croissance (2011) en plantation	41
Annexe 3 : Moyennes du nombre, de la surface et de l'âge des racines d'épinettes noires échantillonnées après 10 ans de croissance en plantation (2006)	42
Annexe 4 : Moyennes du nombre, de la surface et de l'âge des racines d'épinettes noires échantillonnées après 15 ans de croissance en plantation (2011)	43

Introduction

Les forêts aménagées du Québec comptent une grande proportion d'essences résineuses à usage commercial. Parmi celles-ci, l'épinette noire (*Picea mariana* (Mill.) BSP) est l'espèce la plus utilisée commercialement au Canada (Burns et Honkala 1990). Cette espèce étant reconnue pour la qualité de sa fibre de bois, elle est fortement recherchée par les compagnies forestières et est donc largement utilisée dans les efforts de reboisement (Lamhamadi et Bernier 1994; Parent 2012).

L'épinette noire possède un système racinaire majoritairement du type adventif caulinaire (DesRochers et Gagnon 1997; Krause et Morin 2005; LeBarron 1945). Ce type de racines se développe à partir de la tige, au-dessus du collet de la plante. Bien que plusieurs espèces d'arbres puissent développer des racines adventives, le système racinaire adventif de l'épinette noire est de grande importance puisque le système racinaire des arbres matures est presqu'exclusivement adventif (Krause et Morin 2005). Considérant cette dominance des racines adventives, il est primordial de bien comprendre le développement du système racinaire adventif de l'épinette noire. Il est également d'une grande importance de quantifier les effets d'un système racinaire adventif plus développé sur la croissance et la condition de la partie aérienne de l'arbre, puisque la taille et la rectitude des tiges, deux caractéristiques majeures dans le succès d'une plantation, sont largement influencées par le système racinaire (Raven 2000).

Problématique

Dans les activités de reboisement, les semis germent d'abord en serre et poussent pendant un à deux ans dans des contenants (Dancause 2008). Le développement racinaire dans ce type de contenant étroit forme une masse compacte de terre et de racines appelée «carotte». Ces semis sont facilement manipulables lors du transfert en plantation (Grossnickle 2000) et sont reconnus pour avoir un bon taux de survie (Thiffault et al. 2003; Trottier 1998). Toutefois, la culture en

contenant cause fréquemment des déformations dans le système racinaire qui peuvent induire différents stress lors de l'établissement en plantation (Chavasse et al. 1978; Lindström et Rune 1999; Scarratt 1972). Ce stress est appelé choc de plantation et occasionne une diminution importante de la croissance lors des premières années chez les semis en plantation (Burdett et al. 1984). L'établissement d'un bon système racinaire des semis d'épinette noire durant les premières années en plantation est donc primordial, car les nouvelles racines formées permettent de compenser les déformations du système racinaire initial et de réduire considérablement le stress hydrique lié au choc de plantation (Burdett 1990; Grossnickle 2005).

Depuis plusieurs décennies, la méthode conventionnelle pour planter les semis issus d'une culture en contenant est de les mettre en terre de façon à ce que le haut de la carotte se situe vis-à-vis le niveau du sol (Schwan 1994; Stroempl 1990; Sutton 1967). Cette méthode ne tient toutefois pas compte de la physiologie du système racinaire de l'épinette noire car aucune portion de la tige ne se trouve sous terre, ce qui ne permet pas le développement rapide des racines adventives caulaires (McLain 1981). Une solution envisageable serait d'enfouir partiellement la tige lors de la plantation des semis (Sutton 1995). Cela pourrait procurer plusieurs avantages aux semis, tels qu'une meilleure stabilité des plants, une utilisation plus efficace de l'eau disponible et une meilleure résistance des plants à la sécheresse (Stroempl 1990).

Malgré l'importance de la considération des racines adventives et de l'enfouissement de la tige comme facteurs favorisant la croissance des épinettes noires, peu d'études se sont attardées sur le sujet (Gagnon 2002; Krause et Morin 2005). En effet, bien qu'il y ait eu beaucoup d'études portant sur la partie aérienne des plants d'épinettes noires en plantation (Paré et al. 2007; Zhang et al. 2005), nos connaissances sur le système racinaire demeurent encore limitées.

Afin de pallier au manque de connaissances concernant le système racinaire particulier de l'épinette noire, plus de recherches sont nécessaires sur le sujet. Celles-ci devraient préférentiellement s'intéresser aux liens qui peuvent exister entre le système racinaire et les méthodes d'établissement des plantations. Par exemple, il y a lieu d'évaluer d'autres méthodes de mise en terre des semis qui pourraient favoriser le développement des racines adventives caulaires chez l'épinette noire en plantation. Une méthode à considérer serait d'enfouir la

carotte de terre du semis quelques centimètres sous le niveau du sol (Schwan 1994). Ainsi, une partie de la tige au-dessus du collet serait disponible pour le développement de racines adventives caulinaires. Une autre méthode intéressante serait de pré-enfouir la tige peu de temps après la germination lors de la culture des plants en serre. Le semis pourrait donc commencer le développement de racines adventives avant même la mise en terre au champ.

Afin de bénéficier d'une bonne croissance, les plants ont besoin d'être en bonne condition physiologiquement. Pour cela, ils doivent conserver un bon statut hydrique afin de soutenir le transport continual des éléments nutritifs captés par les racines vers les parties aériennes (Grossnickle 2000). Le maintien d'un bon statut hydrique est également nécessaire pour le fonctionnement de leurs processus métaboliques, tels que la photosynthèse (Grossnickle 2000). Lorsque la photosynthèse et le statut hydrique sont maintenus à de bons niveaux, cela permet la croissance aérienne et favorise également le développement du système racinaire (Burdett 1990; Grossnickle 2000). Considérant l'importance du statut hydrique sur les processus physiologiques et ultimement sur la croissance du plant, le stress hydrique est la principale contrainte qui menace le rendement chez les jeunes plants d'épinette noire (Burdett 1990; Grossnickle 2000). Par conséquent, une méthode de mise en terre qui favoriserait un meilleur enracinement, tel que l'enfouissement de la tige décrit plus haut, pourrait potentiellement diminuer le stress hydrique et favoriser une meilleure croissance des plants d'épinettes noires en plantation.

Un autre sujet de débat entourant la méthode de plantation concerne le type de substrat, aussi appelé microsite, où les semis doivent être plantés pour un rendement optimal. En effet, la préparation de terrain par scarifiage crée différents microsites dans lesquels les semis peuvent être plantés, notamment la butte formée du substrat organique renversé par le scarificateur et le fond du sillon constitué du substrat minéral exposé par le retrait de la couche d'humus (Bedford et Sutton 2000; Burton et al. 2000). Alors que la plupart des auteurs soutiennent que la butte ou l'épaulement offrent les meilleures conditions de croissance (Bedford et al. 2000; Burton et al. 2000; Prescott et al. 2000), d'autres affirment toutefois que le substrat minéral situé dans le fond du sillon tend à réduire le stress hydrique chez les jeunes plants (Burton et al. 2000). Nous considérons ce facteur dans notre étude et comparons donc deux types de substrat : organique et minéral.

Objectifs

Le but de cette étude était de voir si la méthode de mise en terre, avec un enfouissement ou non de la tige, influence le développement des racines adventives. Par la suite, il s'agissait de vérifier si le développement précoce de racines adventives chez l'épinette noire en plantation permet une croissance initiale plus rapide et une réduction du stress hydrique. Pour ce faire, nous avons comparé trois méthodes de mise en terre, soit la méthode standard, enfouie et pré-enfouie ainsi que deux types de substrat, soit organique et minéral. Plus précisément, les objectifs étaient :

1. Vérifier si l'enfouissement permet la formation plus rapide des racines adventives;
2. Vérifier si, le cas échéant, le développement précoce de racines adventives permet une meilleure croissance aérienne des plants;
3. Vérifier si le développement précoce du système racinaire adventif permet un meilleur accès à l'eau, ce qui devrait diminuer le stress hydrique des plants et augmenter le taux de photosynthèse.

Notre hypothèse de travail était que les racines adventives se développeraient plus tôt et en plus grand nombre chez les plants pré-enfouis par rapport aux plants enfouis ainsi que chez les plants enfouis par rapport aux plants standards. Puisque les plants pré-enfouis développeraient potentiellement un système adventif avec un plus grand nombre de racines, ceux-ci pourraient être plus performants pour capter l'eau et les éléments nutritifs. Puisque les plants enfouis et surtout pré-enfouis auraient un système racinaire adventif plus développé, ces derniers devraient être moins stressés hydriquement et auraient donc un potentiel hydrique plus élevé (Grossnickle 2005). Un meilleur accès à l'eau par le système racinaire adventif bien développé devrait favoriser une capacité photosynthétique plus élevée chez les plants pré-enfouis par rapport aux plants enfouis ainsi que chez les plants enfouis par rapport aux plants standards (Burdett 1990). Si cela est observé, la croissance aérienne devrait être supérieure chez les plants pré-enfouis par rapport aux plants enfouis ainsi que chez les plants enfouis par rapport aux plants standards (Grossnickle 2000).

Matériel et Méthodes

Les épinettes noires étudiées ont été cultivées dans les serres du pavillon de recherche forestière de l'Université du Québec à Chicoutimi. Les graines ont été plantées dans des contenants 67-50 (67 cavités de 50 cm³) et les plants cultivés pendant 16 semaines. Tous les plants ont été repiqués dans des contenants 45-110 (45 cavités de 110 cm³) après 16 semaines. À ce moment, l'enfouissement des tiges a été effectué chez les plants identifiés pré-enfouis de façon à ce que le collet se trouve cinq centimètres sous la surface du substrat. Dans le cas des deux autres traitements, ils ont seulement été transplantés au moment du repiquage puisque les plants standards n'ont pas eu d'enfouissement et les plants enfouis l'ont été seulement au moment de la mise en plantation. Après quatre semaines supplémentaires de culture en serre dans ces contenants, les plants ont par la suite été transportés aux sites de plantation durant l'été 1996. Aucune période de dormance n'a été induite durant la période de culture en serre et les plants étaient encore en phase de croissance en hauteur lors de la mise en place de la plantation. Ils ont été plantés en juillet sur une aire forestière coupée près de Chapais (49°18'N, 75°12'O) (Figure 1). Le secteur est situé dans le domaine bioclimatique de la pessière à mousse où la végétation est dominée par l'épinette noire, l'épinette blanche (*Picea glauca* (Moench) Voss.) et le sapin baumier (*Abies balsamea* (L.) Mill.) (Garralla et Gajewski 1992). Les températures annuelles sont de ~ 0,0 °C, avec des températures moyennes de -18,8 °C en janvier et de 16,3 °C en juillet (Environnement Canada 2013).

Les plants ont été plantés selon un dispositif en tiroir constitué de cinq répétitions, 2 types de substrat (minéral ou organique) et trois méthodes de plantation. Celui-ci est également composé de sept parcelles représentant chacune une année d'échantillonnage, soit 1996, 1997, 1998, 1999, 2001, 2006 et 2011 (Figure 2). Les cinq premières parcelles ont été utilisées dans des études antérieures à la nôtre (Gagnon 2002) alors que les deux dernières parcelles, correspondant aux années d'échantillonnage 2006 et 2011, sont celles qui ont été utilisées dans notre étude. Les années d'échantillonnage ainsi que les traitements type de substrat (subs) et méthode de mise en terre (meth) sont imbriqués hiérarchiquement l'un dans l'autre. Chaque parcelle contenait 72

plants et les combinaisons des traitements méthode et substrat ont été répartis de façon aléatoire entre ces derniers.

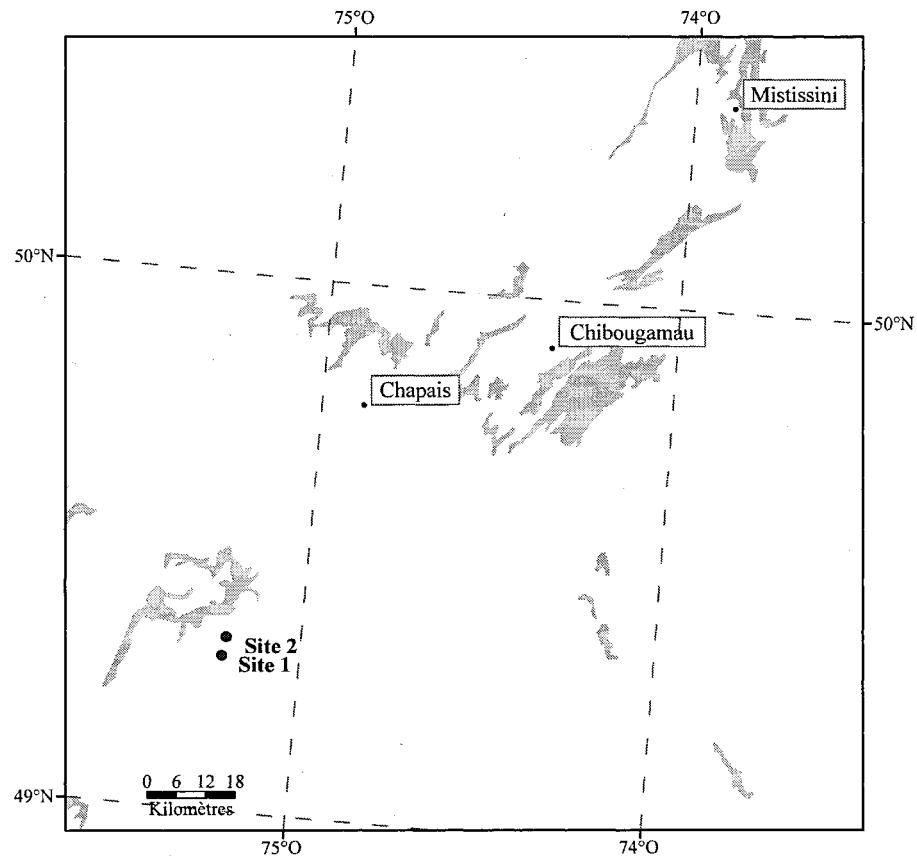
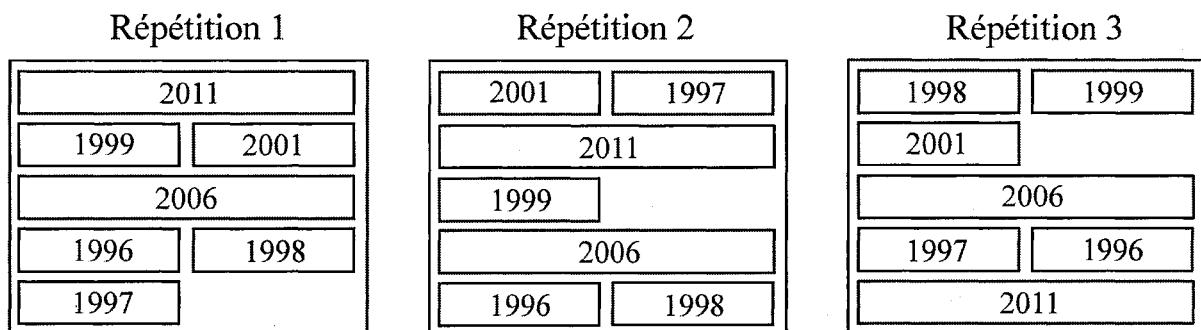


Figure 1 : Aire d'étude de la plantation expérimentale d'épinettes noires de Chapais

Les répétitions étaient réparties entre deux sites. Le site 1 ($49^{\circ}18'30''N$, $75^{\circ}13'0''O$) comprenait les répétitions 1, 2 et 3 et le sol était mésique avec une couche épaisse de matière organique décomposée. Le site 2 ($49^{\circ}18'30''N$, $75^{\circ}12'0''O$), comprenant les répétitions 4 et 5, avait des conditions de sol xérique avec une couche de matière organique mince et peu décomposée (Gagnon 2002). Les sites avaient été scarifiés avec une TTS hydraulique lors de leur

établissement et le positionnement de chacun des plants était indiqué par une distance à partir du début du rang et par une position latérale par rapport au sillon de scarifiage.

Site Mésique



Site Xérique

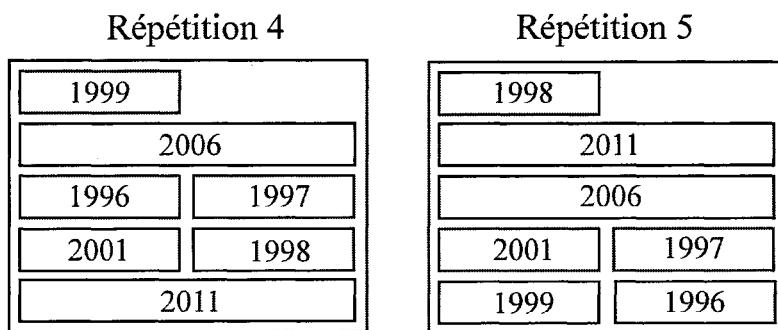


Figure 2 : Dispositif de la plantation expérimentale d'épinette noire de Chapais. Les petites boîtes à l'intérieur des cinq grandes boîtes représentent les parcelles incluses à l'intérieur de chaque répétition. Le nombre présent dans chacune des boîtes représente l'année d'échantillonnage.

Trois méthodes de mise en terre ont été utilisées afin d'en vérifier les effets sur la croissance et le développement de racines adventives (Figure 3). La première, la méthode standard (std), est la méthode conventionnelle de mise en terre exigée à cette époque par le Ministère des Ressources Naturelles du Québec (MRN) où le niveau du collet, c'est-à-dire l'interface entre la tige et la partie racinaire, se retrouve au niveau du sol. Dans la méthode enfouie (enf), la tige des semis a été partiellement enfouie de façon à ce que le haut de la carotte se situe à 5 cm sous le niveau du sol au moment de la mise en terre en forêt. Dans la méthode pré-enfouie (pre), ils étaient plantés de la même façon que les plants standards lors de la mise en place de la plantation, mais la tige avait préalablement été enfouie de 5 cm dans le contenant lors de la culture en serre. Concernant le facteur type de substrat lié au microsite, la moitié des plants ont été plantés en substrat organique (org), sur le sommet du sillon de scarifiage, alors que l'autre moitié a été plantée en substrat minéral (min) dans le fond du sillon.

Différentes mesures ont été effectuées depuis la mise en place du dispositif (Tableau 1). Ces mesures ont été prises à des intervalles de cinq ans à partir de la cinquième année de croissance des plants (2001), c'est à dire en 2006 et en 2011. Lors de l'échantillonnage de 2006, 90 plants au total ont été prélevés : 5 répétitions \times 3 méthodes de mise en terre \times 2 types de substrat \times 3 plants = 90 échantillons. L'échantillonnage de 2011 a été réalisé de façon similaire, mais avec un effectif plus élevé de 150 plants : 5 répétitions \times 3 méthodes de mise en terre \times 2 types de substrat \times 5 plants = 150 échantillons.

Lors de la récolte des plants, le niveau du sol a été marqué sur chaque tige et le plant a été prélevé en incluant tout le système racinaire dans un périmètre d'environ 30 cm autour du tronc. Par la suite, tous les plants ont été ébranchés avant de les ramener au laboratoire de l'UQAC où ils ont été entreposés à l'air libre afin de les conserver au sec. Les plants de l'échantillonnage de 2006 ont été entreposés pendant quatre ans avant le début des mesures alors que ceux de l'échantillonnage de 2011 l'ont été pendant une période de deux à trois mois avant que débutent les manipulations. Toutes les mesures de tige et sur le système racinaire ont été faites de l'hiver 2011 à l'hiver 2012, en commençant par les arbres récoltés en 2006, suivi par ceux de 2011. Dans le cas des mesures physiologiques, elles ont été faites juste avant la récolte des plants en 2011.

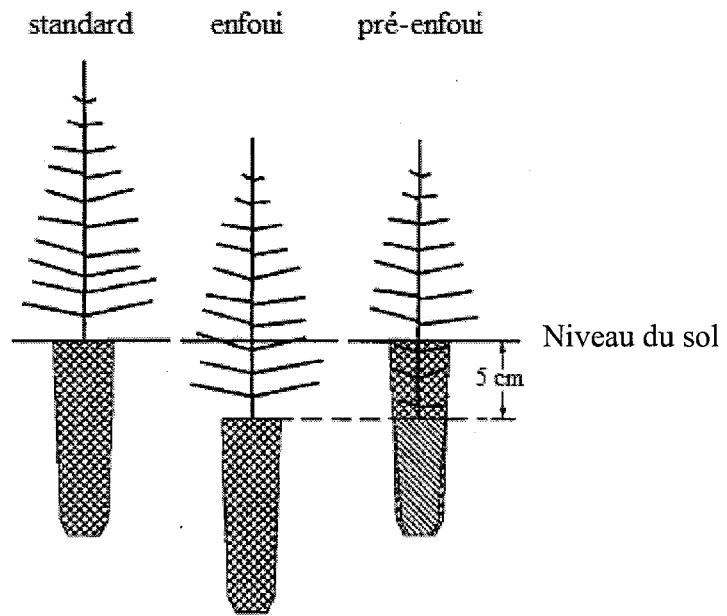


Figure 3 : Schéma des méthodes de plantation. STANDARD signifie que les semis étaient plantés au collet; ENFOUI signifie l'enfouissement des cinq premiers centimètres de tige lors de la plantation; PRÉ-ENFOUI signifie l'enfouissement des cinq premiers centimètres de tige 16 semaines après le début de la période de production des semis en serre (adaptée de Gagnon 2002).

Tableau 1 : Sommaire des mesures effectuées sur les tiges des épinettes noires échantillonnées en 2006 et 2011.

Mesures	2006	2011
Hauteur de la tige	X	X
Hauteur des cinq derniers verticilles	X	X
Diamètre du collet (DHC)	X	X
Nombre de racines totales	X	X
Nombre de racines adventives	X	X
Profondeur des racines	X	X
Surface transversale des racines	X	X
Âge des racines	X	X
Photosynthèse nette		X
Potentiel hydrique		X
Ratio de carbone $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$		X

Mesures aériennes

Les mesures effectuées sur les parties aériennes avaient pour but d'évaluer la hauteur et le diamètre des plants pour les années 2006 et 2011. La hauteur totale de la tige et celle des cinq derniers verticilles ont été mesurées pour les épinettes récoltées en 2006 et en 2011 à l'aide d'un ruban gradué au millimètre. Puisque la taille des cinq derniers verticilles a été mesurée lors des deux années d'échantillonnages, cela a permis d'obtenir une chronoséquence de 10 ans pour la croissance annuelle en hauteur des plants, soit à partir de l'âge de 5 ans jusqu'à 15 ans. Les mesures de diamètre au collet (DHC) ont été prises à l'aide d'un vernier électronique (précision au centième de millimètre).

Mesure des racines

Concernant la partie racinaire, les mesures visaient à évaluer l'établissement et la croissance des racines adventives par rapport au développement des racines initiales. D'abord, toutes les racines latérales de plus de 2 mm de diamètre ont été dénombrées et identifiées par un numéro correspondant à l'ordre de profondeur par rapport au niveau du sol. Le diamètre le plus large et à 90° de la base de chaque racine identifiée a ensuite été mesuré au vernier électronique (Figure 4), permettant de calculer la surface transversale de chaque racine à l'aide de la formule de l'ellipse :

$$\pi \times (\text{rayon le plus large}) \times (\text{rayon à } 90^\circ)$$

Leur profondeur par rapport au niveau du sol a été mesurée en utilisant le point le plus haut de la base de la racine comme référence. Elles ont ensuite été retirées à l'aide d'un scalpel de façon à effectuer une coupe nette le plus près possible de la souche. Des coupes transversales de la souche ont ensuite été effectuées dans le but de valider avec précision le niveau réel du collet (interface racine/tige). Déterminer le niveau du collet fut nécessaire pour discriminer les racines adventives caulinaire (au-dessus du collet) des racines initiales (sous le collet) (DesRochers et Gagnon 1997). La profondeur des racines par rapport au niveau du sol a donc été convertie en profondeur par rapport au niveau du collet, une valeur positive signifiant que la racine est une racine adventive et une valeur négative, une racine initiale (Figure 4). Le nombre de racines adventives a été dénombré par rapport au nombre de racines total afin d'obtenir un ratio exprimé en pourcentage (%). La conversion du nombre de racines adventives en ratio fut nécessaire afin de permettre des comparaisons entre les plants ayant un nombre variable de racines dans leur système racinaire.

Finalement, l'âge au niveau de la base de chaque racine adventive ou initiale a été calculé à l'aide d'un décompte des cernes de croissance, permettant de connaître le moment où chaque racine a été formée au cours de la vie du plant. Pour les plants récoltés en 2011, une même analyse de l'âge des racines a également été effectuée à 30 cm de la base de la tige afin d'estimer la vitesse de croissance des racines. Toutefois, cette mesure n'est pas disponible pour tous les plants puisqu'un grand nombre ne possédaient pas un système racinaire suffisamment étendu.

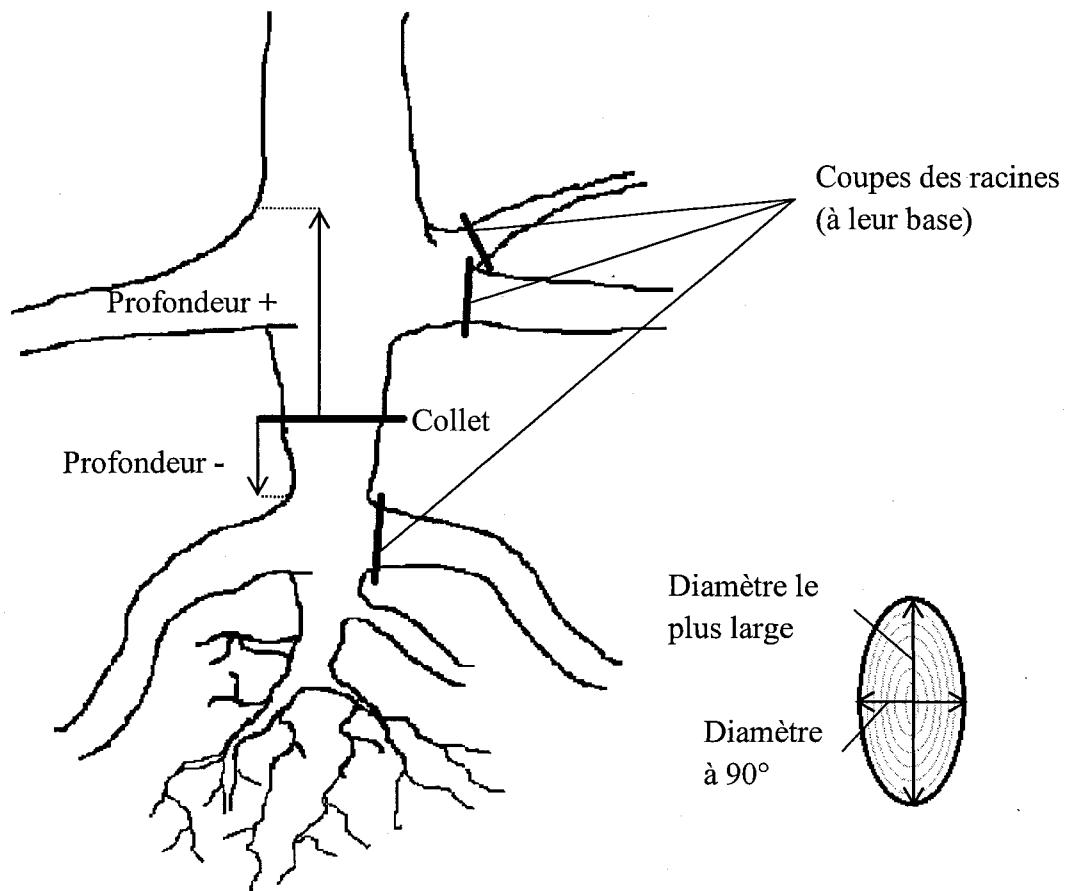


Figure 4 : Illustration de l'ensemble des mesures réalisées sur le système racinaire. Pour la profondeur, une valeur positive (+) signifie que la racine est située au-dessus du collet et une valeur négative (-), située sous le collet.

Mesures physiologiques

En ce qui concerne les mesures physiologiques visant à comparer le stress hydrique et le taux de photosynthèse entre les traitements, des mesures d'échanges gazeux, de potentiel hydrique et de ratio de carbone isotopique ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$) ont été effectuées en 2011. Les mesures d'échanges gazeux ont été réalisées le 19 juillet, entre 9h00 et 15h00 et la météo était parfaitement ensoleillée durant cette période; les plants profitaient donc d'une luminosité saturante continue. Les mesures ont été effectuées dans 4 répétitions avec une sélection de 3 plants (pseudo-réPLICATION) par combinaison de traitements pour chaque répétition, aléatoirement choisis parmi les plants déjà sélectionnés pour l'étude. Un appareil de modèle LI-COR-6400 a été utilisé pour ces mesures avec une chambre foliaire transparente pour conifère (LI-COR Biosciences, Lincoln, Nebraska E-U). Le flux était de 400 $\mu\text{mol/sec}$, la référence de CO_2 programmée à 400 ppm et la température maintenue à 25°C (Sullivan et Sveinbjörnsson 2011). Pour chaque mesure, un rameau d'environ 10 cm de longueur a été prélevé, provenant des plus hautes branches des plants sous l'apex, puis placé immédiatement dans un sac hermétique (Ziploc) préalablement identifié avec le numéro d'arbre correspondant pour son transport jusqu'à la chambre foliaire. Il y avait une attente de 2 à 3 minutes maximum en attendant la complétion de la mesure du rameau précédent. Immédiatement après mesure de l'échange gazeux dans la chambre foliaire, chaque rameau a été replacé dans son sac hermétique correspondant, puis rangé au frais dans une glacière pendant la mesure du rameau suivant. Ces échantillons ont été ainsi conservés à l'obscurité et au frais durant le reste de l'ensemble des mesures et jusqu'au laboratoire de l'UQAC où ils ont par la suite été séchés à l'étuve jusqu'à masse constante. Seulement les aiguilles ont été conservées dans les échantillons séchés, qui ont par la suite été pesés. Afin de calculer la surface foliaire, des sous-échantillons de 15 aiguilles ont été sélectionnées sur chaque rameau, leur masse totale pesée, et leur surface totale calculée à l'aide du logiciel WinCell (version 2004a Pro, Regent instruments Inc., Nepean, Canada). Avec le rapport surface/masse obtenu pour ces sous-échantillons, il a été possible d'estimer la surface totale de chaque échantillon utilisé dans la chambre foliaire du LI-COR et ainsi calculer la photosynthèse nette des échantillons.

Afin d'évaluer le statut hydrique des plants, le potentiel hydrique a été mesuré le matin du 19 juillet 2011, de 7h15 à 9h15. Le matin est la meilleure période de la journée pour effectuer cette mesure puisque les plants viennent de rétablir leur apport en eau et n'ont pas encore été exposés à la chaleur de la journée (Grossnickle 2000). Un appareil de type chambre à pression (Modèle 610, PMS Instruments, Albany, Oregon E-U) a été utilisé pour effectuer les mesures de potentiel hydrique (Ritchie et Hinckley 1975). Les rameaux sélectionnés étaient situés près du sommet des plants échantillonnés, sous les nouvelles pousses de l'année. Ceux-ci ont ensuite été insérés dans la chambre à pression de façon à ce que l'extrémité coupée dépasse par l'orifice. Cette extrémité a été préalablement dégarnie de son écorce sur un à deux centimètres afin de favoriser une fermeture complètement hermétique entre le rameau et la paroi de l'orifice. La pression de l'appareil a par la suite été augmentée de façon constante jusqu'à l'apparition d'eau à l'extrémité du rameau dépassant de l'appareil. À ce moment, la pression indiquée par l'appareil est notée et celle-ci correspond au potentiel hydrique du rameau et du plant correspondant (Ritchie et Hinckley 1975). Cette mesure a été réalisée sur les mêmes plants que pour la photosynthèse, mais seulement pour les deux répétitions du site xérique. La conservation et le transport dans des sacs hermétiques pré-identifiés en attendant la mesure s'est déroulée de façon similaire à la procédure utilisée lors des mesures de la photosynthèse nette.

Afin d'évaluer le stress hydrique des plants, une mesure de la composition du feuillage en carbone isotopique ($\delta^{13}\text{C}$) a été effectuée. En effet, il est reconnu qu'en période de stress hydrique, les plantes assimilent une plus grande proportion de carbone ^{13}C par rapport au ^{12}C qu'en période de non-stress (Farquhar et al. 1989). Le ratio $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ a été calculé à partir de la formule suivante (Bladon et al. 2007; DesRochers et Tremblay 2009) :

$$\delta^{13}\text{C} = (R_{\text{éch}}/R_{\text{std}} - 1) \times 1000$$

où $R_{\text{éch}}$ correspond au ratio $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ de l'échantillon et R_{std} correspond au ratio standard, c'est-à-dire d'une valeur de $-23,47\text{‰}$. Des aiguilles provenant des rameaux prélevés pour la mesure de la surface foliaire ont été broyées à l'aide d'un vibro-broyeur (MM200, Retsch, Haan, Allemagne) puis envoyées au laboratoire de l'Université d'Alberta (Soil Biochemistry Laboratory, Edmonton, Canada) pour analyse du ratio de carbone isotopique. Les échantillons ont

étés brûlés à 1800°C à l'aide d'un système de combustion élémentaire (Costech Analytical Technologies, Valencia, CA É-U) associé à un Finnigan Conflo III et un spectromètre de masse à flux continu (Delta Plus Advantage, Thermo Electron Corporation, Mississauga).

Analyses statistiques

Toutes les analyses statistiques ont été effectuées à l'aide du logiciel R version 2.15 (R development Core Team 2012). Des analyses de variance ont été utilisées pour comparer l'effet des traitements «méthode» et «substrat» sur les paramètres de croissance étudiés. Le modèle comportait à la fois des effets fixes et aléatoires, la méthode de mise en terre et le type de substrat étant considérés comme des facteurs fixes alors que le site et les répétitions étaient considérés comme des facteurs aléatoires. C'est pour cette raison qu'un modèle linéaire mixte a été utilisé pour analyser les données (Pinheiro et Bates 2000). Le modèle utilisé était comme suit :

$$Y_i = \beta_0 + \beta_{\text{haut}} \times \text{haut}_i + \beta_{\text{methENF}} \times \text{methENF}_i + \beta_{\text{methPRE}} \times \text{methPRE}_i + \beta_{\text{subsORG}} \times \text{subsORG}_i + \beta_{\text{methENF : subsORG}} \times \text{methENF}_i \times \text{subsORG}_i + \beta_{\text{methPRE : subsORG}} \times \text{methPRE}_i \times \text{subsORG}_i + b_{\text{site}} \sim N(0, \sigma_{\text{site}}) + b_{\text{rep}} \sim N(0, \sigma_{\text{rep}})$$

où « Y_i » est la i ème observation de la variable dépendante à étudier, «haut» est la hauteur de la tige utilisée en covariable, «meth» et «subs» sont les facteurs fixes méthode de mise en terre et type de substrat respectivement, «meth×subs» est l'interaction entre de la méthode de mise en terre et le type de substrat et finalement «site» et «répétition» sont les facteurs aléatoires du site et de la répétition.

Dans le cas de l'analyse des mesures des pousses annuelles, le modèle utilisé était à mesures répétées en ajoutant l'année de croissance comme effet fixe. Le plant a également été ajouté comme effet aléatoire dans cette analyse. L'analyse pour la période 2002 à 2006 a été effectuée séparément de celle de 2007 à 2011 puisque les mesures des pousses annuelles de chacune de ces deux périodes provenaient de deux échantillonnages distincts.

Préalablement à chaque analyse, l'homogénéité des variances a été vérifiée entre les trois méthodes de mise en terre et les deux types de sol à l'aide de tests de Bartlett (1937). Suite à ce test, les variables hauteur de la tige ainsi que la surface racinaire transversale ont dû être converties à l'aide d'une transformation logarithmique afin d'obtenir une variance homogène et préserver les conditions d'utilisation des modèles linéaires mixtes. Une vérification graphique a également été faite pour chaque analyse afin de s'assurer de la normalité des résidus du modèle. La hauteur des plants a été utilisée en covariable afin de diminuer la forte variance qui existait à l'intérieur des blocs, sauf pour l'analyse de la hauteur des plants elle-même. Lors d'un effet significatif sur une variable, des tests de Tukey post-hoc ont été utilisés afin d'identifier où se trouvaient les différences entre les traitements. Le seuil α utilisé pour considérer une différence comme étant significative a été fixé à 0,05 pour toutes les analyses.

Résultats

Partie aérienne

En ce qui concerne la taille des plants, une grande variation existait entre les répétitions ainsi qu'à l'intérieur de ces dernières pour les deux années d'échantillonnage. À titre d'exemple, la hauteur moyenne des tiges d'épinettes noires était de 83 cm en 2006 et variait de 24 cm à 239 cm (Annexe 1). En 2011, la hauteur moyenne était de 118 cm et variait de 25 cm à 359 cm (Annexe 2). La méthode de mise en terre et le type de substrat n'ont pas influencé la hauteur des plants (Tableau 2) ni la taille des pousses apicales annuelles (Tableau 3). Dans le modèle de hauteur des tiges, les valeurs pour la méthode de mise en terre de l'année 2006 étaient de 71,4 cm, 87,0 cm et 75,6 cm pour les plants standard, pré-enfouis et enfouis respectivement. En 2011, celles-ci étaient de 123,4 cm, 114,0 cm et 96,5 cm respectivement. Concernant le type de substrat, en 2006, les plants en substrat minéral avaient une hauteur de 78,7cm et ceux en substrat organique, une hauteur de 77,3 cm. En 2011, les valeurs de hauteur étaient respectivement de 116,2 cm et 106,4 cm.

Tableau 2 : Analyse de variance linéaire mixte du log de la hauteur de la tige par rapport à la méthode de mise en terre et le type de substrat pour les années d'échantillonnages 2006 et 2011.

numDL	2006				2011		
	denDL	F	Pr>F	denDL	F	Pr>F	
(Intercept)	1	79	121,96	0	128	194,64	0
meth	2	79	0,99	0,377	128	0,88	0,419
subs	1	79	0,07	0,788	128	1,72	0,193
meth x subs	2	79	0,84	0,434	128	0,50	0,605

Notes : meth = méthode de mise en terre (standard, enfouie, pré-enfouie); subs= type de substrat (organique, minéral); meth x subs = interaction entre la méthode de mise en terre et le type de substrat; numDL= degré de liberté du numérateur; denDL= degré de liberté du dénominateur.

Tableau 3: Analyse de variance linéaire mixte à mesures répétées de la longueur des pousses apicales annuelles par rapport à la méthode de mise en terre et le type de substrat pour les années de croissance de 2002 à 2011.

	2002 à 2006				2007 à 2011			
	numDL	denDL	F	Pr>F	numDL	denDL	F	Pr>F
(Intercept)	1	435	53,86	0	1	514	144,50	0
meth	2	80	2,54	0,086	2	128	0,16	0,852
subs	1	80	0,16	0,689	1	128	2,79	0,097
année	5	435	7,85	0	4	514	46,41	0
meth x subs	2	80	0,67	0,516	2	128	0,42	0,658
meth x an	10	435	0,87	0,563	8	514	1,61	0,120

Notes : meth = méthode de mise en terre (standard, enfouie, pré-enfouie); subs= type de substrat (organique, minéral); année= année de croissance de la pousse annuelle, meth x subs = interaction entre la méthode de mise en terre et le type de substrat; meth x an = interaction entre la méthode de mise en terre et l'année de croissance; numDL= degré de liberté du numérateur; denDL= degré de liberté du dénominateur.

Diamètre au collet

La méthode de mise en terre a eu un effet significatif sur le diamètre au collet (DHC) (Tableau 4), les plants standards ayant un diamètre plus grand comparé aux plants enfouis et pré-enfouis (Figure 5). Il n'y avait toutefois aucun effet significatif du type de substrat sur le diamètre au niveau du collet des plants.

Tableau 4 : Analyse de variance linéaire mixte de la variable log du diamètre au niveau du collet (DHC) de la tige par rapport à la méthode de mise en terre et le type de substrat pour les années d'échantillonnages 2006 et 2011.

numDL	2006			2011		
	denDL	F	Pr>F	denDL	F	Pr>F
(Intercept)	1	78	2267,01	0	127	9102,14
meth	2	78	4,47	0,015	127	23,59
subs	1	78	2,42	0,124	127	3,39
loghaut	1	78	176,84	0	127	504,67
meth x subs	2	78	0,47	0,626	127	2,14

Notes : meth= méthode de mise en terre (standard, enfouie, pré-enfouie), subs= type de substrat (organique, minéral); meth x subs= interaction entre la méthode de mise en terre et le type de substrat, loghaut= log de la hauteur de la tige; numDL= degré de liberté du numérateur; denDL= degré de liberté du dénominateur.

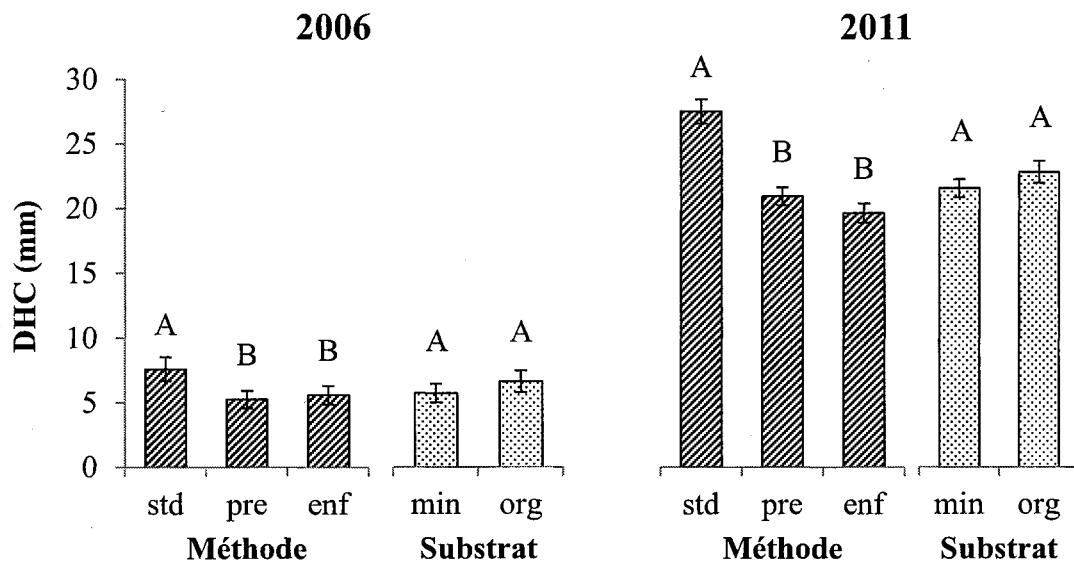


Figure 5 : Diamètre moyen au niveau du collet (DHC) de la tige chez l'épinette noire selon la méthode de mise en terre (std= standard, pre= pré-enfoui, enf= enfoui) et le type de substrat (min= minéral et org= organique). Les barres d'erreur représentent l'erreur standard de la moyenne. Les barres avec la même lettre parmi la même méthode ou le substrat ne sont pas significativement différentes.

Système racinaire

La surface racinaire transversale totale des épinettes noires échantillonnées en 2006 était de 351,70 cm² et variait de 5 cm² à 2138,5 cm² (Annexe 3). En 2011, cette surface transversale totale variait de 1,5 cm² à 7483,2 cm² pour une moyenne de 835,3 cm² (Annexe 4). En ce qui concerne l'âge des racines, l'âge moyen des racines chez les plants récoltés en 2006 était de 7,9 ans et variait de 4 à 11 ans. En 2011, l'âge moyen des racines était de 11,5 ans et s'étendait de 7 à 16 ans.

Le facteur type de substrat a eu un effet significatif sur la surface racinaire transversale totale des épinettes noires en plantation pour l'année d'échantillonnage 2011, mais il y avait présence d'une interaction entre les facteurs type de substrat et méthode de mise en terre (Tableau 5). L'effet du substrat dépendait de la méthode de mise en terre : les plants enfouis avaient une surface transversale plus élevée dans le sol organique, alors que les plants standards avec une surface transversale plus élevée dans le sol minéral (Figure 6). Malgré le fait d'avoir tenu compte de l'interaction en effectuant le test de Tukey, celui-ci n'a pas été en mesure de déterminer où se trouvaient les différences. Il est à noter que l'effet de l'interaction demeurait faible avec des valeurs et erreurs standards très près les unes des autres (Figure 6).

Tableau 5 : Analyse de variance linéaire mixte de la variable log surface transversale totale des racines par rapport à la méthode de mise en terre et le type de substrat pour les années d'échantillonnage 2006 et 2011.

numDL	2006				2011		
	denDL	F	Pr>F	denDL	F	Pr>F	
(Intercept)	1	76	744,23	0	100	12607,97	0
meth	2	76	1,37	0,261	100	0,27	0,761
subs	1	76	2,10	0,151	100	5,69	0,019
loghaut	1	76	240,15	0	100	765,07	0
meth x subs	2	76	0,64	0,529	100	3,26	0,042

Notes : meth= méthode de mise en terre; subs= type de substrat; loghaut= log de la hauteur de la tige; meth x subs= interaction entre la méthode de mise en terre et le type de substrat; numDL= degré de liberté du numérateur; denDL= degré de liberté du dénominateur.

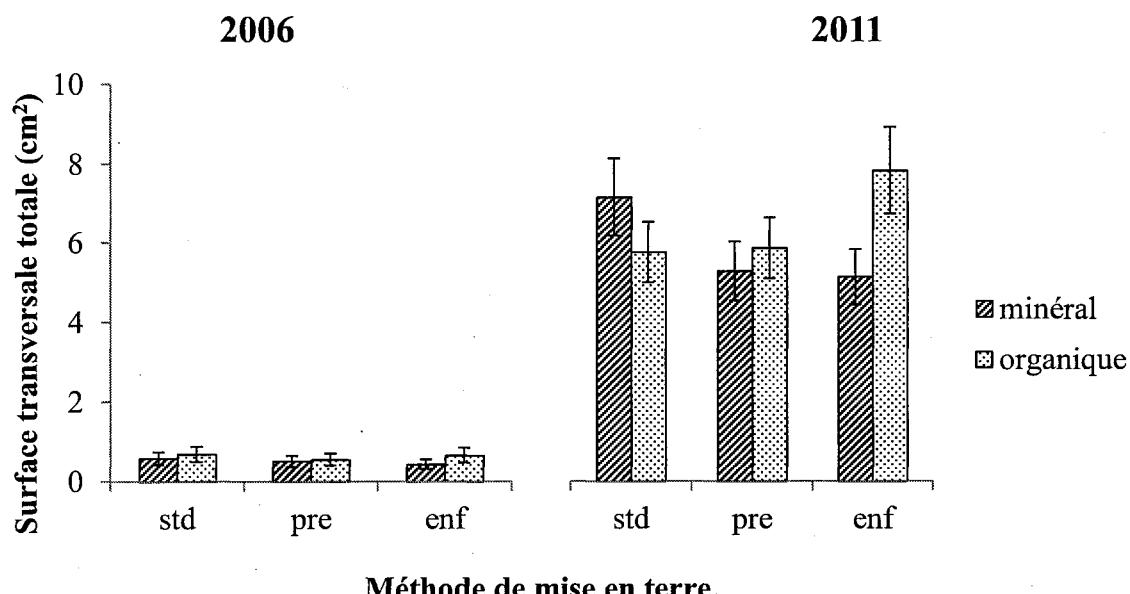


Figure 6 : Surface transversale totale des racines selon la méthode de mise en terre (std= standard, pre= pré-enfoui, enf= enfoui) et le type de substrat (minéral et organique). Les barres d'erreur représentent l'erreur standard de la moyenne.

En ce qui a trait au développement temporel du système racinaire adventif, ni la méthode de mise en terre ou le type de substrat n'a eu d'effet sur l'âge des racines adventives (Tableau 6). L'âge moyen des racines adventives en 2006 était de 6,9 ans alors qu'il était de 10,8 ans en 2011.

Tableau 6 : Analyse de variance linéaire mixte de la variable âge des racines adventives par rapport à la méthode de mise en terre et le type de substrat pour les années d'échantillonnage 2006 et 2011.

numDL	2006			2011		
	denDL	F	Pr>F	denDL	F	Pr>F
(Intercept)	1	168	302,07	0	195	802,94
meth	2	53	2,03	0,141	86	2,10
subs	1	53	3,99	0,050	86	1,72
haut	1	53	6,34	0,014	86	3,61
meth x subs	2	53	0,29	0,750	86	1,29

Notes : meth= méthode de mise en terre; subs= type de substrat; haut= hauteur de la tige (cm) en covariable; meth x subs= interaction entre la méthode de mise en terre et le type de substrat; numDL= degré de liberté du numérateur; denDL= degré de liberté du dénominateur.

Le traitement méthode de mise en terre a eu un effet significatif sur le ratio (%) de racines adventives par rapport au nombre total de racines (Tableau 7), ce dernier étant supérieur chez les plants enfouis et pré-enfouis par rapport aux plants standards (Figure 7). Cet effet était présent pour les deux années de mesures, mais était plus prononcé en 2006 qu'en 2011. En revanche, aucun effet significatif du traitement type de substrat sur le ratio de racines adventives n'a été observé (Tableau 7).

Tableau 7 : Analyse de variance linéaire mixte du ratio de racines adventives sur le nombre total de racines (%) par rapport à la méthode de mise en terre et le type de substrat pour les années d'échantillonnage 2006 et 2011.

	numDL	2006			2011		
		denDL	F	Pr>F	denDL	F	Pr>F
(Intercept)	1	79	134,24	0	127	18,51	<0,001
meth	2	79	11,10	<0,001	127	8,15	0,001
subs	1	79	0,01	0,927	127	0,15	0,700
haut	1	79	0,57	0,453	127	2,10	0,150
meth x subs	2	79	0,28	0,756	127	1,39	0,252

Notes : meth=méthode de mise en terre; subs= type de substrat; haut = hauteur de la tige (cm) en covariable; meth x subs= interaction entre la méthode de mise en terre et le type de substrat; numDL= degré de liberté du numérateur; denDL= degré de liberté du dénominateur.

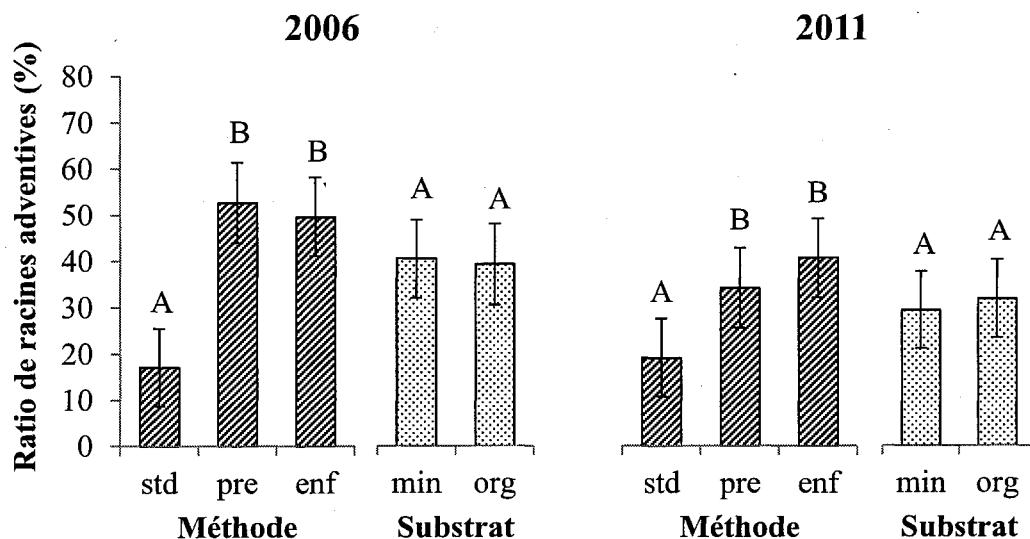


Figure 7 : Moyennes du ratio de racines adventives (%) chez l'épinette noire en plantation selon la méthode de mise en terre (std= standard, pre= pré-enfoui, enf= enfoui) et le type de substrat (minéral et organique). Les barres d'erreur représentent l'erreur standard de la moyenne. Les barres avec lettres identiques à l'intérieur d'une même méthode ou substrat représentent des valeurs similaires qui contrastent avec celles ayant d'autres lettres, selon le test de Tukey.

À l'instar du ratio de racines adventives, le facteur méthode de mise en terre a eu un effet significatif sur la profondeur des racines par rapport au niveau du collet (Tableau 8), les plants enfouis et pré-enfouis ayant des racines plus superficielles, souvent situées au-dessus du collet, comparativement aux plants standards (Figure 8).

Tableau 8 : Analyse de variance linéaire mixte de la profondeur moyenne des racines par rapport au niveau du collet selon la méthode de mise en terre et type de substrat pour les années d'échantillonnage 2006 et 2011.

numDL	denDL	2006			2011		
		F	Pr>F	denDL	F	Pr>F	
(Intercept)	1	483	4,37	0,037	859	7,93	0,005
meth	2	77	11,04	0,001	126	11,18	<0,001
subs	1	77	1,65	0,203	126	1,50	0,223
haut	1	77	2,90	0,093	126	2,94	0,089
meth x subs	2	77	1,45	0,242	126	0,59	0,553

Notes : meth=méthode de mise en terre; subs= type de substrat; haut = hauteur de la tige (cm) en covariable; meth x subs= interaction entre la méthode de mise en terre et le type de substrat; numDL= degré de liberté du numérateur; denDL= degré de liberté du dénominateur.

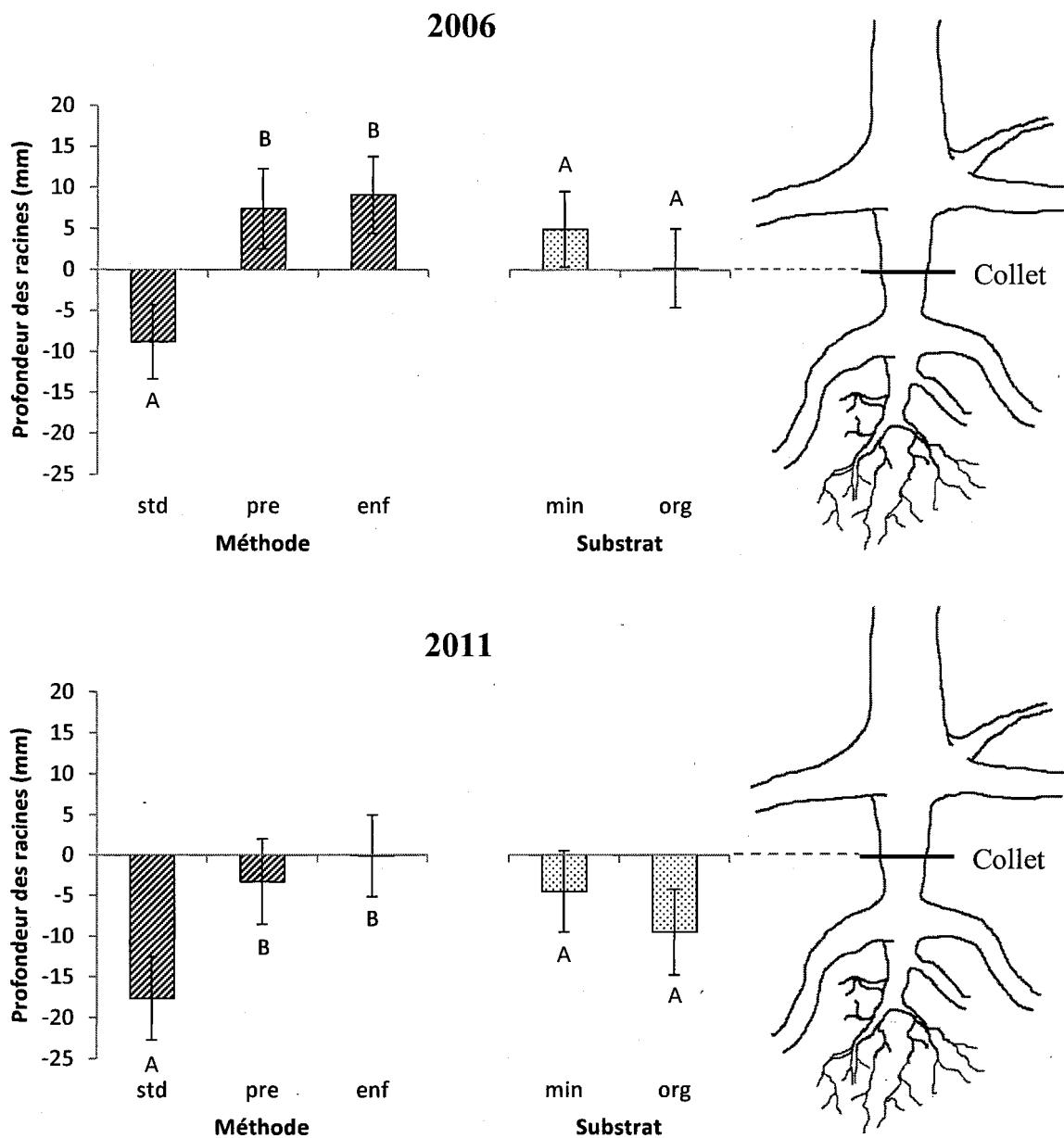


Figure 8 : Profondeur moyenne des racines par rapport au niveau du collet selon la méthode de mise en terre (std= standard, pre= pré-enfoui, enf= enfoui) et le type de substrat (minéral et organique). Une valeur positive signifie que la profondeur moyenne des racines se situait au-dessus du collet alors qu'une valeur négative signifie sous le collet. Les barres d'erreur représentent l'erreur standard de la moyenne.

Paramètres physiologiques

En ce qui a trait aux paramètres physiologiques, la méthode de mise en terre et le type de substrat n'ont pas influencé la photosynthèse nette (Tableau 9), le potentiel hydrique (Tableau 10) ou le ratio de carbone isotopique (Tableau 11) chez les épinettes noires après 15 ans. Les valeurs moyennes avec leurs erreurs standards respectives sont représentées dans le tableau 12.

Tableau 9 : Analyse de variance linéaire mixte de la photosynthèse nette de l'épinette noire selon la méthode de mise en terre et le type de substrat après 15 ans de croissance.

	numDL	denDL	F	Pr>F
(Intercept)	1	56	54,697321	<0,001
meth	2	56	0,1469316	0,8636847
subs	1	56	0,9838286	0,325522
haut	1	56	29,520238	<0,001
meth x subs	2	56	0,424364	0,6562718

Notes : meth=méthode de mise en terre; subs= type de substrat; haut = hauteur de la tige (cm) en covariable; meth x subs= interaction entre la méthode de mise en terre et le type de substrat; numDL= degré de liberté du numérateur; denDL= degré de liberté du dénominateur.

Tableau 10 : Analyse de variance linéaire mixte du potentiel hydrique de l'épinette noire selon la méthode de mise en terre et le type de substrat après 15 ans de croissance.

	numDL	denDL	F	Pr>F
(Intercept)	1	26	43,091966	<0,001
meth	2	26	1,160842	0,3289316
subs	1	26	0,2313063	0,6345795
haut	1	26	2,9123808	0,0998204
meth x subs	2	26	1,7399179	0,1953564

Notes : meth=méthode de mise en terre; subs= type de substrat; haut = hauteur de la tige (cm) en covariable; meth x subs= interaction entre la méthode de mise en terre et le type de substrat; numDL= degré de liberté du numérateur; denDL= degré de liberté du dénominateur.

Tableau 11 : Analyse de variance linéaire mixte du ratio de carbone isotopique ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$) de l'épinette noire selon la méthode de mise en terre et le type de substrat après 15 ans de croissance.

	numDL	denDL	F	Pr>F
(Intercept)	1	56	4751076,8	0
meth	2	56	0,8527638	0,4316951
subs	1	56	0,7117924	0,402439
haut	1	56	5,3620326	0,024267
meth x subs	2	56	0,1541945	0,857468

Notes : meth=méthode de mise en terre; subs= type de substrat; haut = hauteur de la tige (cm) en covariable; meth x subs= interaction entre la méthode de mise en terre et le type de substrat; numDL= degré de liberté du numérateur; denDL= degré de liberté du dénominateur.

Tableau 12 : Valeurs moyennes de photosynthèse nette, de potentiel hydrique et du ratio de carbone isotopique pour chaque méthode de plantation (std= standard, pre= pré-enfoui, enf= enfoui) et type de substrat (min= minéral et org= organique). Les erreurs standard à la moyenne sont présentées entre parenthèses.

		Photosynthèse nette ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ sec}^{-1}$)	Potentiel hydrique (Kpa)	Ratio Carbone isotopique ($\text{‰ } \delta^{13}\text{C}$)
Méthode	std	5,71 (1,09)	1019,1 (268,7)	-28,478 (0,516)
	pre	5,19 (1,14)	757,0 (279,0)	-28,689 (0,531)
	enf	5,88 (1,09)	1008,2 (267,8)	-28,460 (0,517)
Substrat	min	5,12 (1,11)	966,3 (267,2)	-28,602 (0,521)
	org	6,07 (1,11)	890,0 (276,5)	-28,483 (0,522)

Discussion

Les analyses ont démontré que l'enfouissement de la tige des plants d'épinette noire lors de la plantation a significativement augmenté le nombre de racines adventives en proportion au nombre de racines total. Par contre, cela ne s'est pas traduit par une amélioration de la croissance aérienne ni de la physiologie des arbres mesurés 15 ans après plantation. Nos hypothèses de départ prédisaient une formation plus rapide des racines adventives chez les plants enfouis et pré-enfouis, entraînant un meilleur statut hydrique des plants et une croissance améliorée. Comme l'enfouissement de la tige n'a pas eu d'effet sur l'âge des racines adventives par rapport aux plants standards, il n'a donc pas favorisé le développement «plus rapide» du système racinaire adventif. Il est également intéressant de souligner le fait que la moyenne d'âge des racines adventives différait seulement de 3,6 ans entre 2006 et 2011 alors qu'une différence de cinq ans était attendue. Cela pourrait s'expliquer par l'échantillonnage aléatoire qui a sélectionné des plants avec des racines adventives qui se sont développées plus tôt dans le développement des plants échantillonnés en 2006 par rapport à ceux échantillonnés en 2011. Le temps de formation des racines adventives peut notamment varier substantiellement d'un arbre à l'autre selon les diverses conditions prédominant dans le milieu immédiat du plant (Wagg 1967). Quoi qu'il en soit, les résultats de notre étude mènent à la conclusion que l'enfouissement du collet n'est pas un facteur qui favorise un développement plus hâtif des racines adventives chez l'épinette noire.

Un autre élément de nos hypothèses de départ prédisait que le pré-enfouissement de la tige en serre avant la mise en place de la plantation favoriserait le développement des racines adventives comparativement aux plants directement enfouis sur le terrain. Cela n'a pas été le cas puisque qu'il n'y avait pas un ratio plus important de racines adventives chez les plants pré-enfouis par rapport aux enfouis. Cela pourrait s'expliquer par le fait que les plants ont été cultivés en contenant lors de la croissance en serre et que les parois étroites du contenant ont nui au développement normal des racines adventives (Chavasse et al.

1978; Scarratt 1972). Par conséquent, les plants qui avaient été pré-enfouis en serre ne semblent pas avoir pu développer un bon système racinaire adventif avant l'établissement en plantation et le retrait de leurs contenants. Cette méthode de culture en serre ne semble donc pas procurer de bénéfices supplémentaires comparativement à un enfouissement tardif effectué seulement lors de la mise en place de la plantation.

Bien que l'enfouissement de la tige modifie le système racinaire de l'épinette noire en favorisant la formation d'un plus grand nombre de racines adventives par rapport aux racines initiales, cela ne semble pas fournir d'avantages sur la croissance de la partie aérienne des épinettes noires. Cela est le cas notamment pour la hauteur et le diamètre au niveau du collet au-delà de dix années de croissance en plantation (Tableaux 2 et 4). Un taux de croissance plus élevé avait par contre été observé pour les cinq premières années de croissance chez les plants d'épinette noires dont la tige avait été enfouie (Gagnon 2002), mais d'autres recherches ayant également fait la même observation ont finalement conclu que cet effet de l'enfouissement de la tige disparaissait après les premières années de croissance (Paquette et al. 2011; Pitmann 1991). Dans l'étude de Gagnon (2002), une différence significative a été observée pour la croissance en hauteur lors des premières années de croissance. Cela semble proposer que le système racinaire adventif mieux développé que procure l'enfouissement de la tige augmente légèrement la croissance, mais seulement pour les premières années de croissance qui correspondent à la période du choc de plantation (Burdett 1990).

Nous avions émis l'hypothèse que les plants pré-enfouis et enfouis auraient un taux de photosynthèse nette supérieur et un potentiel hydrique moins négatif puisque moins stressés hydriquement. De plus, la littérature soutient que ces paramètres physiologiques ont un impact important sur le développement de la partie aérienne de l'épinette noire (Grossnickle 2000; Jobidon et al. 1998). Nous n'avons observé aucune amélioration de la capacité photosynthétique et du statut hydrique chez les plants enfouis et pré-enfouis, ce qui signifie que le développement plus abondant du système racinaire adventif observé chez ces plants n'a pas procuré d'avantages en ce qui a trait à leur performance physiologique, 15 ans après plantation. Puisqu'aucune amélioration des paramètres physiologiques n'a été

induite par l'enfouissement de la tige à moyen terme, il n'est pas surprenant qu'aucune amélioration de la croissance n'ait été observée chez ces plants.

Il est important de noter que bien que l'enfouissement n'ait pas amélioré les paramètres physiologiques et la croissance aérienne des semis, il ne leur a pas été nuisible. Il a déjà été démontré que l'enfouissement de la tige ne causait pas d'inconvénients sur la croissance chez l'épinette noire (Paquette et al. 2011). Malgré qu'aucune amélioration concernant la croissance aérienne n'ait été observée, il est cependant possible qu'une amélioration dans la répartition spatiale des racines ait été engendrée. En effet, l'enfouissement de la tige augmente la surface disponible pour la formation de nouvelles racines, ce qui pourrait favoriser une meilleure répartition spatiale de ces dernières. Un meilleur enracinement par un plus grand nombre de racines et une meilleure répartition de ces dernières autour de la tige procure un ancrage plus fort (Lindström et Rune 1999; Sheedy 1997), ce qui devrait diminuer le risque déchaussement des semis et favoriser la stabilité des plants d'épinettes noires en plantation (Watson et Tombleson 2002).

Concernant le microsite de plantation, bien que certains auteurs aient observé un meilleur développement racinaire dans un substrat organique comparativement à un substrat minéral (Bedford et Sutton 2000; Burton et al. 2000), nous n'avons pas observé de différences significatives liées au substrat dans notre étude. Cela pourrait s'expliquer par des conditions de croissance limitantes dans nos plantations. Cette situation était particulièrement présente dans le site xérique (site 2, répétitions 4 et 5) où les pénuries d'eau semblaient récurrentes (Gagnon et al. 2000). Bien qu'en milieu xérique, certains auteurs affirment que le substrat minéral peut être préférable pour le développement des jeunes plants en réduisant le stress hydrique et en favorisant les accumulations d'eau (Burton et al. 2000), aucun avantage en ce qui concerne la croissance n'a été observé chez les plants d'épinettes noires en substrat minéral. La distribution verticale des racines n'a également pas été influencée par le type de substrat, malgré une observation dans Bedford et al. (2000) où les racines d'épinettes de 10 ans avaient tendance à se développer en plus grand nombre dans la couche de substrat minéral. Dans notre étude, nous pouvons conclure que les effets du microsite de plantation étaient négligeables.

Limites de l'étude

Un facteur qui a complexifié les analyses est la grande variabilité qui existait en ce qui a trait à la taille des plants dans notre étude. Cette grande variabilité dans la hauteur des tiges et la taille du système racinaire était prédominante non seulement entre les répétitions, mais également à l'intérieur de chaque répétition. Malgré les précautions mises en place lors des analyses afin d'en tenir compte, notamment en ajoutant la hauteur des plants en covariable en guise de correction, cette variabilité pourrait avoir tout de même rendu plus difficile la détection des effets liés aux traitements de notre étude. L'épinette noire est reconnue pour sa grande plasticité, c'est à dire qu'elle a la capacité de s'adapter rapidement aux contraintes du milieu (Burns et Honkala 1990) et même à des pénuries d'eau sévères (Belien et al. 2012). Par conséquent, bien que l'enfouissement de la tige puisse être favorable lors des premières années de croissance, cet avantage ne semble pas se perpétuer au-delà du moment où les épinettes noires se sont bien établies.

Un autre facteur important à considérer dans cette étude est la compétition avec les plants naturels, qui étaient présents à l'intérieur et aux alentours du dispositif (Gagnon et al. 2000). En effet, comme le témoignent des enchevêtrements au niveau des racines, certains plants sont fort probablement entrés en compétition avec d'autres épinettes noires et quelques feuillus pour les ressources. De plus, il arrivait que certains plants plus gros, naturels ou faisant partie du dispositif, projetaient de l'ombre sur des arbres-échantillons de plus petite taille situés à proximité.

Conclusion

Nous concluons donc que l'enfouissement de la tige lors de la culture en serre ou au moment de la mise en place de la plantation n'a pas d'impact significatif sur la croissance des épinettes noires plantées. Par contre, certains auteurs suggèrent que l'enfouissement

permet une amélioration du taux de survie des plants, notamment par une meilleure résistance durant les périodes de sécheresses (Stroempl 1990) et une réduction du risque de déchaussement causé par les cycles de gel et dégel (Paquette et al. 2011). Comme ces paramètres n'ont pas été étudiés ici, notre conclusion est limitée à aucun effet négatif de l'enfouissement chez les plants d'épinettes noires.

Références

Bartlett, M.S. 1937. Properties of sufficiency and statistical tests. *Proceedings of the Royal Society of London Series A* 160: p. 268-282.

Bedford, L. et Sutton, R.F. 2000. Site preparation for establishing lodgepole pine in the sub-boreal spruce zone of interior British Columbia: the Bednesti trial, 10-year results. *Forest Ecology and Management* 126(2): p. 227-238.

Bedford, L., Sutton, R.F., Stordeur, L. et Grismer, M. 2000. Establishing white spruce in the boreal white and black spruce zone - site preparation trials at Wonowon and Iron Creek, British Columbia. *New Forests* 20(3): p. 213-233.

Belien, E., Rossi, S., Morin, H. et Deslauriers, A. 2012. Xylogenesis in black spruce subjected to rain exclusion in the field. *Canadian Journal of Forest Research* 42: p. 1306-1315.

Bladon, K.D., Silins, U., Landhäusser, S.M., Messier, C. et Lieffers, V.J. 2007. Carbon isotope discrimination and water stress in trembling aspen following variable retention harvesting. *Tree Physiology* 27: p. 1065-1071.

Burdett, A.N. 1990. Physiological processes in plantation establishment and the development of specifications for forest planting stock. *Canadian Journal of Forest Research* 20: p. 415-427.

Burdett, A.N., Herring, L.J. et Thomson, C.F. 1984. Early growth of planted spruce. *Canadian Journal of Forest Research* 14: p. 644-651.

Burns, R.M. et Honkala, B.H. 1990. *Sylvics of North America: Volume 1, Conifers*. United States Department of Agriculture, Forest Service, Washington, DC, 675 p.

Burton, P., Bedford, L., Goldstein, M. et Osberg, M. 2000. Effects of disk trench orientation and planting spot position on the ten-year performance of lodgepole pine. *New Forests* 20(1): p. 23-44.

Chavasse, C.G.R., Van Eerden, E. et Kinghorn, J.M. 1978. The root form and stability of planted trees with special reference to nursery and establishment practice. pp. 54-64, dans Proceedings of the root form of planted trees symposium. British Columbia Ministry of Forests, Canadian Forestry Service, Joint Report no.8, Victoria, British Columbia. 357 p.

Dancause, A. 2008. Le reboisement au Québec. Ministère des Ressources Naturelles et de la Faune, Québec, 177 p.

DesRochers, A. et Gagnon, R. 1997. Is ring count at ground level a good estimation of black spruce age? Canadian Journal of Forest Research 27: p. 1263-1267.

DesRochers, A. et Tremblay, F. 2009. The effect of root and shoot pruning on early growth of hybrid poplars. Forest Ecology and Management 258: p. 2062-2067.

Environnement Canada, 1^{er} avril 2013. National Climate Data and Information Archive, Gouvernement du Canada, Ottawa, <http://climate.weatheroffice.gc.ca>.

Farquhar, G.D., Ehleringer, J.R. et Hubick, K.T. 1989. Carbon isotope discrimination and photosynthesis. Annual Review of Plant Physiology and Molecular Biology 40: p. 503-537.

Gagnon, É. 2002. Développement du système racinaire adventif chez des semis d'épinette noire (*Pinus mariana* (Mill.) B.S.P.) en plantation. Mémoire de Maîtrise, Université du Québec à Chicoutimi, Chicoutimi, 68 p.

Gagnon, E., Lord, D., Allaire, J. et Walsh, D. 2000. Importance du système racinaire adventif chez les semis d'épinette noire : Rapport Final pour la période 1999-2000., Université du Québec à Chicoutimi, Consortium de recherche sur la forêt boréale commerciale, Chicoutimi, 37 p.

Garralla, S. et Gajewski, K. 1992. Holocene vegetation history of the boreal forest near Chibougamau, central Quebec. Canadian Journal of Botany 70: p. 1364-1368.

Grossnickle, S.C. 2000. Ecophysiology of northern spruce species: the performance of planted seedlings, Ottawa, 407 p.

Grossnickle, S.C. 2005. Importance of root growth in overcoming planting stress. New Forests 30: p. 273-294.

Jobidon, R., Charette, L. et Bernier, P.Y. 1998. Initial size and competing vegetation effects on water stress and growth of *Picea mariana* (Mill.) BSP seedlings planted in three different environments. *Forest Ecology and Management* 103: p. 293-305.

Krause, C. et Morin, H. 2005. Adventive-root development in mature black spruce and balsam fir in the boreal forests of Quebec, Canada. *Canadian Journal of Forest Research* 35(11): p. 2642-2654.

Lamhamedi, M. et Bernier, P. 1994. Ecophysiology and field performance of black spruce (*Picea mariana*): a review. *Annales des Sciences Forestières* 51: p. 529-551.

LeBarron, R.K. 1945. Adjustement of black spruce root systems to increasing depth of peat. *Ecology* 26: p. 309-311.

Lindström, A. et Rune, G. 1999. Root deformation in plantations of container-grown Scots pine trees: effects on root growth, tree stability and stem straightness. *Plant and Soil* 217: p. 29-37.

McLain, K.M. 1981. Growth, nutrition and root development of Ontario tubelings, plugs and 3+0 bare-root black spruce. pp. 331-341, dans *Proceedings of the Canadian Containerized Tree Seedling Symposium*, Toronto, Ontario, 14-16 septembre 1981. 460 p.

Paquette, A., Girard, J.P. et Walsh, D. 2011. Deep Planting Has No Short- or Long-Term Effect on the Survival and Growth of White Spruce, Black Spruce, and Jack Pine. *Northern Journal of applied Forestry* 28(3): p. 146-151.

Paré, D., Bergeron, Y. et Lavoie, M. 2007. Relationships between microsite type and the growth and nutrition of young black spruce on post-disturbed lowland black spruce sites in eastern Canada. *Canadian Journal of Forest Research* 37(1): p. 62-73.

Parent, B. 2012. *Portrait Statistique édition 2012*. Ministère des Ressources Naturelles et de la Faune du Québec, Québec, 73 p.

Pitmann, B. 1991. Effect of planting depth on survival, growth and nutrient status of black spruce. Document non publié (Cité par Gagnon 2002). Thèse de Doctorat, University of New Brunswick, Fredericton, 92 p.

Prescott, C.E., Maynard, D.G. et Laiho, R. 2000. Humus in northern forests: friend or foe? *Forest Ecology and Management* 133(1-2): p. 23-36.

Raven, P.H. 2000. *Biologie Végétale*, Paris, 944 p.

Ritchie, G.A. et Hinckley, T.M. 1975. The pressure Chamber as an Instrument for Ecological Research. *Advances in Ecological Research* 9: p. 165-254.

Scarratt, J.B. 1972. Container size affects dimensions of White Spruce, Jack Pine planting stock. *Tree Planters' Notes* 23(4): p. 21-25.

Schwan, T. 1994. Planting depth and its influence on survival and growth, a literature review with emphasis on jack pine, black spruce, and white spruce. *Natural resources Canada, Canadian Forest Service, NEST Technical report TR-017, Cochrane, Ontario* 35 p.

Sheedy, G. 1997. La stabilité des plants en contenant: qu'en est-il exactement ? *Gouvernement du Québec, Ministère des Forêts. note de recherche forestière no. 45*, 15 p.

Stroempl, G. 1990. Deeper planting seedlings and transplants increases plantation survival. *Tree Planters' Notes* 41(4): p. 17-21.

Sullivan, P.F. et Sveinbjörnsson, B. 2011. Environmental Controls on Needle Gas Exchange and Growth of White Spruce (*Picea glauca*) on a Riverside Terrace near the Arctic Treeline. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research* 43(2): p. 279-288.

Sutton, R.F. 1967. Influence of planting depth on early growth of conifers. *Commonwealth Forestry Review* 46(4): p. 282-295.

Sutton, R.F. 1995. Advantages of deep planting black spruce. *Canadian Forest Service, Sault-Ste-Marie, Ontario.*, 3 p.

Thiffault, N., Roy, V., Prégent, G., Cyr, G., Jobidon, R. et Ménétrier, J. 2003. La sylviculture des plantations résineuses au Québec. *Le Naturaliste Canadien* 127(1): p. 63-80.

Trottier, F. 1998. Performance des plantations établies par le ministère des Ressources naturelles, dans les forêts publiques du Québec, de 1986 à 1995. Ministère des Ressources Naturelles, Québec, 124 p.

Wagg, J.W.B. 1967. Origin and development of white spruce root-forms. Forestry Branch, Canadian Department of Forestry and Rural Development, 1-45 p.

Watson, A.J. et Tombleson, J.D. 2002. Toppling in juvenile pines: A comparison of the root system characteristics of direct-sown seedlings, and bare-root seedlings and cuttings. *Plant and Soil* (239): p. 187-196.

Zhang, S.Y., Lei, Y.C. et Bowling, C. 2005. Quantifying stem quality characteristics in relation to initial spacing and modeling their relationship with tree characteristics in black spruce (*Picea mariana*). *Northern Journal of Applied Forestry* 22(2): p. 85-93.

Annexes

Annexe 1 : Hauteur et diamètre moyens des semis échantillonnés après 10 ans de croissance (2006) en plantation.

Répétition	Méthode	2006			
		Substrat minéral		Substrat organique	
		Haut	DHB	Haut	DHB
total	std	81,3 ± 13,5	17,2 ± 2,9	70,1 ± 11,3	13,9 ± 2,1
total	enf	88,9 ± 17,1	14,6 ± 2,8	95,7 ± 14,5	18,9 ± 3,0
total	pre	79,6 ± 11,0	14,5 ± 2,2	83,1 ± 15,1	17,1 ± 3,6
1	std	137,7 ± 36,8	29,5 ± 6,8	118,3 ± 26,6	23,7 ± 3,8
1	enf	164,7 ± 43,9	29,0 ± 7,9	137,3 ± 38,4	24,2 ± 6,5
1	pre	133,0 ± 17,2	23,4 ± 4,6	84,7 ± 5,5	14,5 ± 2,8
2	std	128,3 ± 36,4	26,6 ± 8,6	83,7 ± 16,2	17,2 ± 4,0
2	enf	76,7 ± 20,3	12,3 ± 3,1	86,3 ± 35,3	18,4 ± 7,3
2	pre	114,3 ± 14,7	22,0 ± 3,9	176,0 ± 9,0	39,9 ± 0,1
3	std	67,3 ± 3,9	16,7 ± 1,1	39,0 ± 6,4	8,3 ± 1,6
3	enf	117,7 ± 49,0	18,0 ± 5,1	128,1 ± 27,3	28,5 ± 4,9
3	pre	56,7 ± 7,2	11,7 ± 2,8	95,0 ± 33,0	20,3 ± 7,6
4	std	46,5 ± 4,7	9,0 ± 1,3	41,7 ± 4,1	8,0 ± 0,4
4	enf	45,7 ± 5,2	7,8 ± 1,6	82,3 ± 31,4	16,4 ± 7,8
4	pre	43,3 ± 10,7	7,2 ± 2,1	38,0 ± 10,0	7,7 ± 0,9
5	std	38,3 ± 1,7	7,1 ± 0,7	67,7 ± 35,7	12,6 ± 6,0
5	enf	40,0 ± 5,3	5,8 ± 0,7	44,3 ± 7,9	7,2 ± 2,2
5	pre	50,7 ± 14,0	8,1 ± 1,1	37,7 ± 9,8	7,7 ± 3,0

Notes : Haut= Hauteur de la tige en cm; DHB= Diamètre de la tige au niveau du sol en mm; std= standard, enf= enfoui, pre= pré-enfoui.

Annexe 2 : Hauteur et diamètre moyens des semis échantillonnés après 15 ans de croissance (2011) en plantation.

Répétition	Méthode	2011					
		Substrat minéral			Substrat organique		
		Haut	DHB	Haut	DHB		
total	std	126,5 ± 18,0	27,0 ± 3,8	138,0 ± 16,8	30,4 ± 4,0		
total	enf	95,7 ± 11,7	18,7 ± 2,2	132,3 ± 19,1	26,2 ± 4,0		
total	pre	112,3 ± 11,4	21,2 ± 2,3	101,5 ± 17,5	21,7 ± 4,0		
1	std	169,5 ± 31,5	38,3 ± 6,4	169,5 ± 29,7	38,5 ± 8,7		
1	enf	114,0 ± 16,3	23,3 ± 3,3	195,4 ± 42,8	40,1 ± 9,2		
1	pre	170,5 ± 19,2	32,9 ± 4,0	211,0 ± 70,3	49,5 ± 18,1		
2	std	173,3 ± 55,5	40,4 ± 12,8	198,2 ± 33,2	41,5 ± 8,1		
2	enf	143,8 ± 24,8	26,7 ± 3,5	142,0 ± 39,1	26,0 ± 7,1		
2	pre	89,6 ± 12,0	17,3 ± 2,7	145,5 ± 48,8	27,7 ± 8,4		
3	std	71,3 ± 9,8	14,9 ± 2,5	142,4 ± 46,9	33,7 ± 12,5		
3	enf	86,3 ± 19,8	18,4 ± 5,4	68,8 ± 12,5	12,7 ± 2,6		
3	pre	170,5 ± 23,6	24,3 ± 7,4	57,5 ± 19,3	10,4 ± 4,0		
4	std	65,4 ± 19,0	14,1 ± 6,1	73,6 ± 18,9	18,5 ± 6,7		
4	enf	51,4 ± 5,4	8,7 ± 0,8	68,4 ± 8,8	13,6 ± 1,5		
4	pre	82,5 ± 9,4	14,4 ± 1,5	80,2 ± 7,3	18,2 ± 3,1		
5	std	185,8 ± 65,5	34,0 ± 12,2	112,4 ± 35,3	21,5 ± 5,9		
5	enf	81,0 ± 33,9	16,0 ± 7,3	203,3 ± 60,1	41,8 ± 13,3		
5	pre	72,5 ± 8,7	12,4 ± 1,9	57,0 ± 4,8	12,8 ± 2,1		

Notes : Haut= Hauteur de la tige en cm; DHB= Diamètre de la tige au niveau du sol en mm. ; std= standard, enf= enfoui, pre= pré-enfoui.

Annexe 3 : Moyennes du nombre, de la surface et de l'âge des racines d'épinettes noires échantillonnées après 10 ans de croissance en plantation (2006).

Répétition	Méthode	Substrat minéral			Substrat organique		
		Nb de racines	Surface (mm ²)	Âge racines	Nb de racines	Surface (mm ²)	Âge racines
total	std	7 ± 1	382,9 ± 136,19	7,7 ± 0,3	5 ± 1	352,7 ± 111,42	8,9 ± 0,2
total	enf	7 ± 1	345,7 ± 104,29	8,0 ± 0,2	8 ± 1	597,8 ± 170,31	8,1 ± 0,3
total	pre	6 ± 1	326,5 ± 92,61	7,4 ± 0,4	6 ± 1	520,8 ± 189,61	7,7 ± 0,4
1	std	11 ± 3	977,9 ± 589,20	7,9 ± 0,6	8 ± 2	705,9 ± 296,47	8,8 ± 0,5
1	enf	10 ± 2	216,6 ± 82,74	7,3 ± 0,6	9 ± 1	905,3 ± 387,97	8,0 ± 0,1
1	pre	10 ± 1	660,3 ± 210,04	7,5 ± 0,6	6 ± 1	258,7 ± 88,68	6,3 ± 0,3
2	std	11 ± 3	584,3 ± 282,26	8,1 ± 0,5	6 ± 1	332,4 ± 165,28	9,2 ± 0,4
2	enf	7 ± 0	216,6 ± 82,74	7,4 ± 0,2	7 ± 1	476,8 ± 292,74	8,2 ± 0,7
2	pre	7 ± 2	680,6 ± 224,54	8,1 ± 0,6	15 ± 5	1788,5 ± 411,17	7,2 ± 0,1
3	std	7 ± 2	278,8 ± 62,30	7,1 ± 1,6	4 ± 1	88,2 ± 55,54	8,2 ± 0,4
3	enf	9 ± 3	623,8 ± 311,25	8,4 ± 0,2	12 ± 1	1274,3 ± 537,25	7,5 ± 0,6
3	pre	5 ± 1	165,6 ± 60,86	6,9 ± 0,5	5 ± 2	687,1 ± 334,21	8,1 ± 0,2
4	std	5 ± 1	116,9 ± 43,32	7,8 ± 0,8	4 ± 1	121,7 ± 29,76	9,6 ± 0,3
4	enf	4 ± 1	84,7 ± 44,22	8,4 ± 0,5	7 ± 1	255,9 ± 96,44	9,2 ± 0,8
4	pre	3 ± 1	47,8 ± 24,10	7,1 ± 1,6	4 ± 1	121,7 ± 36,45	9,6 ± 0,4
5	std	4 ± 1	45,3 ± 23,59	7,5 ± 0,0	5 ± 3	431,4 ± 385,94	9,0 ± 0,5
5	enf	2 ± 1	30,3 ± 20,19	8,3 ± 0,5	5 ± 2	76,6 ± 57,56	7,9 ± 0,7
5	pre	4 ± 1	78,1 ± 18,41	7,3 ± 0,8	3 ± 2	89,6 ± 77,23	7,8 ± 1,6

Notes : nb = nombre moyen de racines, surface=surface transversale totale des racines en mm², Âge racines=nombre d'années de croissance; std= standard, enf= enfoui, pre= pre-enfoui.

Annexe 4 : Moyennes du nombre, de la surface et de l'âge des racines d'épinettes noires échantillonnées après 15 ans de croissance en plantation (2011).

Répétition	Méthode	Substrat minéral			Substrat organique		
		Nb de racines	Surface (mm ²)	Âge racines	Nb de racines	Surface (mm ²)	Âge racines
total	std	8 ± 1	1139,5 ± 255,6	12,1 ± 0,3	7 ± 1	998,1 ± 293,5	11,6 ± 0,3
total	enf	8 ± 1	530,3 ± 129,3	11,4 ± 0,3	6 ± 1	538,4 ± 113,1	11,2 ± 0,2
total	pre	8 ± 1	983,3 ± 359,5	11,5 ± 0,3	6 ± 1	805,7 ± 229,2	11,5 ± 0,5
1	std	11 ± 2	1346,2 ± 327,8	11,3 ± 0,4	11 ± 3	2170,8 ± 913,9	11,7 ± 0,2
1	enf	12 ± 2	1071,5 ± 402,0	10,6 ± 0,3	8 ± 2	778,3 ± 229,1	10,8 ± 0,3
1	pre	13 ± 2	2637,4 ± 1096,6	11,5 ± 0,4	12 ± 2	1838,1 ± 807,4	11,2 ± 0,2
2	std	10 ± 2	2812,4 ± 1115,2	12,1 ± 0,7	9 ± 2	1984,1 ± 930,5	11,2 ± 0,5
2	enf	7 ± 1	372,8 ± 166,2	10,9 ± 0,4	8 ± 0	1039,8 ± 322,2	10,8 ± 0,5
2	pre	9 ± 1	836,4 ± 316,2	11,8 ± 0,3	5 ± 0	1005,8 ± 322,6	11,9 ± 0,9
3	std	9 ± 2	1125,4 ± 567,5	12,4 ± 0,6	6 ± 2	475,9 ± 359,7	11,7 ± 1,0
3	enf	10 ± 2	808,1 ± 371,0	12,1 ± 0,7	6 ± 1	419,4 ± 126,1	11,7 ± 0,4
3	pre	4 ± 1	72,5 ± 6,1	11,2 ± 0,6	5 ± 1	1110,1 ± 807,8	13,1 ± 1,2
4	std	5 ± 1	290,9 ± 126,3	12,1 ± 1,2	7 ± 2	441,7 ± 193,9	11,6 ± 0,6
4	enf	6 ± 1	231,3 ± 61,3	11,9 ± 1,0	4 ± 0	84,1 ± 20,2	11,8 ± 0,4
4	pre	5 ± 2	176,0 ± 78,5	11,5 ± 1,4	6 ± 2	140,1 ± 45,5	11,4 ± 0,9
5	std	7 ± 2	656,3 ± 427,8	12,7 ± 0,5	5 ± 1	152,4 ± 43,9	11,7 ± 1,1
5	enf	6 ± 1	146,3 ± 36,6	11,8 ± 1,3	6 ± 2	453,7 ± 344,7	10,5 ± 1,0
5	pre	6 ± 1	175,9 ± 67,7	11,1 ± 0,7	5 ± 2	448,4 ± 350,6	10,0 ± 1,1

Notes : nb = nombre moyen de racines, surface=surface transversale totale des racines en mm², Âge racines=nombre d'années de croissance; std= standard, enf= enfoui, pre= pré-enfoui.