

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

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

PAR
MÉLANIE BOUCHARD

**LE SYSTÈME RACINAIRE DU PIN GRIS EN PLANTATION ÂGÉ DE
18 À 25 ANS**

Janvier 2014

RÉSUMÉ

Le pin gris est la deuxième espèce d'arbre principalement plantée au Québec et la production des semis pour la plantation est essentiellement produite en récipient. La culture en récipient à parois rigides engendrerait des malformations importantes du système racinaire, dont les malformations pourraient induire l'instabilité de l'arbre occasionnant à long terme la formation d'une tige sinuuse. Pour rétablir la rectitude de sa tige, l'arbre produit du bois de compression, qui est reconnu pour sa faible résistance mécanique. L'objectif principal de cette étude visait à établir un lien entre le développement racinaire du pin gris en plantation et la croissance et la qualité de la tige (forme et bois de compression), et ce en fonction de trois types de cultures, deux en récipients (45-110 et 67-50) et une méthode de production à racines nues. À cette fin, 40 tiges dominantes ainsi que leur système racinaire ont été analysées. Les arbres provenaient de huit plantations âgées de 18 à 25 ans. Sur le système racinaire, des informations descriptives ont été notées afin de connaître la répartition latérale, la profondeur d'enracinement ainsi que l'âge des racines. L'écart vertical a été mesuré pour évaluer la sinuosité des tiges et le bois de compression a été quantifié par une analyse de tige. En moyenne, chez les arbres étudiés, on retrouvait 31 racines par arbre, qui se départageaient à 67 % en racines horizontales et à 33 % en racines verticales et 70 % des arbres possédaient un pivot alors que des pseudopivots furent observés chez 55 % des sujets. La distribution des racines latérales autour des pins gris était relativement uniforme avec un nombre plus élevé de racines latérales retrouvées selon l'orientation Est - Ouest. L'écart vertical moyen des tiges était de moins de 3,5 cm et le faible ratio de bois de compression (4,2 %) était concentré principalement dans la section proche du sol. Le temps de résidence en récipient n'influencerait pas la croissance des racines et de la tige de façon permanente. Les premiers effets de la culture en récipient se seraient adoucis avec le temps. Nous émettons donc l'hypothèse que les malformations racinaires rapportées dans la littérature; enroulement racinaire, absence du pivot et concentration des racines le long du sillon de scarification, durant les premières années suivant la mise en terre semblent s'être estompées avec l'âge chez les pins gris dominant des plantations échantillonnées.

REMERCIEMENTS

Mes premiers remerciements vont à ma directrice Cornélia Krause pour son soutien, ses précieux conseils, sa confiance, sa grande disponibilité et pour son appui tout au long de ce projet. Ce sont ses multiples mots d'encouragements qui m'ont permis de mener à terme cette étude. Mes remerciements s'étendent également à tous les membres de son équipe de recherche, soit le personnel du Laboratoire d'écologie végétale et du Pavillon de la recherche forestière de l'UQAC. Je tiens à remercier spécialement l'équipe qui a contribué à la réalisation du projet autant pour la partie terrain que pour la partie laboratoire, un grand merci, à Pierre-Yves Plourde, Charles-Augustin Déry-Bouchard, Winna H. Landry et à Isabelle Grenon. Et surtout, je remercie Denis Walsh pour le temps précieux qu'il m'a accordé pour ses explications et conseils pour les traitements statistiques utilisés.

Je remercie particulièrement mon conjoint Martin et mes enfants Félix, Émile ainsi que la petite Mérédith, pour leur soutien moral constant, leur compréhension et la confiance qu'ils ont eue en moi pour la réussite de ce projet ; ce fut primordial dans cette grande aventure.

Un grand merci à mes amis, Jean-Pierre Girard, Isabelle Delisle et Valérie Savard pour leur soutien technique, pour leur connaissance en français ainsi que pour leur agréable compagnie.

Finalement, je remercie le Fonds québécois de la recherche sur la nature et les technologies (FQRNT) pour leur apport financier à ce vaste projet.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	II
REMERCIEMENTS	III
TABLE DES MATIÈRES	IV
LISTE DES TABLEAUX	VI
LISTE DES FIGURES	VIII
LISTE DES FORMULES	X
1. INTRODUCTION	1
ÉCOLOGIE DE L'ESPÈCE	1
PROBLÉMATIQUE	2
1.1 OBJECTIFS	10
1.2 HYPOTHÈSES	11
2. MATÉRIEL ET MÉTHODES	13
2.1 AIRE D'ÉTUDE	13
2.1.1 LOCALISATION DES PARCELLES PAR PLANTATION	15
2.2 ANALYSE DES SYSTÈMES RACINAIRES	16
2.3 ANALYSE DE LA TIGE	21
2.3.1 CROISSANCE EN VOLUME DES TIGES	21
2.3.2 L'ÉCART VERTICAL DES ARBRES	22
2.3.3 MESURE DE LA PRÉSENCE DE BOIS DE COMPRESSION	24
2.4 LE TRAITEMENT DES DONNÉES	25
2.4.1. RELIER LES CARACTÉRISTIQUES DU SYSTÈME RACINAIRE AVEC LA FORME DE LA TIGE ET LE BOIS DE COMPRESSION	27

<u>3. RÉSULTATS</u>	29
3.1 LE SYSTÈME RACINAIRE DU PIN GRIS EN PLANTATION	29
3.1.1 DÉNOMBREMENT DES RACINES	29
3.1.2 RACINES LATÉRALES PRINCIPALES ET SECONDAIRES	31
3.1.3 LA RACINE PIVOTANTE ET PSEUDOPIVOTANTE	47
3.2 CARACTÉRISATION DE LA TIGE	50
3.2.1 LES ÉCARTS VERTICAUX	50
3.2.2 LE BOIS DE COMPRESSION	53
3.3 RELATION ENTRE LE SYSTÈME RACINAIRE ET LA TIGE	55
<u>4. DISCUSSION</u>	59
4.1 SYSTÈME RACINAIRE	59
4.2 DIFFÉRENCE ENTRE LES TYPES DE PRODUCTION DE PLANTS EN RÉCIPIENT	64
4.3 INTERACTION ENTRE LE SYSTÈME RACINAIRE ET LA TIGE	67
4.4 LIMITES DE L'ÉTUDE	69
<u>5. CONCLUSION</u>	71
<u>6. RÉFÉRENCES</u>	73
<u>ANNEXE 1 : ÂGE DES RACINES</u>	80
<u>ANNEXE 2: INFORMATIONS GÉNÉRALES SUR LA CROISSANCE DES TIGES</u>	82

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Caractéristiques des sites échantillonnés.	14
Tableau 2. Résultat de l'analyse de variance (valeurs de P et du F ratio) des mesures du nombre de racines verticales et horizontales par arbre.	30
Tableau 3. Résultat de l'analyse de variance (valeurs de P et du F ratio) des mesures de la profondeur.	32
Tableau 4. Résultats des analyses de variance (valeurs de P et du F ratio) des mesures du diamètre à 0 cm et à 30 cm.	34
Tableau 5. Résultat de l'analyse bivariée (valeurs de P et du R carré ratio) pour l'interaction du diamètre moyen à 0 cm selon le type de récipient.	36
Tableau 6. Résultat de l'analyse de variance (valeurs de P et du F ratio) des mesures du volume.	38
Tableau 7. Résultats des analyses de variance (valeurs de P et du F ratio) des mesures de l'âge à 0 cm et à 30 cm.	40
Tableau 8. Analyse de variance (valeurs de P et du F ratio) des mesures de la différence (année) entre l'âge de la plantation et l'âge des racines.	41
Tableau 9. Analyse de variance (valeurs de P et du F ratio) des mesures de la vitesse de croissance.	42
Tableau 10. Analyse de variance (valeurs de P et du F ratio) de la croissance en longueur des racines latérales en fonction de la classe de profondeur.	43
Tableau 11. Résultat de l'analyse de variance (valeurs de P et du F ratio) des mesures répartition latérale.	44
Tableau 12. Résultat de l'analyse de variance (valeurs de P et du F ratio) des mesures d'orientation des racines (NSEO).	46
Tableau 13. Résultat de l'analyse de variance (valeurs de P et du F ratio) pour la variable nombre de types de racines pivotantes et pseudopivotantes.	48

Tableau 14. Résultat de l'analyse de variance (valeurs de P et du F ratio) des mesures de la vitesse de croissance des racines pivotantes et pseudopivotantes.	49
Tableau 15. Résultat de l'analyse de variance (valeurs de P et du F ratio) des mesures des écarts maximaux selon la classe de hauteur et l'orientation de l'écart.	52
Tableau 16. Résultat de l'analyse de variance (valeurs de P et du F ratio) pour la variable pourcentage de formation de bois de compression selon le type de récipient.	54
Tableau 17. Matrice d'inter corrélation entre douze variables mesurant la relation entre les systèmes racinaires et les tiges.	56
Tableau 18. L'eigenvectors (W) et le loading (L) des axes de l'analyse en composantes principales de l'analyse du système racinaire et de la tige.	57
Tableau 19. Moyenne des variables descriptives du système racinaire du pin gris en plantation, par récipients et au total.	58
Tableau 20. Âge moyen des racines à 0cm et à 30 cm selon l'ordre RP et RS.	81
Tableau 21. Caractérisation des arbres échantillonnés par site.	83
Tableau 22. Résultat de l'analyse de variance (valeurs de P et du F ratio) des mesures de la hauteur et du DHP des arbres.	83

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Caractéristiques des types de récipients et du mode de production à racines nues.	5
<hr/>	
Figure 2. Localisation des sites échantillonnages.	14
<hr/>	
Figure 3. A) Nomenclature utilisée pour la caractérisation du système racinaire. B) Termes utilisés pour la prise de mesure sur les systèmes racinaires.	17
<hr/>	
Figure 4. Mesure de la distance radiale des racines par rapport à la souche.	20
<hr/>	
Figure 5. Prise de mesure et calcul de l'écart vertical.	24
<hr/>	
Figure 6. Caractérisation de la présence de bois de compression sur une section d'arbre.	25
<hr/>	
Figure 7. Nombre moyen de racines par arbre selon leur catégorie; racine principale latérale (RP), racine latérale secondaire (RS) racine pivotante (P), et pseudopivot (PP).	30
<hr/>	
Figure 8. Profondeur moyenne des racines selon le type de production de plants; racines latérales principales (RP) et racines latérales secondaires (RS).	32
<hr/>	
Figure 9. A) Diamètre moyen des racines à l'extrémité proximale (0 cm) et à l'extrémité distale (30 cm). B) Diamètre moyen des racines à 0 cm selon le type de récipient.	34
<hr/>	
Figure 10. Régression linéaire entre la profondeur et le diamètre des racines latérales à 0 cm selon les récipients de type 67-50, 45-110 et la méthode de production à racines nues.	36
<hr/>	
Figure 11. A) Volume moyen des racines horizontales. B) Le volume moyen des racines horizontales selon le type de récipient.	38
<hr/>	
Figure 12. Âge moyen des racines à 0 cm et à 30 cm selon l'ordre racinaire; racines latérales principales (RP) et racines latérales secondaires (RS).	40
<hr/>	
Figure 13. A) Différence (année) entre l'âge de la plantation et l'âge des racines selon l'ordre racinaire; racines latérales principales (RP) et racines latérales secondaires (RS). B) et fonction du type de récipient pour les RP et RS ensemble.	41
<hr/>	
Figure 14. Moyenne générale de la croissance en longueur des racines latérales (cm/an) selon la classe de profondeur et le nombre d'observations par classe (ligne).	43

Figure 15. Répartition latérale des racines secondaires selon trois zones : 0 cm, 1 à 15 cm et 16 à 30 cm à partir de la souche.	45
Figure 16. Répartition du nombre de racines par arbre selon leur orientation; Nord, Sud, Est, Ouest.	46
Figure 17. A) Présence de racines pivotantes et pseudopivotantes. B) Présence de racines pivotantes et pseudopivotantes selon le type de production de plants.	48
Figure 18. Écart maximal observé selon la classe de hauteur.	51
Figure 19. Moyenne des écarts maximaux par arbre observés selon l'orientation Nord, Sud, Est et Ouest.	52
Figure 20. Ratio moyen de la surface du bois de compression sur les différentes sections de hauteur des arbres analysés.	54

LISTE DES FORMULES

Formule 1. Diamètre :	18
Formule 2. Volume d'un segment racinaire :	19
Formule 3. calcul du rythme de croissance	19
Formule 4. Volume d'un cône	22
Formule 5. Volume d'un arbre	22

1. INTRODUCTION

Écologie de l'espèce

Pinus banksiana Lamb., communément appelé pin gris, fait partie de la grande famille des Pinaceae qui regroupent neuf genre et 120 espèces (Victorin et al., 1995). Cette espèce colonise les forêts plus au Nord en Amérique, et elle est aussi la plus répandue au Canada (Burns et Honkala, 1990). C'est un conifère de petite à moyenne taille, pouvant atteindre à l'âge adulte, une hauteur de 20 m avec un diamètre à hauteur de poitrine de 30 cm (Farrar, 1996). Il pousse généralement dans des peuplements purs équiennes ou mélangés avec l'épinette noire (*Picea mariana* Mill.) (Burns et Honkala, 1990). C'est aussi une essence de lumière et en absence de celle-ci, il peut voir sa croissance limitée (Burns et Honkala, 1990).

Le pin gris est une espèce colonisatrice (Burns et Honkala, 1990). Il peut pousser en milieu hostile; terrains sablonneux, sols superficiels, affleurements rocheux et en pergélisol (Burns et Honkala, 1990). Il sera l'un des premiers à envahir le territoire après le passage d'un feu. Ses graines, protégées par ses cônes sérotineux, seront libérées sous l'effet de la chaleur et 95 % de celles-ci, s'établiront au cours des trois premières saisons de croissance après le passage du feu (St-Pierre et al., 1991).

Au Canada, c'est l'une des espèces forestières les plus importantes étant donné sa vaste distribution, son abondance et son rôle dans l'économie. Au Québec, il est la deuxième espèce d'arbre dominant la forêt boréale et la seconde à être exploité dans l'industrie forestière (Farrar, 1996). Son bois est recherché pour la fabrication de matériaux de construction et aussi parce qu'il est présent en grand nombre dans la forêt boréale (Burns et Honkala, 1990).

Problématique

Le reboisement

À la suite d'une coupe forestière, la régénération naturelle du pin gris n'est pas suffisante pour retrouver le stocking d'origine (Béland *et al.*, 1999; Chrosciewicz, 1988; Ruel, 1997; Tremblay *et al.*, 1987). Les semences du pin gris sont retrouvées à l'intérieur de cônes enduits d'une cire qui s'ouvrent seulement quand ils sont exposés à une température avoisinant les 50 C °. En plus, les semences doivent tomber sur un sol minéral ou un humus très mince propice à la germination pour que les semis puissent s'établir (Chrosciewicz 1990). Par conséquent, le Ministère des Ressources naturelles a recours à la plantation pour assurer le maintien des peuplements de cette espèce. De 2007 à 2008, en forêts publiques au Québec, 32,7 millions de semis de pins gris ont été plantés en moyenne (Ministère des ressources naturelles et de la faune, 2010). Le gouvernement provincial investit chaque année approximativement près de 100 millions de dollars dans les nouvelles aires reboisées, sur une superficie correspondante à 50 000 ha (Parent, 2009). Bon an, mal an, cette surface représente environ 20 % du territoire récolté (Dancause, 2008). Il est essentiel après une coupe forestière, pour assurer le maintien du pin gris, de connaître les variables qui influencent la croissance de cette espèce après plantation. Le gouvernement du Québec s'est donné des outils techniques de gestion pour réaliser des plantations les plus productives possible. Il en résulte aujourd'hui qu'une plantation réussie surpassé le rendement issu de la régénération naturelle (Dancause, 2008; Thiffault *et al.*, 2003).

La production de plants

Au Québec, on dénombre 19 pépinières forestières qui produisent des plants en récipients (Ministère des Ressources naturelles, 2013). Les récipients à parois rigides les plus communément utilisés sont : le 45-110 (récipient de 45 cavités avec carotte racinaire de 110 cm³) et le 67-50 (récipient de 67 cavités avec carotte racinaire de 50 cm³). On retrouve aussi d'autres types de récipients tels que : 113-25, 25-200, 36-200, 15-320 et le 25-310. Un faible pourcentage provient de plants cultivés à racines nues (Parent, 2009).

Les récipients de type 45-110 (Figure 1 A) possèdent de grandes cavités offrant un espace plus important à la formation de racines (Dancause, 2008). Ils conviennent aux terrains où l'on retrouve un faible pourcentage de concurrence végétale. La hauteur moyenne des plants à la livraison varie de 20 à 25 cm. Le temps de culture se situe de 1,5 à 2 ans, permettant la lignification des racines et formant une carotte plus ferme. Ainsi, les semis s'enracineront plus en profondeur, diminuant les risques de déchaussement et de stress hydrique (Dancause, 2008). Par contre, ils peuvent être sujet au soulèvement par le gel si le choix du microsite de plantation est inadéquat. (Ministère des Ressources naturelles, 2013).

Les récipients de type 67-50 (Figure 1 B) permettent de livrer des plants plus petits (15-20 cm) que ceux fournis avec le type 45-110 (Dancause, 2008). De plus, ils conviennent davantage aux terrains exempts de concurrence végétale, aux aires d'ébranchage et d'empilement ainsi qu'aux sols peu profonds ou pierreux. Aujourd'hui, le temps de culture pour un 67-50 est de 12 à 16 mois, comparativement au milieu des années 1980 où l'on produisait ce type de plant en seulement 6 à 12 mois. Ce court laps de temps ne permettait pas aux racines de se lignifier suffisamment pour avoir une carotte racinaire ferme et solide. Lors de la mise en terre, celle-ci pouvait se faire écraser et retarder ainsi la reprise de croissance de l'arbre après plantation (Dancause, 2008). Ces plants risquaient aussi le déchaussement causé par le gel si le choix du microsite de plantation n'était pas

adéquat (Ministère des Ressources naturelles, 2013).

Les plants à racines nues (Figure 1 C) sont produits en champs sur une période de trois à quatre ans (Dancause, 2008). L'extraction des plants au moment de la livraison entraîne la destruction d'une partie des racines fines et peut causer un retard de la reprise de croissance après plantation (Dancause, 2008). C'est un plant robuste, avec un taux de survie moyen après plantation de 90 à 95 %. Son diamètre est élevé et il possède un très bon rapport hauteur/diamètre. Lors de la plantation, son système racinaire dense et étalé lui procure un meilleur contact avec le sol, lui permettant d'éviter les risques de déchaussement causé par le gel. Ce type de plant est parfait pour le regarni des plantations ou pour les aires régénérées naturellement (Ministère des Ressources naturelles, 2013).

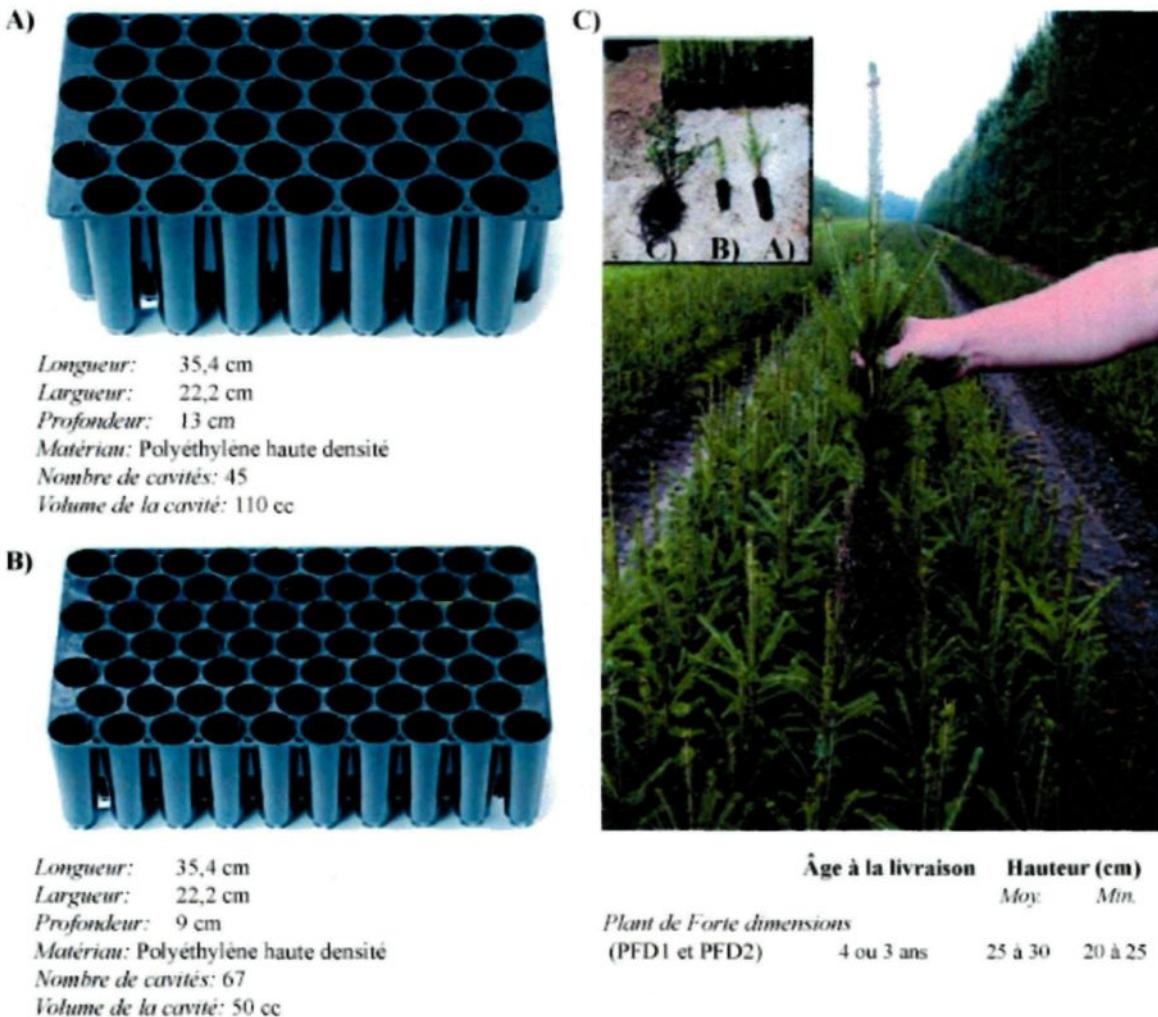


Figure 1. Caractéristiques des types de récipients et du mode de production à racines nues.
A) Récipient *IPL Rigi-pots IP 110** B) Récipient *IPL Rigi-pots IP 50** C) Plant résineux cultivé à racines nues*. La petite photo retrouvée au coin gauche représente les trois types de plants.

* Les photographies des récipients 45-110 et 67-50 proviennent de Stuewe et SonsTree Seedling Nursery Containers (<http://www.stuewe.com/products/rigipots.php>) et celle des plants à racines nues du Ministère des Ressources naturelles (<http://www.mrn.gouv.qc.ca/forets/semenages/semenages-pepinieres-sainte-luce.jsp>).

Le système racinaire du pin gris

Le système racinaire du pin gris issu de la régénération naturelle est un enracinement pivotant composé de deux types de racines : les racines fines et les racines ligneuses (Drénou, 2006). Dans ce mémoire, il sera traité exclusivement des racines ligneuses que l'on sépare en deux catégories : les racines verticales (pivotantes ou pseudopivotantes) et les racines horizontales. Les racines pivotantes servent essentiellement à la stabilité de l'arbre ainsi qu'à la recherche d'eau en profondeur (Danjon et Fourcaud, 2009). Les racines horizontales, portées par les racines pivotantes, assurent la stabilité de l'arbre, le transport et l'emmagasinement des éléments nutritifs (Drénou, 2006). Les racines horizontales se concentrent surtout dans les 50 premiers centimètres du sol, où les éléments nutritifs sont nombreux (Drénou, 2006). Ce concept s'applique non seulement pour les pins de l'Europe, mais aussi pour ceux de l'Amérique du Nord.

À la germination de la graine, la plantule émet d'abord une radicule qui s'enfonce de 13 à 25 cm dans le sol (Burns et Honkala, 1990). Ce premier pivot constitue la structure principale sur laquelle se ramifient des racines latérales. Il sera conservé jusqu'à la maturité de l'arbre (Drénou, 2006). Durant la deuxième saison, le système racinaire atteint une profondeur moyenne de 28 à 33 cm et s'étend sur une largeur de 46 à 61 cm (Burns et Honkala, 1990). Des structures secondaires émergent de ce pivot, répliquant l'organisation initiale. Lorsque l'arbre atteint une certaine dimension et que le pivot n'assure plus un maintien adéquat, des racines pseudopivotantes apparaissent sur les racines latérales principales (Danjon et Fourcaud, 2009). Cependant, seules les racines latérales, localisées sur les quinze premiers centimètres de profondeur, forment un réseau de longues racines traçantes avec un diamètre plus important que celles retrouvées plus profondément dans le sol (Danjon et Fourcaud, 2009; Plourde, 2007). La croissance du système racinaire est continue et sans égard au développement de la partie aérienne (Drénou, 2006).

Selon la littérature, les pins gris issus de cultures en récipient peuvent subir des contraintes lors de leur croissance et voir ainsi le développement de leur architecture

souterraine perturbé (Rune, 2003a; Sheedy, 1997). Par exemple, si la racine pivotante est coupée ou limitée par un obstacle durant son développement, cela peut provoquer la mort du méristème apical (Plourde, 2007). Comme le pin gris développe naturellement une racine pivotante suite à la germination; il peut être ainsi défavorisé par la culture en récipient en ce qui a trait à l'acquisition d'une bonne stabilité à long terme (Balisky *et al.*, 1995; Lindström et Rune, 1999; Rune, 2003a).

Des études ont démontré que la méthode de production de semis en récipients à parois rigides engendrait des malformations importantes au système racinaire en période juvénile, soit de la germination à environ 15 ans (Lindström et Rune, 1999; Plourde, 2007; Rune, 2003a; Sheedy, 1993). En outre, l'interaction entre les caractéristiques physiques du récipient et la physiologie du système racinaire de l'arbre est en grande partie responsable de la forme des racines après plantation chez les jeunes semis (Chapman et Colombo, 2006; Sheedy, 1996). Ces malformations peuvent affecter jusqu'à 95 % des plants de pins gris produits (Sheedy, 1997). Les principaux types de malformations sont des adaptations dues à la compression de la paroi de la cavité du récipient sur les racines. Parmi les malformations répertoriées on retrouve une absence de racine pivotante, une mauvaise répartition latérale des racines, l'enroulement des racines autour de la souche, la présence de racines fusionnées et une croissance verticale des racines horizontales (Lindström et Rune, 1999; Marquestaut, 1978; Plourde, 2007; Rune, 2003a ; Sheedy, 1997). Ces malformations sont présentes en pépinière lors de la production et peuvent persister lors de la croissance de l'arbre après plantation (Lindström et Rune, 1999). Selon Auberlinder (1982), l'effet de la croissance en récipient sur les semis ne se corrige pas avec le temps et ces malformations sont encore observables sur le système racinaire 10 ans après plantation (Plourde, 2007).

Malformations du système racinaire et conséquences pour les tiges

L'arbre possède des parties distinctes qui remplissent plusieurs fonctions essentielles à sa survie (Danjon *et al.*, 2005). La relation du complexe sol, racine et tige doit être examinée pour mieux comprendre la dynamique de ses adaptations par rapport aux contraintes de son environnement. Par exemple, les arbres provenant de plantations présentent un pourcentage plus élevé d'arbre sinueux comparativement à ceux issus de la régénération naturelle (Janas et Brand, 1988; Krause *et al.*, 2002; Sheedy, 1996) et rencontrent souvent des problèmes de stabilité à long terme (Krause et Plourde, 2008; Plourde, 2007; Thiffault *et al.*, 2003). L'étude de Sheedy (1993), portant sur la stabilité des plantations de pin gris au Québec, démontre que 5 % des arbres présentent une courbure basale alors que 2 % présentent un écart par rapport à la verticale.

D'une part, cette instabilité peut être causée par la force du vent (Balleux *et al.*, 2009; Coutts, 1983). Le vent balance de part et d'autre la tige par un phénomène pulsatoire qui agit essentiellement sur le houppier (Coutts, 1983). Par la suite, ce mouvement sinusoïdal est transmis de la tige au complexe sol racine. Ce mouvement de balancement du plateau racinaire sous l'énergie du vent peut être limité par les racines verticales et horizontales se déployant dans le sol (Atger et Edelin, 1994; Coutts, 1983). Pour accroître la résistance du plateau racinaire, l'arbre peut fusionner ses racines entre elles ou bien développer des racines adventives selon l'espèce (Atger et Edelin 1994; Drénou, 2000). Une relation a été établie entre l'instabilité des pins gris en plantation et la présence de malformations racinaires causées par la croissance en récipient (Auberlinder, 1982; Sheedy, 1991). La stabilité de l'arbre dépendrait non seulement du nombre de racines latérales, mais aussi des angles qu'elles forment entre elles (Drénou, 2000). Donc, une mauvaise répartition des racines favorise une oscillation constante ou une inclinaison permanente de la tige par rapport à la verticale (Auberlinder, 1982; Balleux *et al.*, 2009). Cette inclinaison peut entraîner la formation de bois de compression pouvant affecter jusqu'à 26 % du volume des arbres retrouvés dans de jeunes plantations âgées de 3 à 17 ans (Krause et

Plourde, 2008).

L'arbre peut réorienter en permanence sa croissance en hauteur (Auberlinder, 1982; Ruel, 1992). Ce redressement continu de la tige se fait par la formation de bois de réaction (Stokes, 1999). Chez les résineux, le bois de réaction est communément appelé bois de compression (Westing, 1965). Il se forme sur le côté opposé à la force qui est exercée sur la tige (Timel, 1986). Par exemple, du côté où il y a une pression exercée par les vents dominants, ou bien par la force de la gravité quand l'arbre est exposé dans une pente ou bien par le poids de la neige ou de la glace en hiver (Robert et Catesson, 2000; Timell, 1986; Westing, 1965). Le bois de compression possède des trachéides plus courtes aux parois plus épaisses, contenant davantage de lignine et moins de cellulose (Timell, 1986). La formation de ce type de bois, qui est plus lourd, possède un retrait axial plus grand que le bois normal. Il se caractérise par une résistance plus élevée à la compression et par un module d'élasticité plus faible (Jourez, 1997; Timell, 1986). Ces caractéristiques diminuent la résistance mécanique du bois (Timell, 1986) et elles ne sont pas souhaitables pour l'industrie forestière dont le but est de fabriquer des produits de qualité dépourvus de défaut (Jozsa et Middleton, 1997).

Le pin gris est surtout recherché dans l'industrie du bois de sciage, pour la qualité de sa surface, pour sa bonne résistance mécanique et pour ses propriétés d'usinage et de collage et pour ses qualités d'imprégnation des produits pour le bois traité (Jozsa et Middleton, 1997). De ce fait, il est important de bien comprendre le développement morphologique du système racinaire, car il conditionne la croissance et le fonctionnement de l'arbre (Drénou, 2006). La structure du système racinaire est de prime abord définie par la génétique et s'exprime complètement lorsque la croissance des racines se fait dans des sols exempts de contraintes (Danjon et Fourcaud, 2009). Le système racinaire du pin gris se développe rapidement durant les premières années suivant la germination, d'où la nécessité d'y apporter une plus grande attention et de limiter son temps de croissance en récipient (Dancause, 2008). Jusqu'à présent, peu de recherches se sont intéressées au développement

du système racinaire du pin gris en plantation (Plourde, 2007; Thorpe et Timmer, 2005). De plus, 17 % des plantations de pin gris âgées de 5 à 10 ans provenant de cultures en récipient présentent une instabilité de leurs tiges (Sheedy, 1993). Également, il existe peu d'informations sur les effets de cette pratique sylvicole à long terme, sur la croissance et le rendement de ces arbres (Prégent, 1996). Tous ces éléments amènent à s'interroger sur l'impact à long terme de ces malformations, autant au niveau de la tige que du système racinaire du pin gris en plantation.

1.1 Objectifs

Le projet vise à établir un lien entre le développement racinaire du pin gris en plantation sur sa croissance et la qualité de la tige (forme et bois de compression) en fonction de trois types de production, deux en récipients (45-110 et 67-50) et une méthode de production à racine nues. Pour y arriver, quatre sous objectifs ont été fixés.

1. Évaluer le développement spatio-temporel du système racinaire du pin gris en plantation âgée 15 à 25 ans.
2. Évaluer la dynamique de la croissance racinaire de trois types de production de plants soit : la production en récipient de type 45-110 et 67-50 ainsi que celle à racines nues.
3. Évaluer deux paramètres de la qualité du bois (forme des tiges et bois de compression).
4. Modéliser la relation entre les paramètres aériens et les caractéristiques du système racinaire incluant les trois types de production de plants.

1.2 Hypothèses

En regard de la littérature, nous émettons l'hypothèse que les systèmes racinaires des pins gris en plantation présentent plusieurs malformations, causées par la culture en récipient à parois rigides, se traduisant par des malformations irrémédiabes pouvant persister plusieurs années après plantation. Ces malformations typiques énumérées sont : l'absence de racine pivotante, la présence de racines collées après la souche et formant un amas de racines fusionnées, faible profondeur d'enracinement généralement retrouvées dans l'axe du sillon de scarification et une répartition inégale des racines autour de la tige (Plourde, 2007; Rune, 2003a; Shedd, 1997; Halter et Chanway, 1993). Ces caractéristiques visuelles des plants reboisés diffèrent de celles provenant de la régénération naturelle ou des plantations à racines nues. Tandis que le système racinaire des pins gris naturels présente un pivot long et droit, et une répartition relativement symétrique des racines autour de la souche et tout le long de la racine pivotante.

En ce qui a trait aux différentes méthodes de production, nous prévoyons que les arbres issus de la culture en récipient de type 45-110 présenteront une proportion plus importante des malformations énumérées ci-haut comparativement au plants 67-50 et à racines nues. Ce taux serait induit par un temps de résidence plus long en récipient, modulant ainsi l'architecture des racines, et par conséquent celle de la tige (Dancause, 2008; Lindström et Rune, 1999; Sheedy, 1996). Pour contrer le déséquilibre du système racinaire, nous anticipons retrouver, un nombre plus élevé de racines latérales dans les secteurs longeant les sillons de scarification (Plourde, 2007), d'un nombre plus important de racines verticales pour remplacer la disparition de la racine pivotante (Drénou, 2006; Plourde, 2007). La production de nouvelles racines sert à équilibrer le manque de stabilité occasionné par les insuffisances racinaires et le manque de pivot. Avec la présence de l'enroulement racinaire, on devrait observer un retard de croissance des racines horizontales pour les semis cultivés en récipient alors que ceux cultivé à racines nues, on ne devrait pas observer de retard de croissance du à cette malformation. Bien que les plants produits à

racines nues n'aient pas vu leur croissance racinaire limitée par le manque d'espace en récipient, ils devraient présenter un système racinaire plus court et un chevelu de racines émergées plus près du collet, puisqu'ils ont été cernés mécaniquement en champs. Cette méthode de production consiste à sectionner les longues racines afin de stimuler la ramification des petites radicelles. Par contre, ce type de traitement permet d'obtenir des plants plus robustes (Ministère des Ressources Naturelles, 2013).

La forme déficiente du système racinaire occasionne un déséquilibre entre la partie aérienne et souterraine (Halter et Chanway, 1993; Lindström et Rune, 1999; Sheedy, 1996). Comme la stabilité de l'arbre dépend essentiellement de l'ancrage des racines dans le sol, une dysfonction de cet ancrage engendrerait une forte proportion de tiges sinueuses et d'arbres inclinés par rapport à la verticale (Danjon et Fourcaud, 2009; Lindström et Rune, 1999; Rune et Warensjö, 2002). En plus, l'arbre produirait du bois de compression pour rétablir la rectitude de sa tige. Ce type de bois, reconnu pour diminuer la résistance mécanique, amènerait des conséquences à long terme sur la forme de la tige et la qualité du bois produit (Krause et Plourde, 2008). Comme les plants de types 45-110 devraient présenter des malformations aux systèmes racinaires plus importantes, ces mêmes arbres devraient aussi afficher un taux d'écart vertical et un pourcentage de bois de compression plus important que les deux autres méthodes de production de plants.

2. MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1 Aire d'étude

Les plantations sélectionnées pour cette étude étaient réparties entre le 48.6° et 49.6°N de latitude, et entre le 70.1°O et 73.3°O de longitude avec une altitude variant de 165 à 415 m (Figure 2). Elles ont été réalisées entre 1985 et 1991 dans les domaines bioclimatiques de la sapinière à bouleau blanc et de la pessière noire à mousse de l'ouest de la forêt boréale (Saucier *et al.*, 1994). Cette région est caractérisée par une température moyenne de 13 °C avec des précipitations totales de 512 mm pour la période de mai à octobre des années 1986 à 2005 (Environnement Canada, 2012).

Un total de huit plantations ont été sélectionnés à l'aide du logiciel *MapInfo professional* (MapInfo corporation, 2003), selon un ensemble de cartes écoforestières provenant de la base nationale de données topographiques développées par le Conseil canadien de géomatique (GéoBase®) (Tableau 1).. Ces cartes, mises à notre disposition par le ministère des Ressources naturelles et de la Faune, contenaient les informations relatives aux plantations de pin gris provenant de plants produits en récipient et à racines nues dans la région 02. Les critères de base pour la sélection des sites échantillons étaient l'âge, soit de 18 à 25 ans, l'accessibilité et l'exclusivité de pin gris provenant des types de production 45-110, 67-50 ou à racines nues. Afin de limiter les variations liées à la productivité du peuplement, le choix des sites s'est aussi fait suivant de critères descriptifs prédéterminés : une pente variant entre nulle à faible, un bon drainage et un sol mésique.

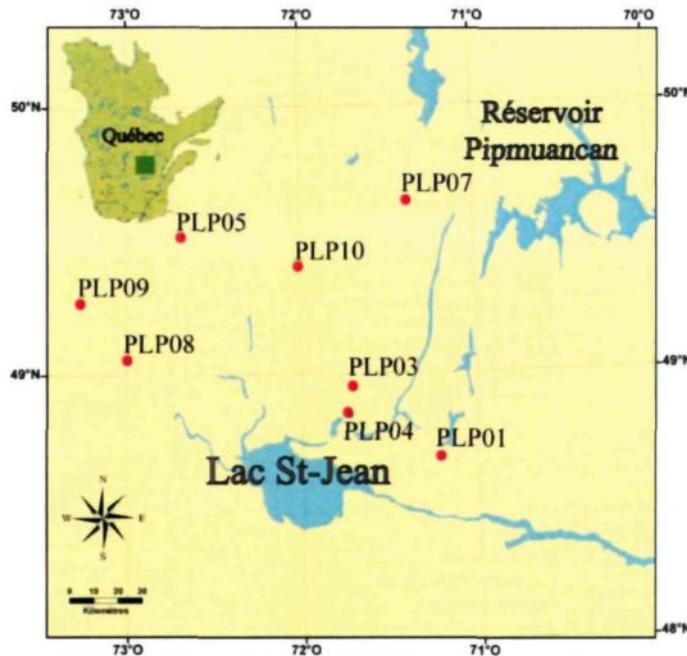


Figure 2. Localisation des sites échantillonnages.

Tableau 1. Caractéristiques des sites échantillonnés.

Site	Années de plantation	Type production de plants	Provenance	Domaine bio.	Longitude	Latitude	Altitude (m)	Tige/ha (Arbres/plantés)	Orientation sillon
PLP01	1985	Racines nues	79D72	Sapinière	71,21053	48,68372	195	2600	Est-Ouest
PLP03	1991	45-110	80K13	Sapinière	71,70847	48,94940	170	2450	Nord-Sud
PLP04	1989	45-110	83B35	Sapinière	71,73666	48,84976	165	1963	Nord-Sud
PLP05	1988	67-50	N/D	Pessière	72,68866	49,51747	330	2083	Sud E-Nord O
PLP07	1991	67-50	N/D	Sapinière	71,38306	49,64306	285	2381	Nord-Sud
PLP08	1991	67-50	N/D	Sapinière	72,99333	49,05806	365	2273	Nord-Sud
PLP09	1989	67-50	N/D	Pessière	73,25667	49,26917	364	2800	Nord-Sud
PLP10	1987	67-50	82Y28	Pessière	72,01194	49,40307	250	1852	Nord E-Sud O

2.1.1 Localisation des parcelles par plantation

À l'intérieur de chaque plantation, une parcelle d'une superficie de 200 m² (10 m X 20 m) a été établie. Afin d'assurer l'effet aléatoire de la sélection des parcelles à l'intérieur de chaque plantation, chaque parcelle fut délimitée en fonction de la proximité d'un point GPS établi préalablement et de la représentativité du peuplement. Aussi, pour contrer l'effet de bordure, les parcelles devaient se situer à plus de 50 mètres du pourtour de la plantation et de tout chemin forestier.

Les parcelles de 200 m² ont été orientées pour être perpendiculaires aux passages du scarificateur afin de couvrir le plus de sillons possible. Elles devaient contenir un minimum de 50 arbres reboisés. Les critères de différenciation entre les arbres naturels et les arbres plantés étaient basés sur l'alignement et la position de l'arbre dans le sillon. En cas de doute entre les deux, l'arbre était considéré comme étant naturel.

Chaque arbre planté se retrouvant dans la parcelle fut numéroté et mesuré selon plusieurs paramètres : le diamètre à la base (DHB) et à la hauteur de poitrine (DHP), la hauteur totale et la longueur du houppier. Les cinq arbres présentant le plus grand diamètre (DHP) et exempts de bris furent récoltés. Au total, 40 arbres avec leur système racinaire ont été rapportés au laboratoire.

2.2 Analyse des systèmes racinaires

Pour les besoins de l'étude, cinq systèmes racinaires par plantations pour un total de 40 ont été excavés manuellement sur une circonférence de 30 cm et d'une profondeur maximale d'un mètre. Avant déraciner les arbres, le Nord a été marqué sur la tige et la souche avec de la peinture, afin d'identifier la répartition spatiale des racines. Une fois les systèmes racinaires extraits et nettoyés, toutes les racines de moins de 5 mm ont été enlevées, puisque l'étude se consacre aux racines lignifiées qui ont un rôle dans la stabilisation et l'ancreage de la tige. Les racines restantes sur la souche ont toutes été numérotées et répertoriées selon leur orientation de croissance et leur ordre de ramification (Plourde, 2007). Des variables descriptives ont été mesurées telles que : la profondeur d'enracinement, le diamètre, le volume, l'âge, la distance de ramification par rapport à la souche et l'orientation spatiale.

La structure du système racinaire a été classée en deux réseaux de croissance différents. Dans le premier, le réseau de racines plongeantes se divisait en deux catégories : la racine pivotante située sous la tige et considérée comme l'axe principal, et les racines pseudopivotantes, dont la ramification prend naissance sur les racines latérales principales. Ces dernières composent le réseau de racines horizontales, à partir duquel se ramifient les racines latérales secondaires (Figure 3A).

La profondeur d'enracinement nous renseigne sur la position verticale des racines dans le sol. Cette mesure est prise pour les racines retrouvées perpendiculairement à la racine pivotante, soit les racines latérales et pseudopivotantes. La profondeur se prend avec un ruban à mesurer (cm), à partir du haut de la souche (niveau du sol) jusqu'à l'endroit où la racine horizontale se ramifie de la racine pivotante (Figure 3B). Le haut de la souche correspond au niveau du sol. La profondeur d'enracinement de toutes les racines a été notée, puis ces résultats ont été subdivisés en classes et utilisés pour connaître l'interaction

entre la croissance en longueur des racines et la profondeur. Le nombre de racines latérales principales et secondaires des pins gris étudiés a été calculé en fonction de cinq classes de profondeur :

1. 0 à 10 cm
2. 11 à 15 cm
3. 16 à 20 cm
4. 21 à 25 cm
5. 26 à 40 cm

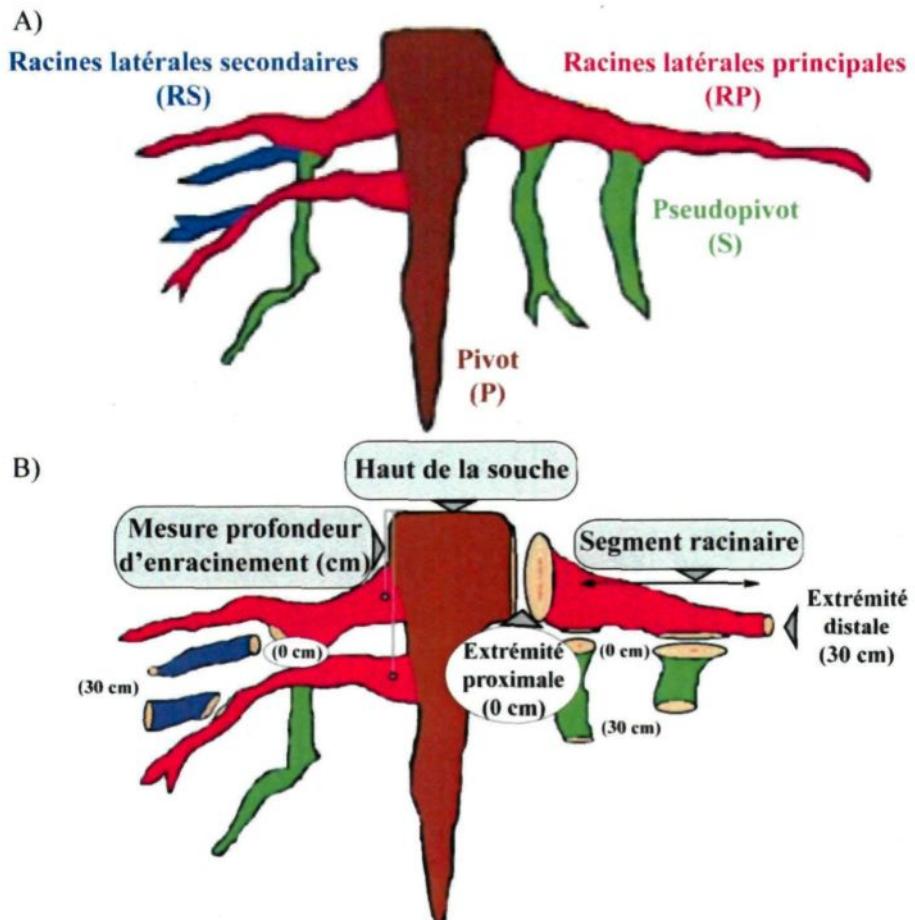


Figure 3. A) Nomenclature utilisée pour la caractérisation du système racinaire. B) Termes utilisés pour la prise de mesure sur les systèmes racinaires.

Pour mesurer le diamètre de chaque racine, toutes les racines de chaque système racinaire ont été coupées le plus près possible de la racine pivotante. Ce segment racinaire, long d'environ 30 cm comporte deux extrémités (Figure 3B). L'extrémité située près de la souche est dite proximale (0 cm) et la partie opposée est nommée extrémité distale (30 cm) (Figure 3B). En raison de la forme elliptique des racines, deux diamètres perpendiculaires de chaque extrémité ont été mesurés avec un vernier électronique. Le diamètre moyen pour chaque extrémité de la section racinaire a été calculé avec la formule suivante ($\pi * R * r$, où R et r représentent les deux rayons de l'ellipse (Paré *et al.*, 1967) (Formule 1).

(Formule 1) Diamètre :

$$diam (P \text{ ou } D) = \sqrt{\frac{\pi * diam1 * diam2}{\frac{4}{\pi}}} * 2$$

Où :

diamP = diamètre à l'extrémité proximale de la section (vers la souche, Figure 3)

diamD = diamètre à l'extrémité distale de la section (vers l'extrémité de la racine, Figure 3)

diam1 et *diam2* = diamètres mesurés sur les sections (Figure 3)

Le volume des segments racinaires correspond à un cône tronqué (Paré *et al.*, 1967). Son calcul s'établit à partir des mesures de la longueur et du diamètre des deux extrémités (Formule 2).

(Formule 2) Volume d'un segment racinaire :

$$V_{axe} = \sum_{seg=1}^n V_{seg} \text{ où } V_{seg} = \frac{\pi \cdot \text{longueur_segment} \cdot \left(\left(\frac{\text{diamP}}{2} \right)^2 + \left(\frac{\text{diamD}}{2} \right)^2 + \left(\frac{\text{diamP}}{2} \cdot \frac{\text{diamD}}{2} \right) \right)}{3}$$

L'âge des racines fut déterminé par le dénombrement des cernes sur la surface de chaque extrémité des segments racinaires. Ces surfaces ont été coupées avec une lame de rasoir puis colorées avec de la craie afin d'en faire ressortir les cernes (Schweingruber, 1989). Le décompte des cernes s'est fait sur le rayon le plus long, compte tenu de la forme elliptique de certaines racines (Ries, 1988; Plourde, 2007).

Dans cette étude, la vitesse de croissance en longueur, sur les 30 premiers centimètres des racines latérales et verticales, a été déterminée selon l'accroissement en longueur faite durant une année avec la formule suivante (formule 3).

(Formule 3) calcul du rythme de croissance

$$\frac{30 \text{ cm}}{A_1 - A_2}$$

Où : A_1 = âge à 0 cm
 A_2 = âge à 30 cm

Pour caractériser les endroits où les ramifications se font à partir de la racine pivotante, une classification en trois zones a été définie; 0, 1-15 et 16-30 cm. Dans la première, on retrouve les racines qui partent directement de la racine pivotante. Le second regroupe les ramifications retrouvées entre 1 et 15 cm, et le troisième groupe celles qui ont pris naissance au-delà de la zone de 15 cm et plus (Figure 4).

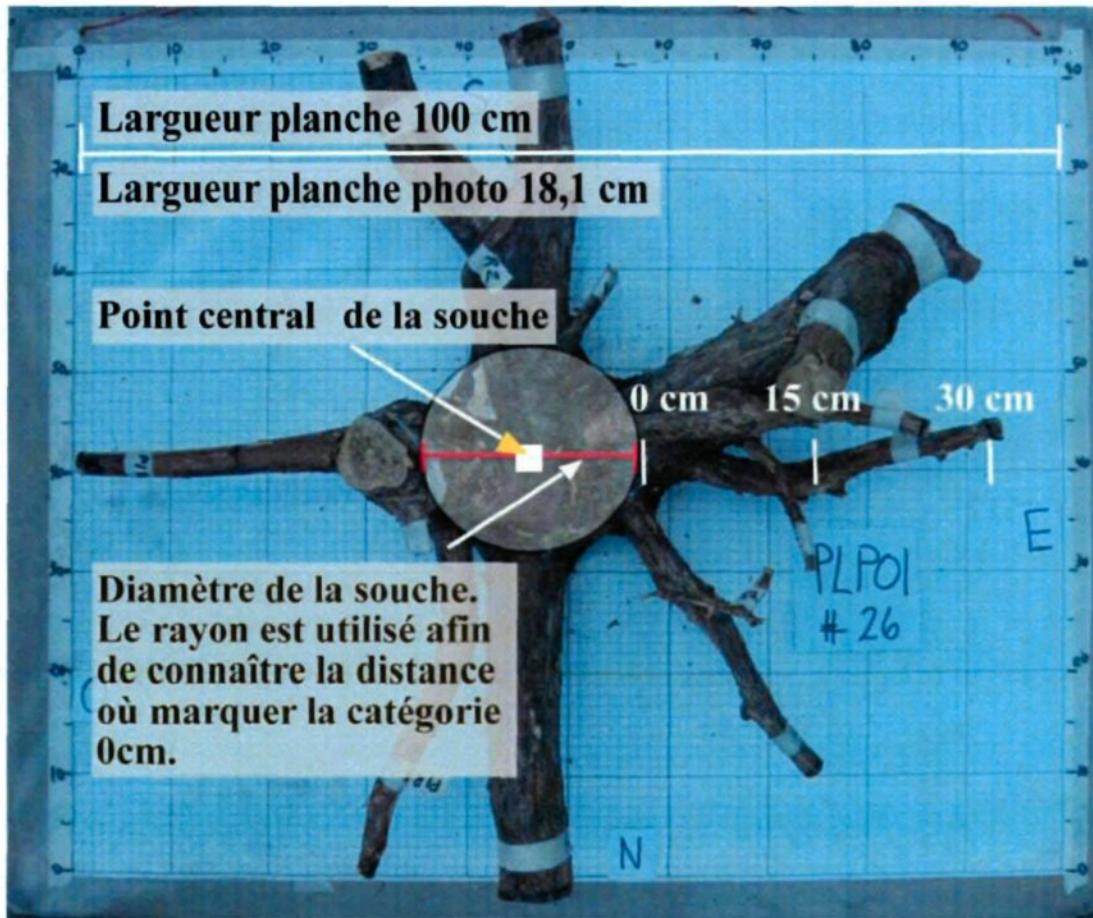


Figure 4. Mesure de la distance radiale des racines par rapport à la souche.

La croissance des racines se fait selon deux axes; vertical et horizontal (Drénou, 2006). Les racines à croissance verticale poussent vers le bas sous l'effet du gravitropisme (Raven *et al.*, 2007). Ce type de racines a été considéré comme des racines pivotantes et aucune orientation n'a été notée. Par contre, à l'aide d'un compas gradué en 360°, il fut permis de relever l'orientation des racines horizontales, le degré 0 indiquant le Nord. Il est possible de connaître leur répartition selon les points cardinaux (Figure 4).

2.3 Analyse de la tige

2.3.1 Croissance en volume des tiges

L'analyse de croissance de la tige a été faite selon les méthodes classiques de la dendrochronologie dont les étapes sont les suivantes : préparation des échantillons, mesure des cernes de croissance et l'interdatation des données (Blais, 1962; Swetnam *et al.*, 1985). Tout d'abord, les rondelles qui ont été récoltées (0 m, 0,50 m, 1 m, 1,3 m et à tous les mètres jusqu'à la cime) ont été séchées, puis finement sablées. La mesure des cernes de croissance s'est effectuée sur quatre rayons pour les rondelles situées de 0 m jusqu'à 2 m. Pour les rondelles situées au-delà de 2 m, elle s'est effectuée sur deux rayons opposés. La largeur de ces cernes a été mesurée sur tous les rayons avec le logiciel le WinDENDROTM (version, 2009b).

Les données ont été interdatées selon la méthode décrite dans Stokes et Smiley (1996) et dans Fritts (1976). Cette étape sert à valider les données avec deux méthodes différentes. La première est visuelle, et a pour but de minimiser les erreurs causées par des cernes manquants ou discontinus (Stokes et Smiley 1996). La seconde, se fait en ayant recours au programme Cofecha (Holmes, 1983). Ce logiciel permet la vérification statistique des données et l'identification de celles qui présentent des possibilités d'erreur. Il examine les corrélations entre les différents rayons d'une même rondelle, entre les rondelles d'un même arbre et entre les arbres d'une même station.

Les données vérifiées et corrigées, s'il y a lieu, ont servi aux calculs de l'accroissement annuel et cumulé en volume des tiges à l'aide du logiciel WinStemTM (version, 2003d). Ce logiciel calcule le volume du bois produit en décimètre cube (dm^3), selon la somme des cônes délimitée par deux rondelles successives (Formules 4 et 5).

(Formule 4) Volume d'un cône

$$\text{Volume d'un cône} = (R_a^2 + R_a \times R_b^2 + R_b) \cdot H \cdot \pi / 3$$

(Formule 5) Volume d'un arbre

$$\text{Volume d'un arbre} = \sum (\text{volume des cônes} / 1000)$$

Où : R_a = Rayon de la rondelle la plus basse [mm]

R_b = Rayon de la rondelle la plus haute [mm]

H = Hauteur du tronc de cône [m]

2.3.2 L'écart vertical des arbres

Afin d'évaluer et de quantifier la forme et la déformation des tiges reboisées, des mesures d'écart vertical ont été prises en forêt sur les arbres sélectionnés à l'intérieur de leur parcelle. Une planche de 2 m de haut et de 40 cm de large, comportant un quadrillage gradué au centimètre, a été employée pour prendre la mesure de l'écart vertical. Elle était placée derrière l'arbre échantillonné. L'extrémité droite de la planche était orientée soit vers le Nord ou l'Ouest et l'extrémité gauche vers le Sud ou l'Est (Figure 5). Le bas de la planche devait être posé au pied de l'arbre afin que la mesure indiquant 0 cm soit égale à la base de la tige. Selon une évaluation oculaire, le centre de la planche (axe central), marqué par une ligne noire plus épaisse, devait être ajusté avec le centre de la base de l'arbre. Un niveau a été utilisé afin de s'assurer que la planche était droite par rapport à la verticale. Une photo par orientation Nord-Sud et une autre pour Est-Ouest a été prise systématiquement.

La mesure réelle de la déviation de l'arbre selon la distance qui sépare l'axe central et le centre de l'arbre a été calculée sur une photo de l'arbre. Une conversion de la mesure de 1cm sur la planche quadrillée par opposition à 1 cm retrouvée sur l'image imprimée a été utilisée pour connaître la déviation exacte. Tout d'abord, l'axe central de la planche et le centre de l'arbre (ligne blanche) ont été déterminés tout le long de la planche, ils sont représentés par la ligne rouge pointillée (Figure 5). Ensuite, l'espacement qui séparait ces deux lignes a été mesuré systématiquement pour les trois hauteurs suivantes; 0 m, 1,30 m et 2 m, s'il n'y avait pas d'écart présent aucune valeur n'était inscrite. En plus, tous les endroits où le centre de l'arbre déviait de l'axe central ont aussi été pris en note. Finalement, la direction de la déviation était notée selon l'orientation cardinale. L'analyse de l'écart vertical s'est faite avec la valeur maximum retrouvée dans chaque classe de hauteur pour chacun des arbres, puis une moyenne des écarts verticaux maximum par classe de hauteur a été obtenue. Le même processus a été utilisé pour les écarts maximums selon l'orientation cardinale, c'est-à-dire que la valeur maximale pour chaque orientation par arbre a été utilisée dans le modèle d'analyse de variance d'où une moyenne par orientation a été extraite.

2.3.3 Mesure de la présence de bois de compression

Chez les conifères, le bois de compression se forme sur le côté opposé à la force et se distingue à un niveau macroscopique par une couleur plus foncée (Robert et Catesson, 2000; Westing, 1965). La méthode privilégiée par cette étude est celle de la détection visuelle (subjective) de la superficie occupée par sa présence sur les rondelles échantillons. Les rondelles utilisées étaient les mêmes que celle de l'analyse de la croissance radiale des tiges.

La surface occupée par le bois de compression sur la rondelle a été mesurée de façon visuelle puis à l'aide du logiciel WinDENDRO™ (version 2009 b) (Figure 6). Cette étape a été faite pour chaque cerne individuellement puis additionnée et convertie en pourcentage pour identifier le ratio de bois de compression sur chaque rondelle. Ensuite, les

ratios de toutes les autres rondelles de l'arbre ont été additionnés afin de connaître le pourcentage total de la surface des rondelles en bois de compression dans l'arbre. Nous avons utilisé cette méthode puisqu'on ne peut pas être certain que le bois de compression est réparti selon la conicité de la tige. On a préféré effectuer une analyse uniquement sur les rondelles récoltées, afin d'obtenir une données fiables et précises. Puisque les arbres récoltés présentaient des hauteurs variables, celles-ci ont été ramenées à 100% afin de représenter de façon équivalente le bois de compression tout le long de la tige. Ensuite, le ratio de bois de compression a été placé en dans l'échelle divisée en section de 10% selon la hauteur où il était retrouvé.

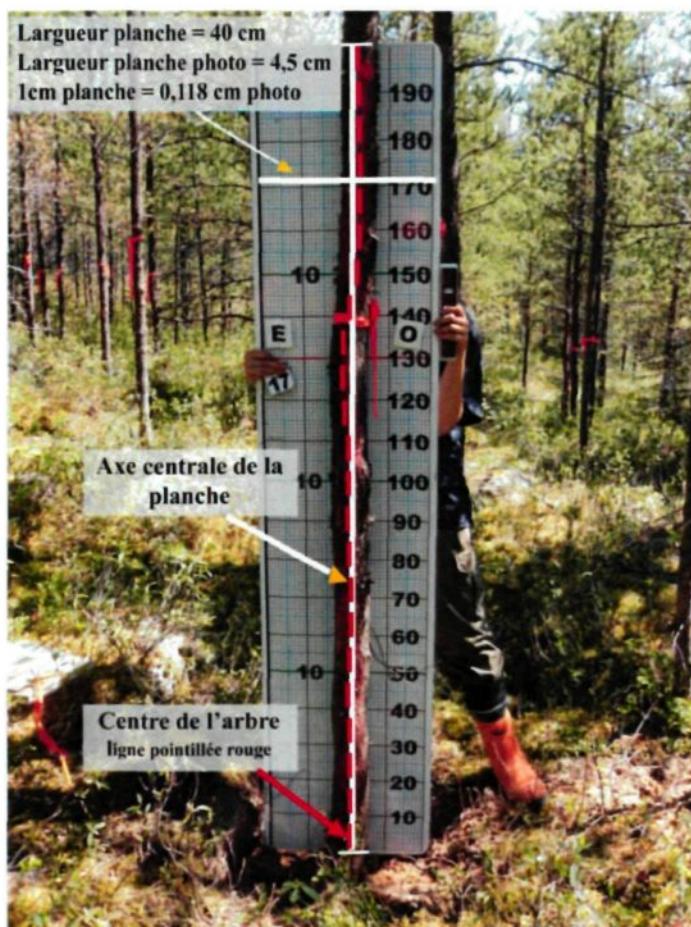


Figure 5. Prise de mesure et calcul de l'écart vertical.

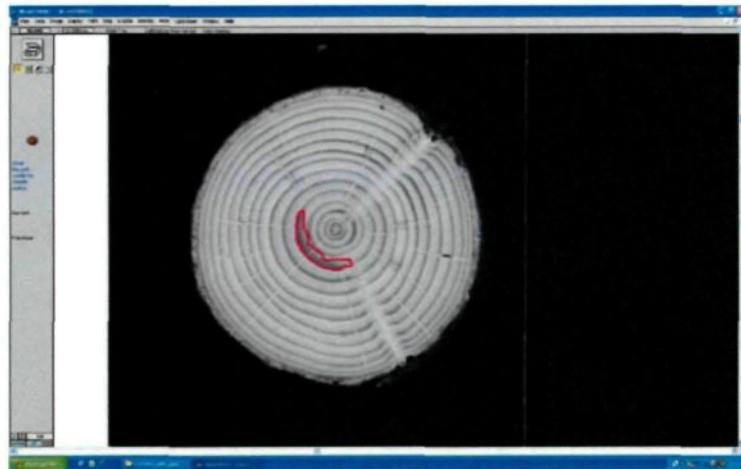


Figure 6. Caractérisation de la présence de bois de compression sur une section d'arbre.

2.4 Le traitement des données

Pour faire ressortir les différences à l'intérieur des paramètres de mesure des racines horizontales, des ANOVAs en tiroirs subdivisés (split, split plot) ont été effectuées pour les variables : dénombrement des racines, profondeur d'enracinement, diamètre à 0 cm et à 30 cm, le volume, l'âge, la différence d'âge entre l'année de plantation et l'âge des racines et la vitesse de croissance. Le modèle a été construit selon les paramètres suivants; l'ANOVA avait le facteur production de plants (45-110, 67-50, racines nues) en parcelle principale, l'effet arbre en sous-parcelle, suivi de l'ordre racinaire en sous-sous parcelle. La variable âge était ajoutée au modèle comme covariable lorsqu'elle était significative. Malgré leurs inégalités quant au nombre de plantations par type de récipient, des analyses comparatives ont été effectuées.

Afin de vérifier si la croissance des racines horizontales était symétrique autour de la tige selon les quatre points cardinaux, une ANOVA en tiroirs subdivisés (split, split plot) a aussi été utilisée. Ce modèle a été construit selon les paramètres suivants : l'ANOVA avait le facteur production de plants (45-110, 67-50, racines nues) en parcelle principale, l'ordre racinaire (racines principales et racines secondaires) en sous parcelle. L'orientation racinaire (Nord, Sud, Est, Ouest) en sous-sous parcelle.

Pour faire ressortir les différences de moyennes chez les racines verticales, des ANOVAs en tiroirs subdivisés (split plot) ont été exécutées pour les variables nombre de racines verticales et vitesse de croissance. Le modèle a été construit selon les paramètres suivants : le facteur production de plants en parcelle principale (45-110, 67-50, racines nues), le type de racines verticales (pivotantes et pseudopivotantes) en sous-parcelle.

Un modèle général d'analyse de variance différente a été employé pour l'interaction de la croissance en longueurs des racines latérales et avec profondeur des racines ainsi que pour la variable de la répartition latérale. Des ANOVAs en tiroirs subdivisés (split plot) ont été utilisées et avait comme parcelle principale la classe de profondeur et en sous parcelle la croissance en longueur. Pour la répartition des racines secondaires, le type de récipient était en parcelle principale et la proximité à la souche (0, 15 et 30 cm) en sous-parcelle.

Pour déterminer les différences de moyennes des écarts verticaux à différentes hauteurs sur la tige et pour le bois de compression, des ANOVAs en tiroirs subdivisés (split plot) ont été utilisées. Le modèle pour les écarts verticaux a été construit selon les paramètres suivants; l'ANOVA avait le facteur production de plants (45-110, 67-50, racines nues) en parcelle principale et l'effet direction de l'écart vertical (N,S,E,O) en sous-parcelle. Celui pour le bois de compression a été fait avec les paramètres suivants; l'ANOVA avait le facteur production de plants (45-110, 67-50, racines nues) en parcelle principale et l'effet bois de compression en sous-parcelle.

Afin de satisfaire les postulats de l'ANOVA, l'homogénéité de la variance de toutes les données était vérifiée visuellement par la distribution des résidus (Peck *et al.*, 2007; Quinn et Keough, 2002). Les analyses statistiques étaient réalisées à l'aide du logiciel JMP 7.0 (2007 SAS Institute Inc., Cary, NC) avec un seuil de significativité de 0,05 et les valeurs ont été transformées, selon la nécessité, afin de respecter les conditions d'homogénéité des variances et de normalité. Les analyses statistiques ont été appliquées selon les méthodes décrites par Zar (1984). Les différences de moyennes significatives ont été traitées avec un test du Tukey-Kramer. Toutes les moyennes présentées dans les figures appuient les modèles d'analyse de variance issue de la méthode des moindres carrés.

Les droites de régression ont été calculées par la méthode des moindres carrés et la signification de la régression pour chaque type de récipient a été évaluée par l'analyse de variance (Quinn et Keough 2002).

Afin de déterminer les différences de moyennes à différentes hauteurs sur la tige, pour les écarts verticaux, ainsi que pour le bois de compression, une ANOVA à mesure répétée a été utilisée. La structure de la matrice de covariance devait respecter la condition de Huynh-Feld pour que le test univarié soit valide (Littell, 1989; Fernandez, 1991).

2.4.1. Relier les caractéristiques du système racinaire avec la forme de la tige et le bois de compression

L'identification des variables expliquant les relations entre le système racinaire et la tige a été faite avec la méthode d'analyse en composante principale. Cette méthode permet de réduire le nombre de données à traiter tout en diminuant la redondance dans l'information expliquée par les variables. Elle met en évidence les similarités ou les

oppositions entre variables, et repère celles qui sont les plus corrélées (Iezzoni et Pritts, 1991; Quinn et Keough, 2002).

Selon l'utilisation du critère de Kaiser (1960), la variance totale dans la matrice de corrélation correspond à la somme des variances ou de l'inertie de chaque variable. De plus, l'extraction des composantes, pouvant le mieux expliquer l'analyse doit s'arrêter dès qu'une valeur propre devient inférieure ou égale à 1,0. Si aucune valeur propre supérieure à 1,0 n'est retrouvée, alors l'analyse en composante principale n'est pas significative. Les variables qui ont un coefficient faible, soit en bas de 0,5 ne peuvent servir à l'interprétation puisqu'elles ne sont pas bien représentées. Ce type de graphique circulaire, permet de visualiser les groupes de variables très corrélées entre elles et de voir le poids de ces variables dans l'interprétation d'un facteur. Dans le cadre de cette analyse, la variance totale présente dans les données est de 12,0 puisqu'on y retrouve les douze variables suivantes : l'âge de la plantation, l'âge et le diamètre des racines à 0 cm, le volume du segment racinaire, la profondeur d'enracinement, le nombre de racines par arbre, la hauteur de l'arbre et du houppier, le diamètre à la base et le diamètre à hauteur de poitrine de la tige, l'écart vertical (déviation) et le pourcentage de bois de compression.

3. RÉSULTATS

3.1 Le système racinaire du pin gris en plantation

3.1.1 *Dénombrement des racines*

Le nombre moyen de racines latérales principales, secondaires, pivots et pseudopivots par arbre variait d'une plantation à l'autre. En moyenne, on retrouvait 31 racines de plus de 5 mm par système racinaire (incluant les quatre catégories de racines). Le système racinaire du pin gris en plantation était composé à 67 % de racines latérales et 33 % de racines verticales (Figure 7). Les racines latérales principales sont significativement plus nombreuses que les trois autres catégories, on retrouvait en moyenne 13 racines par pin gris ($p < 0,0001$; Tableau 2). La méthode de production de plants donne un nombre équivalent de racines par arbre avec des moyennes de 13 (racines nues), 14 (67-50) et de 11 (45-110) ($p = 0,78$; Tableau 2).

Tableau 2. Résultat de l'analyse de variance (valeurs de *P* et du F ratio) des mesures du nombre de racines verticales et horizontales par arbre. Les facteurs significatifs sont indiqués en caractères gras.

Source	dl ¹	ddl ²	F ratio	Prob. > F
Type de production de plants	2	5,385	0,2489	0,7881
Ordre racinaire ³	3	84,33	17,6699	<, 0001
Type production de plants* Ordre racinaire ³	6	83,61	0,7246	0,631

1 = Degré de liberté

2 = Degré de liberté au dominateur

3 = L'ordre racinaire comprend : les racines principales, secondaires, pivotantes et pseudopivotantes

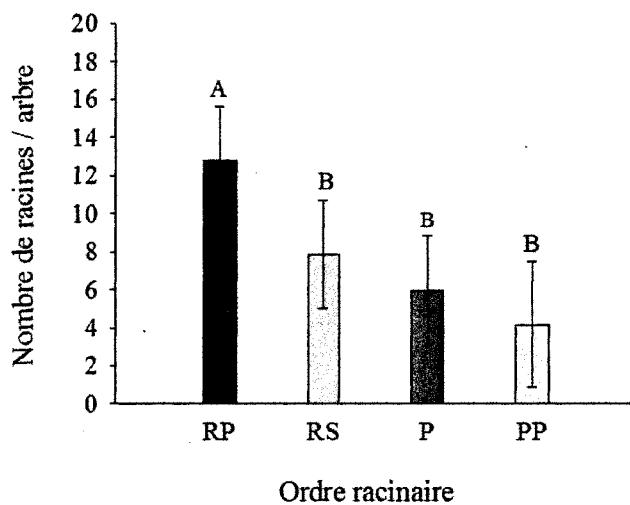


Figure 7. Nombre moyen de racines par arbre selon leur catégorie; racine principale latérale (RP), racine latérale secondaire (RS) racine pivotante (P), et pseudopivot (PP). Les barres avec les mêmes lettres indiquent les différences révélées par le test de comparaisons multiples de Tukey-Kramer.

3.1.2 Racines latérales principales et secondaires

Profondeur d'enracinement

La profondeur d'enracinement des racines horizontales est similaire (Figure 3b), celles des racines latérales principales (RP) était en moyenne de 13,6 cm, alors que celle des racines latérales secondaires (RS) de 14 cm. Par contre, la profondeur où se ramifient les racines latérales sur la souche était significativement différente d'un type de récipient à l'autre ($p=0,0102$; Tableau 3). Ce sont les racines de pins gris produits en récipient de type 67-50 qui sont les plus profondes, soit 10 cm de plus creux que les 45-110 et 5 cm de plus que les plants produits à racines nues (Figure 8).

Tableau 3. Résultat de l'analyse de variance (valeurs de *P* et du F ratio) des mesures de la profondeur. Les facteurs significatifs sont indiqués en caractères gras.

Source	dl ¹	ddl ²	F ratio	Prob. > F
Type production de plants	2	5,072	12,918	0,0102
Ordre RP/RS	1	818,7	0,6137	0,4336
Ordre RP/RS*Type production de plants	2	819,5	0,3421	0,7104

1 = Degré de liberté

2 = Degré de liberté au dominateur

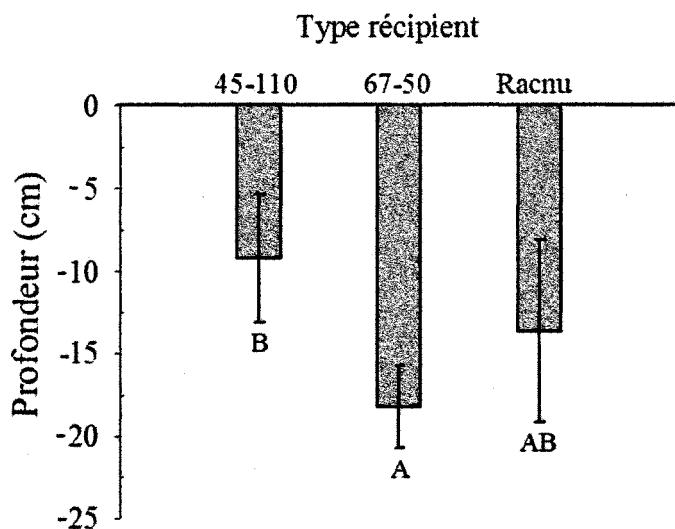


Figure 8. Profondeur moyenne des racines selon le type de production de plants; racines latérales principales (RP) et racines latérales secondaires (RS). Les barres avec les mêmes lettres indiquent les différences révélées par le test de comparaisons multiples de Tukey-Kramer.

Le diamètre des racines latérales

L'analyse de variance au Tableau 4 montre que les racines latérales secondaires présentaient un diamètre significativement plus petit que les racines latérales principales ($p<0,0001$; Tableau 4). La différence du diamètre moyen des racines de pin gris était significativement différente selon la méthode de production de plants utilisée avec des valeurs respectives de p à 0 cm de 0,0006 (Figure 9B) et de 0,0019 à 30 cm (Tableau 4). Selon les résultats du test de Tukey-Kramer, les arbres produits à racines nues affichaient la moyenne de diamètre la plus élevée. Les racines latérales principales du pin gris avaient un diamètre moyen à l'extrémité proximale (0 cm) de 41 mm et de 21 mm pour l'extrémité distale (30 cm). Cet écart représente une diminution de 49 % entre les deux extrémités (Figure 9A). Tandis que les racines latérales secondaires ont un diamètre proximal moyen de 27 mm et distal de 16 mm, ce qui équivaut à une réduction de 41 % (Figure 9A).

Tableau 4. Résultats des analyses de variance (valeurs de *P* et du F ratio) des mesures du diamètre à 0 cm et à 30 cm. Les facteurs significatifs sont indiqués en caractères gras.

Diamètre à 0 cm

Source	dl ¹	ddl ²	F ratio	Prob. > F
Type production de plants	2	6,573	27,6505	0,0006
Ordre RP/RS	1	827,5	59,4615	<, 0001
Ordre RP/RS*Type production de plants	2	827,8	1,2784	0,279

Diamètre à 30 cm

Type production de plants	2	5,916	21,7271	0,0019
Ordre RP/RS	1	833,4	26,6027	<, 0001
Ordre RP/RS*Type production de plants	2	833,7	1,3476	0,2604

1= Degré de liberté

2= Degré de liberté au dominateur

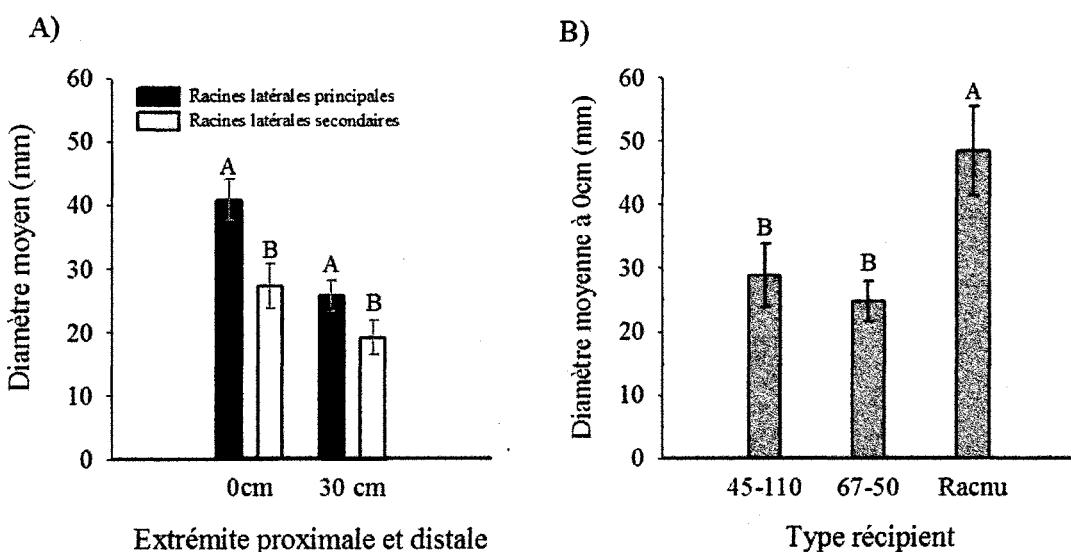


Figure 9. A) Diamètre moyen des racines à l'extrémité proximale (0 cm) et à l'extrémité distale (30 cm). B) Diamètre moyen des racines à 0 cm selon le type de récipient. Les barres avec les mêmes lettres indiquent les différences révélées par le test de comparaisons multiples de Tukey-Kramer. Dans A) 0 cm et 30 cm ont été traités séparément.

La significativité du coefficient de corrélation va dépendre largement du nombre d'individus de l'échantillon : plus il sera important ($n = 1080$) plus la corrélation, même très faible (Tableau 5), pourra être significative (Quinn et Keough, 2002). Le modèle de régression linéaire présenté à la Figure 10 montre qu'il y a une relation significative, entre la grosseur du diamètre des racines latérales et la profondeur de ramification et ce peu importe le type de récipient utilisé ($p < 0,0001$; Tableau 5). Les racines latérales qui se sont ramifiées dans les premiers 10 cm du sol possèdent un diamètre moyen à l'extrémité proximale de 39 mm comparativement à seulement 29 mm pour les racines latérales se retrouvant entre 10 cm et 25 cm de profondeur et 21 mm pour celles à plus de 25 cm dans le sol. Cette différence équivaut à une réduction de 46 % entre la première catégorie et la dernière. La diminution de la valeur du diamètre des racines latérales selon la profondeur est plus importante pour les plants de la plantation à racine nue (Figure 10). Par contre, on doit prendre en compte que le nombre d'individus par type de production de plant n'est pas équilibré entre eux, ce qui occasionnerait probablement un effet sur la relation.

Tableau 5. Résultat de l'analyse bivariée (valeurs de P et du R carré ratio) pour l'interaction du diamètre moyen à 0 cm selon le type de récipient. Les facteurs significatifs sont indiqués en caractères gras.

Type production de plants	Relation	Prob> F	R carré
45-110	Diamètre = 41,184334 - 1,1986647*Profondeur	<, 0001	0,123278
67-50	Diamètre = 41,398991 - 0,7779089*Profondeur	<, 0001	0,058888
Racnu	Diamètre = 78,598667 - 2,0518368*Profondeur	<, 0001	0,170835

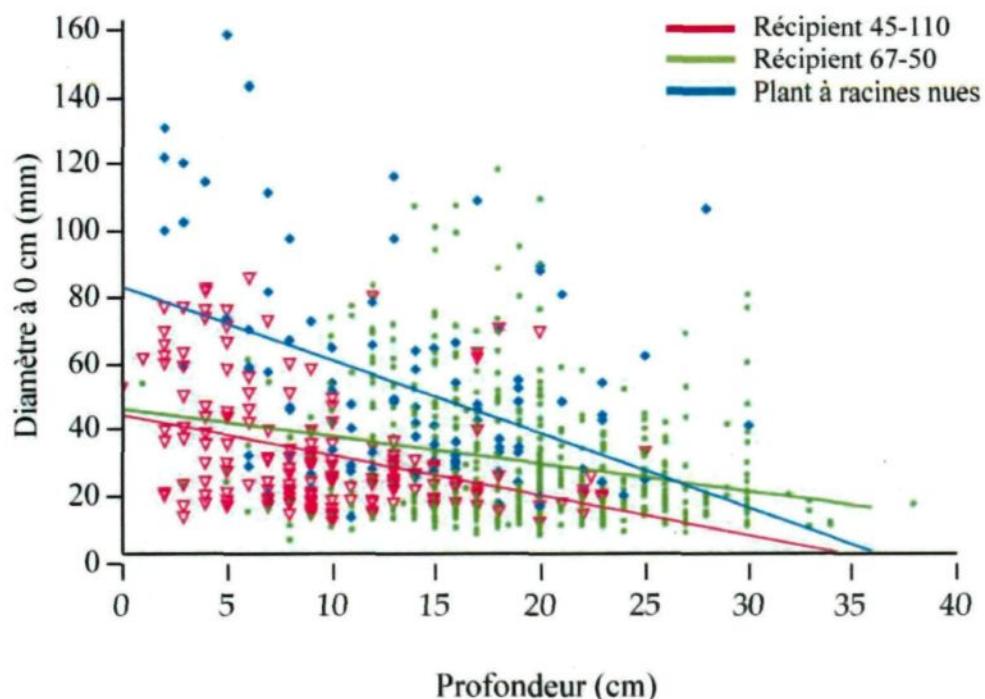


Figure 10. Régression linéaire entre la profondeur et le diamètre des racines latérales à 0 cm selon les récipients de type 67-50, 45-110 et la méthode de production à racines nues.

Volume des segments racinaires

Le volume moyen des racines latérales a été calculé avec les segments des 30 premiers centimètres récoltés sur les systèmes racinaires. En moyenne, le volume était de 34 459 mm³ pour les racines latérales principales et de 15 278 mm³ pour celui des racines latérales secondaires (Figure 11 A). Le volume des racines principales était statistiquement supérieur des racines secondaires ($p<0,0001$; Tableau 6). Le volume des racines latérales des plants produits à racines nues était significativement plus élevé pour celui produit par les deux autres types de production de plants ($p=0,0081$; Tableau 6).

Tableau 6. Résultat de l'analyse de variance (valeurs de *P* et du F ratio) des mesures du volume. Les facteurs significatifs sont indiqués en caractères gras.

Source	dl ¹	ddl ²	F ratio	Prob. > F
Type production de plants	2	5,372	13,4133	0,0081
Ordre RP/RS	1	817,7	19,5734	<, 0001
Ordre RP/RS*Type production de plants	2	818,7	1,1019	0,3327

1 = Degré de liberté

2 = Degré de liberté au dominateur

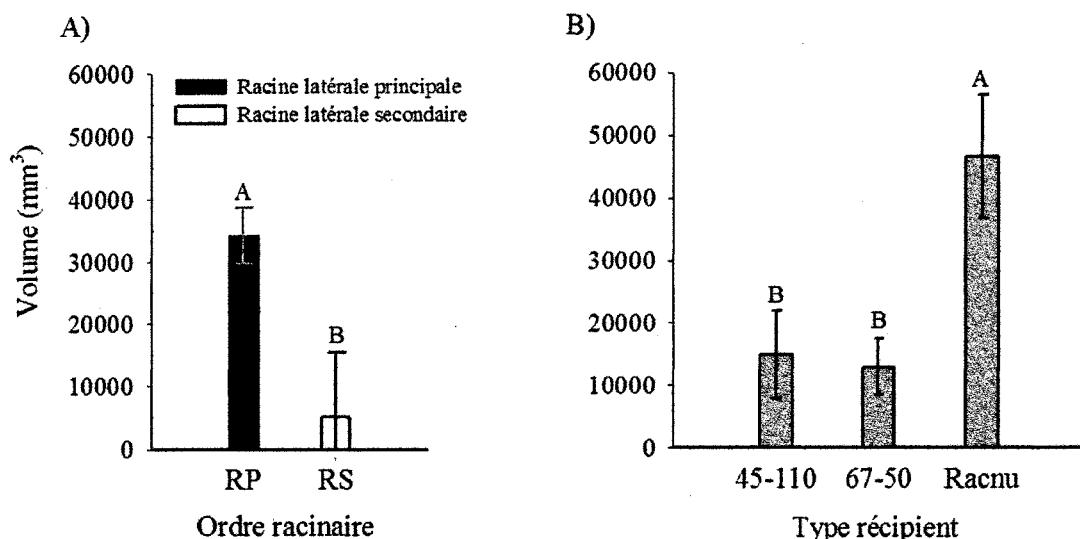


Figure 11. A) Volume moyen des racines horizontales. B) Le volume moyen des racines horizontales selon le type de récipient. Les barres avec les mêmes lettres indiquent les différences révélées par le test de comparaisons multiples de Tukey-Kramer.

Âge et croissance en longueur des racines latérales

La majorité des racines latérales principales ont émergé de la racine pivotante en moyenne deux années suivant la mise en terre des plants comparativement à trois années pour les racines latérales secondaires (Figure 12 A; $p < 0,0001$; Tableau 8). Les racines issues du récipient 67-50 ont mis en moyenne deux ans de plus que celles issues des récipients de type 45-110 pour se détacher de la racine pivotante (Figure 13 B; $p=0,0067$; Tableau 8). Si l'on regarde l'ordre d'établissement des racines latérales, on constate que seulement un pour cent des racines échantillonnées étaient déjà présentes au moment de la plantation. Par la suite, 58 % des racines sont apparues entre une et quatre années suivant la mise en terre et 40 % sont apparues au-delà de cinq ans après la plantation (Figure 13).

Tableau 7. Résultats des analyses de variance (valeurs de *P* et du F ratio) des mesures de l'âge à 0 cm et à 30 cm. Les facteurs significatifs sont indiqués en caractères gras.

Âge à 0 cm

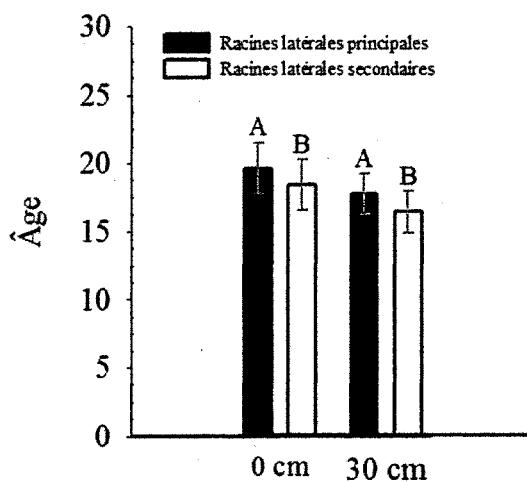
Source	dl ¹	ddl ²	F ratio	Prob. > F
Type production de plants	2	3,984	5,5485	0,0705
Ordre RP/RS	1	820,2	58,0866	<,0001
Ordre RP/RS*Type production de plants	2	821,4	2,6313	0,0726
Âge plant	1	3,744	78,197	0,0012

Âge à 30 cm

Type production de plants	2	3,411	13,4812	0,024
Ordre RP/RS	1	816,1	40,4617	<,0001
Ordre RP/RS*Type production de plants	2	817	1,8031	0,1654
Âge plant	1	2,856	91,7109	0,003

1 = Degré de liberté 2 = Degré de liberté au dominateur

A)



Extrémité proximale et distale

Figure 12. Âge moyen des racines à 0 cm et à 30 cm selon l'ordre racinaire; racines latérales principales (RP) et racines latérales secondaires (RS). Les barres avec les mêmes lettres indiquent les différences révélées par le test de comparaisons multiples de Tukey-Kramer qui a été appliqué pour les données à 0 cm et 30 cm individuellement.

Tableau 8. Analyse de variance (valeurs de *P* et du F ratio) des mesures de la différence (année) entre l'âge de la plantation et l'âge des racines. Les facteurs significatifs sont indiqués en caractères gras.

Source	dl ¹	ddl ²	F ratio	Prob. > F
Type production de plants	2	5,026	15,9361	0,0067
Ordre RP/RS	1	820,7	58,0593	<,0001
Ordre RP/RS*Type production de plants	2	822	2,6443	0,0717

1 = Degré de liberté

2 = Degré de liberté au dominateur

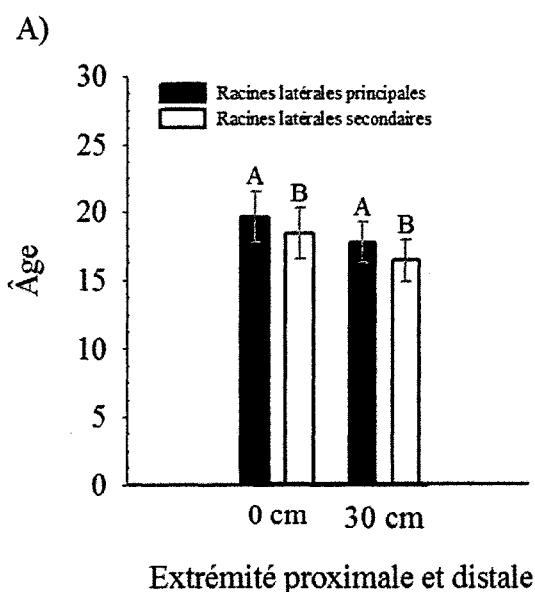


Figure 13. A) Différence (année) entre l'âge de la plantation et l'âge des racines selon l'ordre racinaire; racines latérales principales (RP) et racines latérales secondaires (RS). B) et fonction du type de récipient pour les RP et RS ensemble. Les barres avec les mêmes lettres indiquent les différences révélées par le test de comparaisons multiples de Tukey-Kramer.

La moyenne de croissance en longueur des racines latérales principales et secondaires est similaire entre les trois types de production de plants ($p=0,22$; Tableau 9). En moyenne, les racines latérales principales ont eu une croissance en longueur de 18,5 cm/an⁻¹ et les racines latérales secondaires de 17,8 cm/an⁻¹.

Les racines latérales se sont développées à un rythme significativement différent selon l'emplacement des racines ($p<0,0001$; Tableau 10). Celles retrouvées dans les premiers 10 cm du sol se sont allongées plus rapidement que celles retrouvées à plus de 15 cm de profondeur (Figure 14). La classe des 10 cm et moins a eu une moyenne d'accroissement en longueur de 22 cm/an⁻¹ comparativement de 16 cm/an⁻¹ pour les autres classes de profondeur réunies (Figure 14).

Tableau 9. Analyse de variance (valeurs de P et du F ratio) des mesures de la vitesse de croissance.

Source	dl¹	ddl²	F ratio	Prob. > F
Type production de plants	2	6,881	4,3889	0,0591
Ordre RP/RS	1	587,4	1,4693	0,2259
Type production de plants /Ordre RP/RS*	2	588,5	2,9728	0,0519

1 = Degré de liberté

2 = Degré de liberté au dominateur

Tableau 10. Analyse de variance (valeurs de *P* et du *F* ratio) de la croissance en longueur des racines latérales en fonction de la classe de profondeur. Les facteurs significatifs sont indiqués en caractères gras.

Source	dl ¹	M.S. ²	F ratio	Prob. > F
Classe de profondeur	4	3114,6393	8,6294	<,0001
Résidus	595	53 688,992		

1 = Degré de liberté

2 = M.S. = Moyen de la somme des écarts au carré

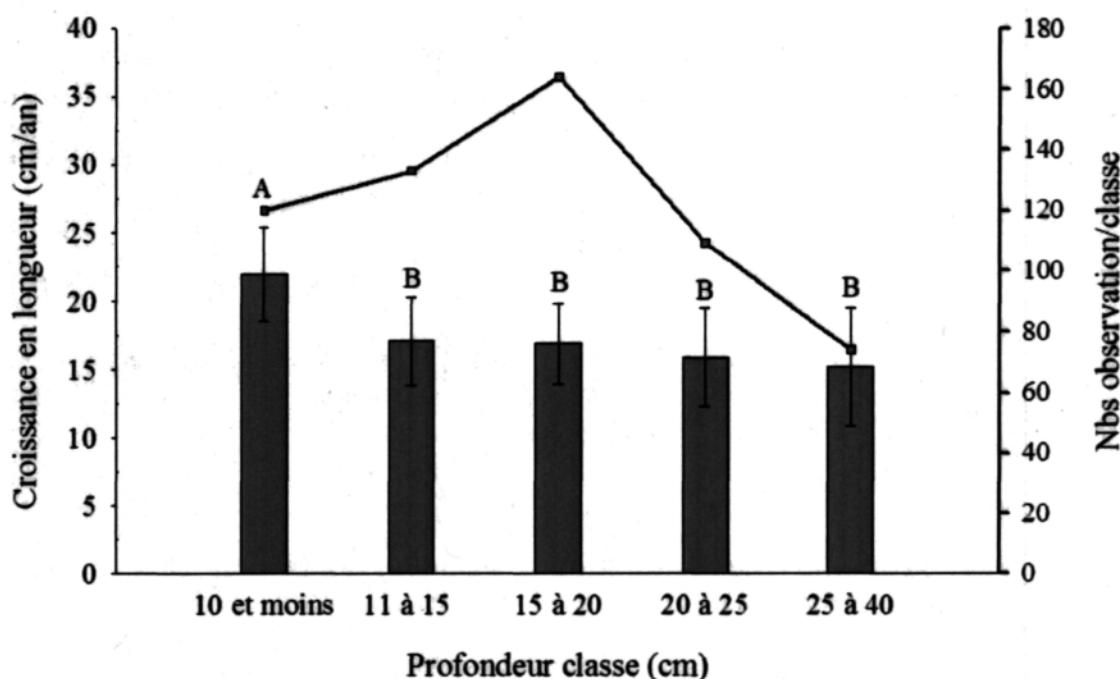


Figure 14. Moyenne générale de la croissance en longueur des racines latérales (cm/an) selon la classe de profondeur et le nombre d'observations par classe (ligne). Les barres avec les mêmes lettres indiquent les différences révélées par le test de comparaisons multiples de Tukey-Kramer.

Répartition latérale

Les racines qui se ramifient directement de la souche sont majoritairement des racines principales à 94 % et seulement 6 % sont des racines secondaires. Toutes les racines principales émergent directement de la racine pivotante. Pour les racines secondaires, 59 % se ramifient dans la zone des quinze premiers centimètres en périphérie de la souche et 31 % à plus de 15 cm (Figure 15). Les résultats de l'analyse de variance démontrent qu'il y a une différence significative dans la zone où les racines latérales secondaires ont pris naissance ($p=0,002$; Tableau 11).

Tableau 11. Résultat de l'analyse de variance (valeurs de P et du F ratio) des mesures répartition latérale. Les facteurs significatifs sont indiqués en caractères gras.

Source	dl ¹	ddl ²	F ratio	Prob. > F
Type production de plants	2	4,021	0,3209	0,7425
Proximité souche	2	46,62	7,101	0,002

1 = Degré de liberté

2 = Degré de liberté au dominateur

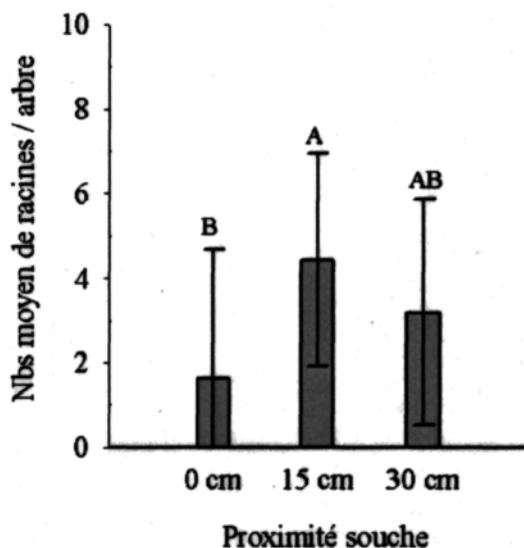


Figure 15. Répartition latérale des racines secondaires selon trois zones : 0 cm, 1 à 15 cm et 16 à 30 cm à partir de la souche. Les barres avec les mêmes lettres indiquent les différences révélées par le test de comparaisons multiples de Tukey-Kramer.

Les racines horizontales du pin gris étaient orientées à 66 % entre l'Est et l'Ouest et à 33 % entre le Nord et le Sud ($p < 0,0001$; Tableau 12). Le test de Tukey-Kramer confirme que c'est à l'Est que s'affiche un nombre significativement plus élevé de racines par arbre et, à l'inverse, c'est au Sud que le nombre le plus faible est noté (Figure 16). Nous avons aussi vérifié la répartition en fonction de l'orientation du sillon, mais aucune tendance n'a été dénotée.

Tableau 12. Résultat de l'analyse de variance (valeurs de P et du F ratio) des mesures d'orientation des racines (NSEO). Les facteurs significatifs sont indiqués en caractères gras.

Source	dl ¹	ddl ²	F ratio	Prob. > F
Type production de plants	2	5,123	0,4761	0,6462
Ordre RP/RS	1	211,3	9,691	0,0021
Ordre RP/RS* Type production de plants	2	211,9	1,5236	0,2203
Orientation NSEO	3	207,9	11,182	<, 0001
Orientation NSEO*Ordre RP/RS	3	208,1	2,9974	0,0317
Type production de plants*Orientation NSEO	6	206,7	0,7851	0,5825

1 = Degré de liberté

2 = Degré de liberté au dominateur

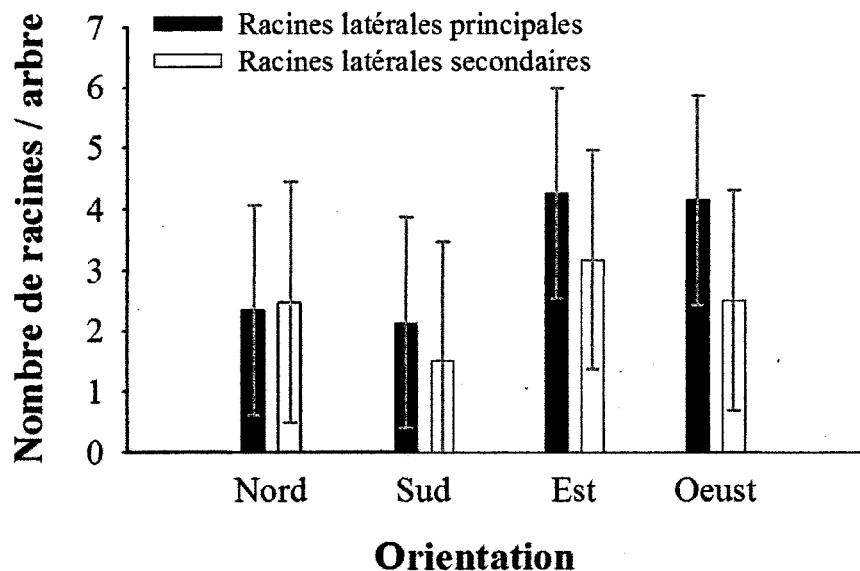


Figure 16. Répartition du nombre de racines par arbre selon leur orientation; Nord, Sud, Est, Ouest. Les barres avec les mêmes lettres indiquent les différences révélées par le test de comparaisons multiples de Tukey-Kramer.

3.1.3 La racine pivotante et pseudopivotante

Présence et absence des racines verticales

Chez le pin gris, 73 % des arbres ont arboré une racine pivotante au moment de leur extraction et moins de la moitié des arbres excavés, soit 45 %, ont développé une ou plusieurs racines pseudopivotantes (Figure 17A). Les systèmes racinaires récoltés provenant de culture en récipient de type 45-110 ont tous présenté une racine pivotante et 20 % de ces mêmes arbres ont montré une racine pseudopivotante. Chez les systèmes racinaires des plants produits en récipients de type 67-50, une tendance différente a été observée, 70 % des pins ont présenté une ou plusieurs racines pseudopivotantes et 55 %, une racine ou des racines pivotantes. Pour les plants produits à racine nue, 80 % des arbres ont présenté un pivot, et 80 %, une ou des racines pseudopivotantes (Figure 17 B). Tous les systèmes racinaires de pins gris en plantations peuvent posséder plus d'un pivot et même plusieurs pseudopivots quelque soit la méthode de culture.

Tableau 13. Résultat de l'analyse de variance (valeurs de *P* et du *F* ratio) pour la variable nombre de types de racines pivotantes et pseudopivotantes.

Source	dl ¹	ddl ²	F ratio	Prob. > F
Type production de plants	2	3,77	0,0464	0,9552
Racines pivotante et pseudopivotantes	1	34,61	0,7611	0,389
Racines pivotantes et pseudopivotantes *Type production de plants	2	33,42	0,9331	0,4034

1 = Degré de liberté

2 = Degré de liberté au dominateur

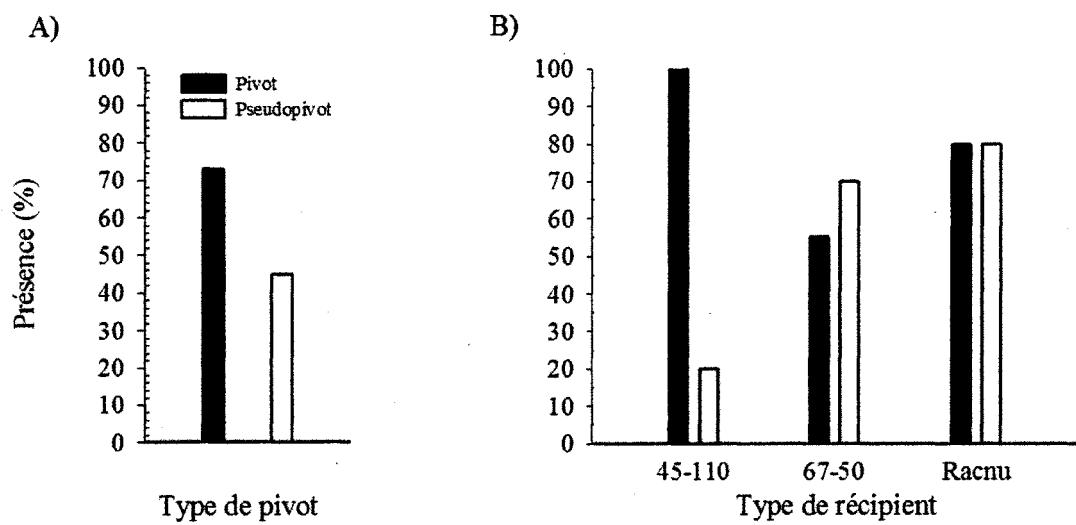


Figure 17. A) Présence de racines pivotantes et pseudopivotantes. B) Présence de racines pivotantes et pseudopivotantes selon le type de production de plants.

Croissance en longueur, racines verticales

Le rythme de croissance des deux différents types de racines verticales était similaire ($p=0,18$; Tableau 14). Le pivot a crû en moyenne à une vitesse de 12,6 cm/an comparativement à 10,5 cm/an pour les pseudopivots. Ceci représente une moyenne de croissance en longueur de 11,6 cm/an pour les racines verticales comparativement à 18,2 cm/an pour les racines horizontales. Le rythme de croissance des racines verticales similaire entre les trois types de production de plants ($p=0,63$; Tableau 14).

Tableau 14. Résultat de l'analyse de variance (valeurs de P et du F ratio) des mesures de la vitesse de croissance des racines pivotantes et pseudopivotantes.

Source	dl ¹	ddl ²	F ratio	Prob. > F
Type production de plants	2	4,283	0,5101	0,6329
Racines pivotantes et pseudopivotantes	1	56,39	1,8355	0,1809
Type production de plants *				
Racines pivotantes et pseudopivotantes	2	53,63	0,4225	0,6575

1 = Degré de liberté

2 = Degré de liberté au dominateur

3.2 Caractérisation de la tige

3.2.1 *Les écarts verticaux*

L'histogramme de la Figure 18, présentant la moyenne des écarts maximaux selon la classe de hauteur, montre des valeurs croissantes en fonction de la hauteur. Ces résultats sont significativement différents d'une classe de hauteur à l'autre ($p=0,0002$; Tableau 15). Les écarts les plus faibles étaient retrouvés dans la classe des 50 cm et moins c'est-à-dire au bas de l'arbre avec un écart moyen de 1,7 cm, tandis que la moyenne la plus élevée se retrouve dans la classe de hauteur de 151 à 200 cm avec des valeurs moyennes de 3,1 cm (Figure 18).

La moyenne des écarts maximaux est différente significativement d'une orientation à l'autre ($p=0,0213$; Tableau 15). Selon le test de Tukey-Kramer, les orientations, Est et Nord sont les directions où l'on a retrouvé les moyennes les plus élevées, soit 3,56 cm et 2,78 cm (Figure 19). Les orientations Ouest et Sud montraient quant à elles une moyenne d'écart maximal inférieure aux deux autres directions avec 2,15 et 2,03 cm (Figure 19). Aucun des trois types de production de plants étudiés ne présentait une moyenne d'écart maximale plus élevée ou inférieure aux autres ($p=0,79$; Tableau 15).

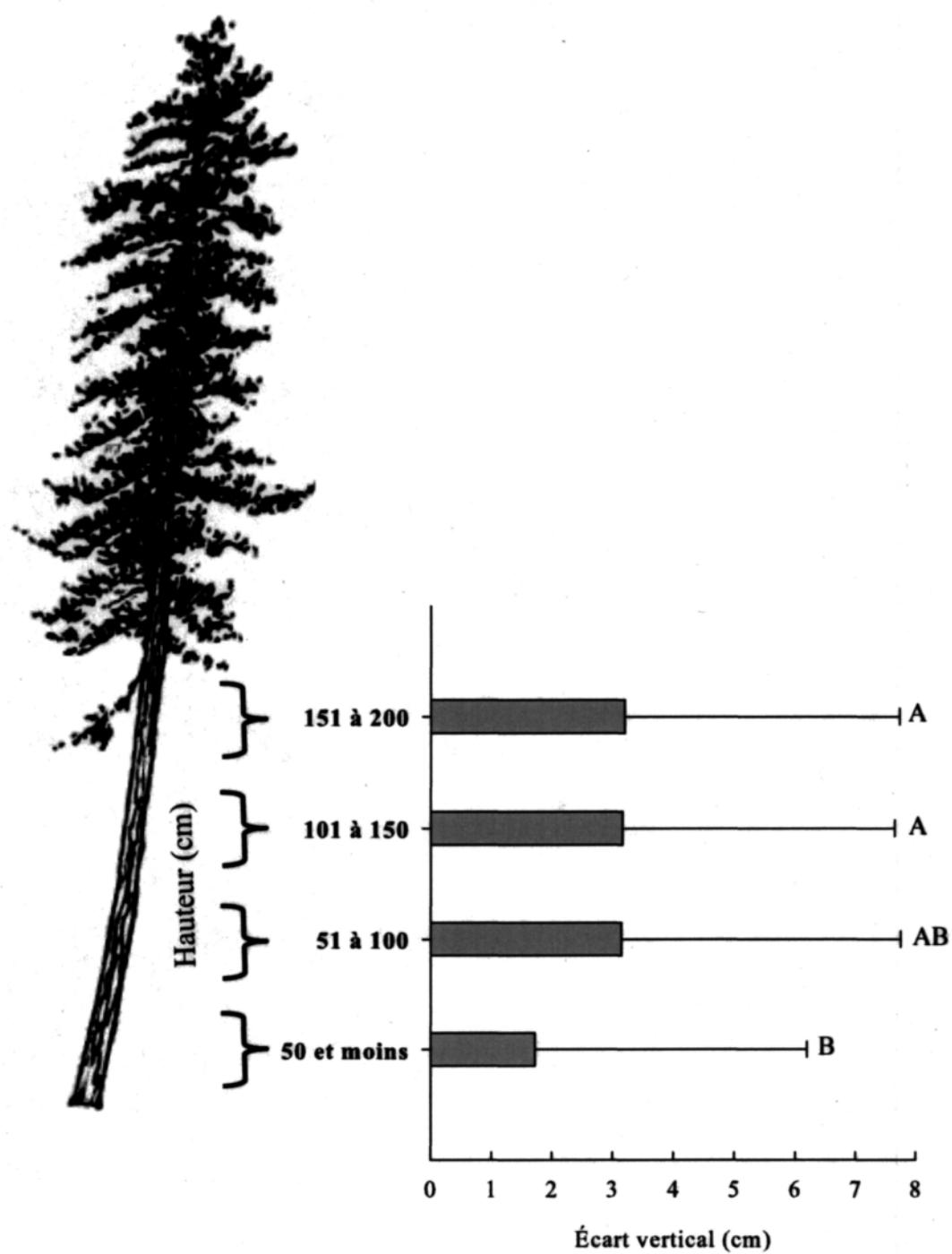


Figure 18. Écart maximal observé selon la classe de hauteur. Les barres avec les mêmes lettres indiquent les différences révélées par le test de comparaisons multiples de Tukey-Kramer.

Tableau 15. Résultat de l'analyse de variance (valeurs de P et du F ratio) des mesures des écarts maximaux selon la classe de hauteur et l'orientation de l'écart. Les facteurs significatifs sont indiqués en caractères gras.

Source	dl ¹	ddl ²	F ratio	Prob. > F
Type production de plants	2	5,008	0,2394	0,7956
Orientation	3	274,2	3,2854	0,0213
Classe hauteur	3	256	6,6539	0,0002
Orientation*classe hauteur	9	259,2	1,3492	0,2119

1 = Degré de liberté

2 = Degré de liberté au dominateur

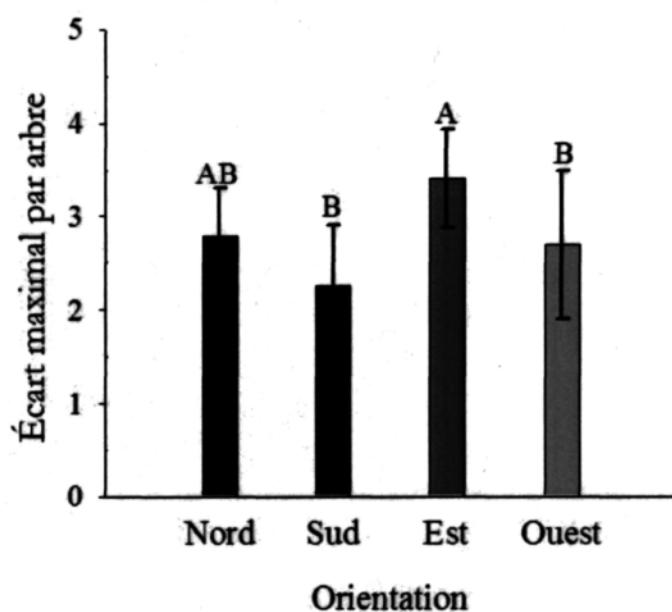


Figure 19. Moyenne des écarts maximaux par arbre observés selon l'orientation Nord, Sud, Est et Ouest. Les barres avec les mêmes lettres indiquent les différences révélées par le test de comparaisons multiples de Tukey-Kramer.

3.2.2 Le bois de compression

Afin d'éliminer les inégalités reliées aux différentes hauteurs entre les pins gris, le pourcentage de bois de compression pour l'ensemble des arbres a été calculé en hauteur relative pour chaque individu (Figure 20). C'est à la base de l'arbre que l'on retrouve une formation plus importante de bois de compression avec une moyenne de 9,7 % de bois de compression formé (Figure, 20). Ce ratio diminue plus haut sur la tige, pour atteindre le plus bas niveau de bois de compression formé, soit 1,7 % à 40 % de la hauteur relative. Par la suite, ce ratio augmentait avec la hauteur relative pour atteindre 5,2 % à 100 % de hauteur (Figure 20). Aucune différence significative entre les trois différents types de production de plants n'a été obtenue pour le pourcentage de bois de compression présent dans la tige des arbres récoltés ($p=0,3871$; Tableau 16). Les différences entre les pourcentages de hauteur n'ont pas été analysées statistiquement.

Tableau 16. Résultat de l'analyse de variance (valeurs de P et du F ratio) pour la variable pourcentage de formation de bois de compression selon le type de récipient.

Source	dl ¹	ddl ²	F ratio	Prob. > F
Type production de plants	2	6,156	1,1117	0,3871

1 = Degré de liberté

2 = Degré de liberté au dominateur

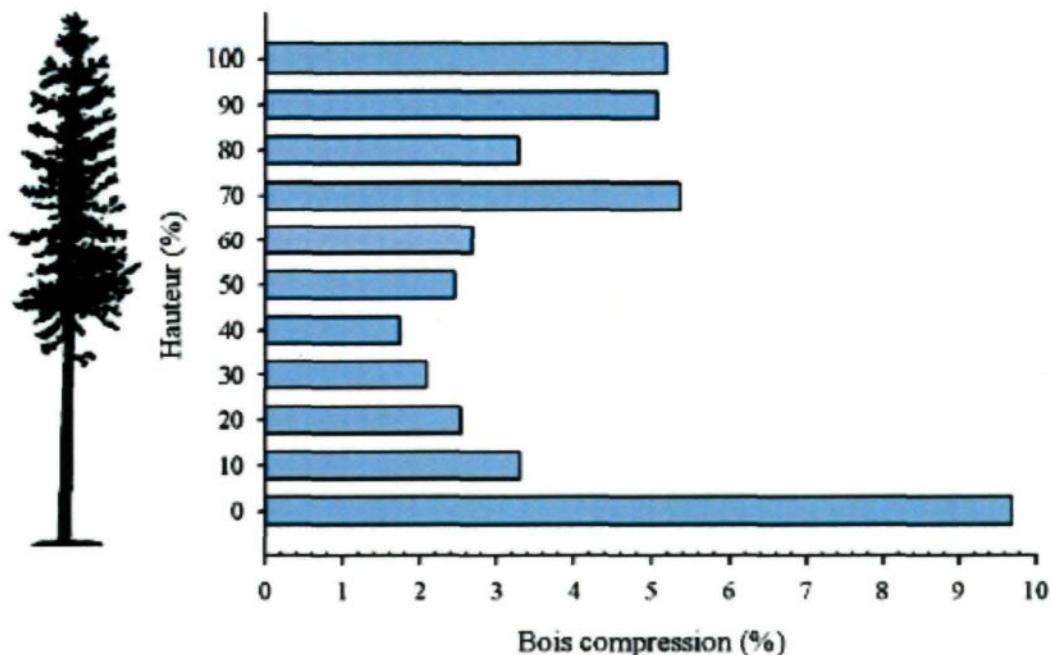


Figure 20. Ratio moyen de la surface du bois de compression sur les différentes sections de hauteur des arbres analysés.

3.3 Relation entre le système racinaire et la tige

Le tableau 17 représente la matrice des corrélations entre les variables mesurées. La grande majorité des variables sont corrélées positivement à l'exception des variables de l'écart vertical (déviation de la tige) et du pourcentage de bois de compression qui sont corrélés négativement avec toutes les autres. Les paramètres les plus fortement corrélés entre eux sont associés à l'âge de la plantation et à la croissance de l'arbre comme la hauteur, le diamètre de l'arbre et des racines ainsi que le volume et l'âge des racines (Tableau 17). Aucune relation n'a été observée entre les deux paramètres de la qualité du bois (forme des tiges et bois de compression) et les caractéristiques du système racinaire.

L'analyse en composante principale a permis de se renseigner sur les relations qu'il pouvait y avoir entre la tige et le système racinaire. Elle met en évidence une interaction entre la croissance de la tige et celles des racines. Celles-ci croissent en concomitance. Aussi, l'analyse révèle que la première composante a une valeur propre de 6,4 et explique 53,6 % de la variance totale, tandis que les deux autres composantes expriment environ 24 % de la variance des données, soit, 14,5 % et 9,3 % pour les composantes 2 et 3 respectivement (Tableau 18).

Tableau 17. Matrice d'inter corrélation entre douze variables mesurant la relation entre les systèmes racinaires et les tiges. Les corrélations affichant plus de 0,5 (r^2) sont en caractère gras.

Variables	Âge plantation	Âge racine 0cm	Hauteur arbre	Hauteur houppier	Dia. racine 0cm	DHB arbre	DHP arbre	Profondeur racine	Nbs racines arbres	Volume racines	Écart vertical	% BC
Âge plantation	1,00											
Âge racine 0cm	0,86	1,00										
Hauteur arbre	0,77	0,75	1,00									
Hauteur houppier	0,73	0,74	0,84	1,00								
Diamètre racine 0 cm	0,51	0,67	0,60	0,69	1,00							
DHB ¹ arbre	0,73	0,72	0,82	0,78	0,70	1,00						
DHP ² arbre	0,75	0,71	0,85	0,78	0,67	0,95	1,00					
Profondeur racine	0,42	0,18	0,34	0,05	-0,05	0,42	0,47	1,00				
Nbs racines arbres	0,26	0,17	0,37	0,24	-0,10	0,41	0,43	0,36	1,00			
Volume racine (RP ³)	0,54	0,67	0,65	0,75	0,96	0,73	0,70	-0,02	-0,08	1,00		
Écart vertical	-0,26	-0,25	-0,37	-0,31	-0,19	-0,13	-0,19	0,02	-0,05	-0,17	1,00	
% BC ⁴	-0,19	-0,09	0,01	-0,09	-0,13	-0,17	-0,15	-0,15	-0,08	-0,13	-0,04	1,00

1 DHB = Diamètre à la base

2 DHP = Diamètre à hauteur de poitrine

3 RP = Racines principales

4 BC = Bois de compression

Tableau 18. L'eigenvectors (W) et le loading (L) des axes de l'analyse en composantes principales de l'analyse du système racinaire et de la tige. La valeur propre et la contribution des différents facteurs à la variation totale sont listées au bas des colonnes pour chacun des facteurs.

Variables	Facteur 1		Facteur 2		Facteur 3	
	W	L	W	L	W	L
Âge plantation	0,86	0,77	0,16	0,77	0,16	0,77
Âge 0cm	0,86	0,85	-0,10	0,85	-0,10	0,85
Hauteur arbre	0,91	0,82	0,09	0,82	0,09	0,82
Hauteur houppier	0,89	0,89	-0,16	0,89	-0,16	0,89
Diamètre 0cm	0,79	0,91	-0,50	0,91	-0,50	0,91
DHB arbre	0,93	0,85	0,15	0,85	0,15	0,85
DHP arbre	0,94	0,84	0,20	0,84	0,20	0,84
Profondeur	0,33	0,11	0,75	0,11	0,75	0,11
Nbs racines arbres	0,31	0,07	0,73	0,07	0,73	0,07
Volume racine	0,82	0,93	-0,47	0,93	-0,47	0,93
Déviation	-0,30	-0,27	0,14	-0,27	0,14	-0,27
% BC	-0,16	-0,17	-0,16	-0,17	-0,16	-0,17
Vecteur propre	6,44		1,73		1,13	
Pourcentage du total %	53,63		14,45		9,33	

Comme suite à l'analyse, on retrouve quatre variables qui présentaient des différences significatives entre les récipients étudiés : la profondeur d'enracinement, le temps de reprise de croissance racinaire après la plantation, le diamètre des racines à proximité de la souche et le volume des segments racinaires (Tableau 19). Les récipients de type 67-50 ont montré une plus grande profondeur d'enracinement 18 cm versus 9cm pour les 45-110 et de 14 cm pour les plants à racines nues. Le récipient 45-110, quant à eu, ils se démarquent par un temps de reprise de croissance racinaire de 2 ans après plantation comparativement à 3,5 ans pour les racines nues et 4 ans pour les 67-50, alors que les plants à racines nues ont présenté un volume et un diamètre racinaire plus important que les deux autres méthodes de production de plants.

Tableau 19. Moyenne des variables descriptives du système racinaire du pin gris en plantation, par récipients et au total.

Variables à l'étude	45-110	67-50	Racines nues
Nombre de racines/arbre	27	33	33
Profondeur/cm	9	18*	14
Diamètre/mm	29	25	48*
Volume m³	15	13	46*
Temps de reprise de croissance racinaire après la plantation	2	4*	3,5
Croissance en longueur racine horizontale cm/an	22,1	17	16,4
Présence pivot	100	55	80
Présence pseudopivot	20	70	80
Accroissement en longueur pivot cm/an	12,2	13,2	12,5
Moy. écart vertical/arbre cm	3,1	2,5	2,7
Moy. bois de compression %/arbre	5	4	3,5

*Résultat significatif selon le modèle général d'analyse de variance.

4. DISCUSSION

La discussion se divise en trois parties. La première porte sur le système racinaire, la deuxième sur la différence entre les types de production de plants et la troisième de l'interaction entre le système racinaire et la tige. Puisqu'aucune parcelle témoin de pin gris naturel n'a été échantillonnée, l'interprétation des résultats porte sur la description du système racinaire du pin gris en plantation, sur la comparaison de la croissance entre les trois modes de production de plants ainsi que sur la relation de la croissance du système racinaire avec la tige. La description du système racinaire du pin gris en plantation se concentre uniquement sur les descriptions morphologiques et l'observation des malformations racinaires ont été constaté suite à analyse des résultats, puisqu'aucune variable sur les malformations racinaires n'a été mesurée. Par ailleurs, dans les résultats de l'analyse de variance, la différence d'âge entre les types de productions de plants a pu soulever des différences significatives pouvant affecter l'interprétation des résultats obtenus. En moyenne, l'âge des arbres provenant de la culture en récipient est de 19 ans pour les 45-110 et de 20 ans pour les 67-50. Tandis que les plants produits à racines nues ont 24 ans. Cet élément a été pris en considération dans la discussion.

4.1 Système racinaire

Les caractéristiques essentielles pour former un bon système racinaire sont multiples et conditionnent une grande partie de la croissance et du fonctionnement de l'arbre (Drénou, 2006). Un enracinement adéquat dépend essentiellement des propriétés mécaniques, comme une bonne résistance à la tension et à la flexion, ainsi que de la configuration de ses racines (Danjon *et al*, 2005; Danjon et Bert, 1999). En condition de

régénération naturelle, le système racinaire typique qui assure au pin gris une qualité d'ancrage et une stabilité efficace est doté d'une longue racine pivotante plongeant profondément dans le sol, lui permettant ainsi d'augmenter sa capacité d'explorer et d'exploiter les couches du sol en profondeur. Aussi, on y retrouve un nombre important de racines latérales de gros diamètre, concentrées dans les premiers centimètres du sol. De plus, ses racines latérales devraient émerger de la souche pour se répartir uniformément autour de la tige et former un angle de 90° par rapport à la racine pivotante (Danjon *et al.*, 2005; Dupuy *et al.*, 2005; Plourde, 2007).

Dans l'ensemble, chez les pins gris observés en plantation, âgées de 18 à 25 ans, on dénombre 31 racines de plus de 5 mm par arbre, réparti comme suit : 67 % en racines latérales et 33 % en racines verticales (Figure 7) orientées à 66 % entre l'Est et l'Ouest. De plus, on retrouve en moyenne deux pivots par arbre.

L'analyse des données biométriques avait pour objectif de vérifier l'effet de la culture en récipient sur la morphologie architecturale, la croissance des racines, ainsi que l'accroissement des tiges des arbres. Les résultats obtenus démontrent que les systèmes racinaires à l'étude ne correspondent pas aux schémas théoriques des pins gris naturels décrits plus haut. Aussi, l'enroulement racinaire fut observé de façon évanescente sur plusieurs systèmes racinaires, mais il n'a pas été quantifié et caractérisé. Les racines pivotantes, situées sous l'axe de la souche, étaient observables chez 28 des 40 arbres échantillonnés. Pour la plupart, les racines n'étaient pas complètement droites, mais plutôt courbées et de petit diamètre. Ces résultats ne corroborent pas les travaux antérieurs de Plourde (2007) et de Sheedy (1997), qui relataient une absence presque totale de racine pivotante chez les pins gris étudiés. La divergence de ces résultats peut être en partie liée à la différence de l'âge des arbres récoltés. Les recherches de Plourde (2007) et de Sheedy (1996) ont été menées sur des arbres âgés de dix ans et moins tandis que ceux de la présente étude avaient plus de dix-huit ans. Aussi, ce qui est remarqué c'est que l'âge moyen des racines verticales est similaire à celles des racines horizontales. Également,

selon Drénou (2006), la perte du pivot peut être remplacée par des racines à croissance oblique qui se développent à proximité du collet. Avec les années, ces racines obliques pourraient s'être recouvertes de plusieurs couches continues de cambium autour des racines, les agglomérants sous l'axe de la souche (Lindströme et Rune 1999). Aussi, la présence du pivot s'expliquerait par le fait que les jeunes semis auraient maintenu un pivot viable. Le méristème serait demeuré actif en récipient, et ce, jusqu'au moment de la plantation. La présence de racines pivotantes pourrait s'expliquer par le fait qu'une ou plusieurs racines latérales auraient poussé à la verticale et longées les parois du récipient pour s'enfoncer dans le sol après la mise en terre. Par la suite, l'arbre aurait développé la capacité de produire, après la mise en terre, des pivots secondaires pouvant croître à l'extrémité du pivot primaire (Walsh *et al.*, 2012).

Les racines latérales ont émergé de la racine pivotante en moyenne trois années suivant la mise en terre des plants. Ces résultats appuient les travaux de Plourde (2007), où l'évolution temporelle de la croissance des racines s'espaçait sur une période de trois à cinq ans. Par ailleurs selon les travaux de Sims (1964), le développement extensif des racines latérales ne commence que pleinement cinq ans après plantation.

Une différence de deux ans a été retrouvée entre l'âge des tiges et l'âge des plus vieilles racines latérales. Deux hypothèses peuvent expliquer ces phénomènes. La première provient des difficultés à localiser le début des ramifications lors de la coupe des segments. Ces dernières seraient dues aux malformations racinaires, comme la présence de l'enroulement des racines autour de la souche ou par le chignon (agglomérat de racines) qui contient une partie des racines (Ploude, 2007). La formation du chignon se produit à la suite du développement, après plantation, de nouvelles racines spécifiquement localisées dans les parties supérieure et inférieure de la carotte, produisant avec les années un amas de racines qui forment une structure dense à l'endroit occupé par la carotte d'origine (Balisky *et al.*, 1995). Les racines horizontales longeraient la racine pivotante un certain temps avant de se détacher pour croître librement. La deuxième hypothèse suppose qu'un délai de croissance

peut être également provoqué par des chocs physiologiques survenus lors de la mise en terre des semis. Parmi ceux-ci, il y a la déshydratation des plants, le contact déficient racine-sol et la destruction des racines fines. Limité dans leur capacité d'absorption de l'eau, le bon développement des fonctions biologiques des racines des semis est ralenti (Aussenac, 1988; Prévost, 1992). Ces deux phénomènes agiraient probablement de façon conjointe, expliquant ainsi, en partie le délai dans l'évolution temporelle de la croissance des racines.

Dans cette étude, les racines latérales principales observées se sont ramifiées sur la racine pivotante à une profondeur moyenne de 13,6 cm. Ces données sont inférieures aux résultats de Sundström et Keane (1999 — sapin de Douglas) et de Plourde (2007 — pin gris) qui étaient de 20 cm. D'une part, cette différence de résultat peut dépendre de l'échantillonnage. Dans la présente étude, l'analyse de la profondeur d'enracinement a été faite sur les racines de plus de cinq millimètres sur 40 systèmes racinaires, comparativement à Plourde (2007) qui a analysé les racines jusqu'à un diamètre de moins de 5 mm sur six systèmes racinaires âgés de dix ans et moins. Quant à Sundström et Keane (1999), ils ont excavé 16 systèmes racinaires âgés de dix ans, et employé des racines de cinq millimètres et moins pour leur analyse. D'autre part, une préparation terrain inadéquate peut être une autre hypothèse à émettre pour expliquer la faible profondeur d'enracinement. Le passage répété de la machinerie lors de la coupe forestière a pour effet de compacter le sol, de le rendre plus dense et moins propice à la croissance des semis dans la partie qui n'a pas été traitée (Dancause, 2008). Cela a pour effet de concentrer l'exploration du sol par les racines dans des horizons de terre moins denses et plus facilement colonisables. En forêt boréale, la scarification est une intervention mécanisée couramment utilisée au Québec pour assurer le contrôle de la végétation compétitrice et l'ameublissement du sol (Dancause, 2008; Thiffault *et al.*, 2003). Une bonne préparation du terrain permet de diminuer la densité du sol, de stimuler le réchauffement du microsite et de favoriser la minéralisation de la matière organique (Dancause, 2008). La création de microsites, produits par la scarification, forme des conditions favorables à l'augmentation

de la température du sol dans la zone d'enracinement des plants, favorisant par le fait même l'installation des semis plus rapidement (Prévost, 2003).

Dans la présente étude, on retrouve une relation négative entre la profondeur d'enracinement et la grosseur du diamètre des racines, ainsi qu'au niveau du taux d'accroissement annuel moyen en fonction de la profondeur sur la souche. Cette relation a déjà été décrite par Coutts *et al.*, (1999). Effectivement, les plus grosses racines latérales sont situées généralement à proximité du collet et occupent une fonction stabilisatrice, tandis que les racines latérales secondaires sont situées plus en périphérie de la souche et se dirigent vers l'endroit où se trouvent les éléments nutritifs (Danjon *et al.*, 2006). Les racines localisées dans la partie supérieure du système racinaire ont l'avantage de retrouver de meilleures conditions de croissance. Près de la surface, la température du sol est plus élevée, car elle est réchauffée par les rayons du soleil. L'humidité de l'air y est également plus accessible et la densité apparente du sol est plus faible, ce qui offre de meilleures conditions d'aération (Gagné et Paquette, 2008; Prévost, 1992).

Fait intéressant, c'est l'orientation Est-Ouest qui présentait un nombre de racines plus élevé par rapport aux autres orientations. De plus, aucune relation entre le sens du sillon de scarifiage et l'abondance des racines latérales dans cette même direction n'a été observée. Ces résultats n'appuient pas ceux de Plourde (2007), pour qui 50 % de la longueur des racines des arbres se concentraient dans un secteur en particulier, soit celui superposé au sillon de scarifiage. Ce qui ressort principalement de l'analyse de la répartition spatiale des racines, c'est qu'en moyenne, 66 % des racines latérales s'orientaient d'Est en Ouest. De plus, aucune différence dans la grosseur du diamètre des racines n'a été observée en fonction d'une orientation précise. Les systèmes racinaires semblent réagir à la même source de stress abiotique. Ceci laisse supposer qu'un facteur externe influence l'arbre à organiser son réseau racinaire. Une hypothèse plausible serait le renforcement sélectif du système racinaire à la présence des vents dominants, pour compenser le stress mécanique (Nicoll *et al.*, 1995; Stokes et Guitard 1997; Stokes *et al.*,

1995, Danjon *et al.*, 2005). L'arbre produirait un réseau de racines plus important du côté exposé au vent dominant, favorisant ainsi la résistance en tension (Danjon et Fourcaud, 2009; Stoke, 1999). Aussi, en réponse aux vents dominants les racines adoptent une forme de croissance secondaire différente, comme la forme d'un « T » ou bien d'un « I » (Drénou, 2006; Nicoll et Dunn, 2000) observée chez le pin gris. Par contre, il aurait été intéressant de prendre des données sur la forme des racines afin de valider cette affirmation.

Comme les arbres vieillissent, la grande majorité des malformations racinaires présentes durant les premières années suivant la mise en terre semblent s'être améliorées avec le temps, se rapprochant selon la littérature d'un système racinaire issu de la régénération naturelle (Drénou, 2006). Ceci est démontré par la présence des racines pivotantes et pseudopivotantes, et par une répartition plutôt symétrique des racines latérales.

4.2 Différence entre les types de production de plants en récipient

L'analyse des données biométriques des racines du pin gris en plantation a démontré plusieurs similarités entre elles, et ce, malgré des différences morphologiques entre les trois types de production au moment de la mise en terre. Par exemple, la grosseur du récipient, la grosseur du diamètre au collet, ainsi que la hauteur et l'âge du plant. En général, le nombre moyen de racines par arbre était semblable (Tableau 19), malgré le fait que le système racinaire des semis à racines nues présente, avant plantation, une biomasse plus dense que celui du 45-110 et du 67-50 (Walsh *et al.*, 2012; Wightman, 2000). Les plants à racines nues sont plus âgés que les deux autres types de productions de plants, ce qui pourrait expliquer cette différence significative. En outre, une différence significative en biomasse racinaire pourrait persister jusqu'à quatre ans après plantation entre le récipient 45-110 et celui du 67-50 (Walsh *et al.*, 2011). Par contre, la croissance des plants provenant des récipients 67-50 n'était pas significativement différente (Tableau 28), mais

ils présentaient, 20 ans après plantation, une hauteur moyenne et un DHP supérieur aux plants des récipients 45-110 et inférieur aux plants à racines nues (Tableau 27). Selon Walsh *et al.*, (2011), l'écart de croissance entre les plants d'épinette noire provenant de récipients 126-25 et 67-50 tend à s'atténuer 10 ans après plantation. D'ailleurs, le faible volume des récipients 67-50 ne semble pas représenter un obstacle à son développement, car après plus de 20 ans de croissance, il rejoint les deux autres types de production.

Sur l'ensemble des variables biométriques analysées, uniquement quatre présentaient des différences significatives entre les récipients étudiés : la profondeur d'enracinement, le temps de reprise de croissance racinaire après la plantation, le diamètre des racines à proximité de la souche et le volume des segments racinaires (Tableau 19). Les plants à racines nues présentaient un volume racinaire plus important. Ceci peut s'expliquer par le fait que ces arbres étaient parmi les plus vieux échantillonnés. Les récipients de type 67-50 avaient quant à eux une plus grande profondeur d'enracinement. Nous émettons l'hypothèse que cette différence est due à la perte du pivot, mais elle peut être aussi expliquée par une préparation du terrain inadéquate. Souvent, la perte du pivot peut être remplacée par des racines à croissance oblique (pseudopivot) qui vont se développer à proximité du collet ou par l'augmentation du nombre de racines latérales afin de pallier l'instabilité créée par l'absence de pivot (Drénou, 2006). Le développement de ramifications latérales en profondeur pourrait constituer un processus d'adaptation lié aux risques de renversement, afin d'accroître la stabilité de la tige. L'arbre recherche l'équilibre et pour compenser la perte du pivot primaire, il consacre du temps et de l'énergie pour générer des racines nécessaires à sa stabilité (Danjon et Fourcaud, 2009).

La reprise de croissance des racines après plantation semblait plus rapide pour les plants des récipients 45-110. Ces plants passent un temps plus long en récipient, ils possèdent un plus grand gabarit et reçoivent ainsi une plus grande quantité d'engrais azotée. De cette manière, ils en accumulent une plus grande partie dans la tige et les racines. Les surplus en azote peuvent leur procurer certains avantages durant les périodes

où cet élément est un facteur limitant (Chapin III, 1980). Cela permet à l'arbre de conserver une meilleure indépendance par rapport à l'acquisition d'éléments nutritifs dans son milieu les deux premières années suivant la mise en terre et il peut voir ainsi le temps de reprise de croissance de ses racines après plantation s'optimiser (Salifu et Timmer, 2003). Selon cette théorie, les plants produits à racines nues auraient dû afficher une reprise de croissance plus efficace que les deux autres méthodes de culture. Le retard de croissance après plantation pourrait expliquer par le fait qu'au moment de la livraison, lors de l'extraction, une partie des racines fines auraient été détruites (Dancause, 2008).

Contrairement aux hypothèses émises, les types 67-50 et à racines nues semblent produire un système racinaire de plus grande qualité par rapport au type 45-110 en se basant sur les paramètres de la profondeur d'enracinement, d'un nombre moyen de racines plus élevé, d'un accroissement en longueur plus rapide et une moyenne d'écart vertical plus faible. Le 67-50, offre aussi un temps de culture en pépinière très court, permettant de livrer une plus grande quantité de plants à la fois, diminuant ainsi les frais reliés au transport. Ces résultats corroborent les travaux de Sheedy (1996), selon lesquels les pins gris provenant de culture de type 45-110 devraient présenter un pourcentage plus élevé de malformations racinaires que ceux de culture 67-50. Le temps passé en récipient semblerait apporter des contraintes de croissance s'échelonnant sur plusieurs années après plantation. Par contre, les plants de types 45-110 observés présentaient à 100 % une racine pivotante, procurant un gros avantage à ce type de production, d'autant plus qu'un arbre avec une racine pivotante sera beaucoup plus résistant quant aux risques de chablis. La plupart de ces variables ne sont pas statistiquement significative, par contre il aurait été intéressant de faire l'analyse en comparant seulement le 67-50 et le 45-110 pour s'il y aurait eu des différences entre eux (Sheddy, 1996)

Il est important de souligner d'autres observations qui caractérisent les systèmes racinaires des plants produits en récipient. Une agglomération racinaire formant une espèce de chignon a été régulièrement observée. Les racines de pin se seraient d'abord entremêlées

et par la suite elles auraient fusionné. Les racines maintenues occlusées par l'enroulement auraient vu leur surface recouverte d'une couche de cambium, de façon plus ou moins continue, suppléant ainsi la présence extérieure de l'enroulement racinaire, par un système racinaire aux aspects extérieurs normaux (Lindstrom et Rune, 1999). Ces auteurs supposent que l'anomalie n'est plus observable, plus de 20 ans après plantation, mais qu'à l'intérieur le problème persiste et pourrait occasionner une diminution de la résistance la traction.

4.3 Interaction entre le système racinaire et la tige

L'interprétation de l'analyse en composante principale ne confirme pas l'hypothèse initiale qui stipulait que la forme déficiente du système racinaire occasionnerait un déséquilibre entre la partie aérienne et souterraine. Une dysfonction de cet ancrage amènerait une forte proportion de tiges sinueuses et d'arbres inclinés par rapport à la verticale et puis, pour rétablir la rectitude de sa tige, l'arbre produirait du bois de compression. Sans affirmer des liens marqués entre les malformations du système racinaire et les déformations de la tige, on rapporte dans la littérature (Del Rio *et al.*, 2004; Atger et Edelin, 1994; Lindström et Rune, 1999; Plourde, 2007; Rune, 2003 b) que certaines caractéristiques du système racinaire des pins gris plantés contribuaient au déséquilibre de la tige. Les arbres récoltés dans la présente étude révèlent des tiges relativement droites avec des écarts moyens, somme tout très faibles (2,7 cm), en plus de présenter un faible pourcentage de bois de compression sur les rondelles analysées (4,2 % des tiges récoltées).

On observe une corrélation positive entre le volume des racines et les paramètres de croissance de la tige (hauteur, DHP, DHB), mais aucune corrélation n'a été retrouvée entre les variables du système racinaire et les paramètres de croissance de la tige. Au-delà des relations évidentes (âge de l'arbre et hauteur totale, l'âge de l'arbre et l'âge des racines, etc.) (Tableau 17), on dénombre une plus grande quantité d'écarts verticaux du côté Est des tiges. Les écarts maximaux se retrouvaient aussi dans cette direction. De plus, on pouvait

observer un gradient ascendant des écarts selon la classe de hauteur et un nombre de racines supérieur pour cette orientation. On peut donc soutenir l'hypothèse qu'il y a une force mécanique extérieure qui influence l'arbre, comme des vents dominants (Auberlinder, 1982). L'arbre doit établir un réseau de racines plus important dans deux directions; à l'Ouest, afin d'assurer la tension et le maintien et à l'Est, pour supporter la flexion et jouer un rôle de support. Chez de nombreuses essences, les arbres renforcent leur système racinaire sous le vent dominant. Les racines placées du côté des vents dominants sont plus nombreuses et ramifiées, alors que les racines sous le vent sont épaisses et peu nombreuses (Stokes *et al.*, 1995 – *Picea* sp.; Tamasi *et al.*, 2005 – *Quercus* sp.). Également, chez le pin maritime, la zone racinaire et les pivots ont été renforcés respectivement de 46 % et de 21 % sous le vent. Autrement dit, plus d'un tiers de la longueur des racines et du nombre de racines se retrouve dans le secteur sous le vent (Danjon et Fourcaud, 2009).

Les résultats obtenus ouvrent des possibilités pour des recherches futures et permettent de dresser un portrait des différences morphologiques existantes entre les méthodes de production de plants, et ce, plus de quinze ans après plantation. Au regard des résultats de cette étude, nous émettons l'hypothèse que les malformations racinaires rapportées dans la littérature durant les premières années suivant la mise en terre semblent s'être estompées avec l'âge chez les pins gris dominants des plantations échantillonnées. Les pins gris dominants en plantation présentent une tige droite avec peu de bois de compression. Comme il existe un certain antagonisme entre la solidité de l'arbre et la stabilité, le système racinaire semble coloniser amplement les horizons du sol et permettre un développement suffisant de la partie aérienne pour combler les déficits occasionnés par la culture en récipient. Cette hypothèse demande à être validée par l'analyse de plusieurs sites présentant les mêmes trois types de production de plants que dans la présente étude.

4.4 Limites de l'étude

La présente étude n'est qu'un survol de certains critères de croissance et de qualité du pin gris en plantation. Il sera important d'évaluer davantage de propriétés afin de déterminer l'effet réel de la culture en récipient sur la croissance racinaire et la croissance de la tige. Des études supplémentaires sur d'autres paramètres du système racinaire, telles que l'identification des malformations visuelles comme l'enroulement et la fusion racinaire, la présence du chignon et la forme des racines seraient intéressants à étudier. Lors de la prise de données, l'indication de l'orientation du bois de compression aurait pu appuyer la relation entre l'orientation du système racinaire et les écarts verticaux. De surcroît, il serait intéressant d'étudier des paramètres anatomiques du bois. Ils pourraient fournir des informations complémentaires concernant la qualité du bois des tiges, comme l'angle des microfibrilles dans la paroi cellulaire, la longueur des trachéides, l'épaisseur des parois et le diamètre du lumen.

L'étude s'est concentrée sur les pins gris dominants en plantation sans comparaison avec des échantillons témoins. Le manque de ressources pour ce projet de recherche a limité l'enquête sur des échantillons témoins provenant d'une régénération naturelle. D'autant plus qu'il est difficile de trouver des peuplements de régénération naturelle de pin gris d'âge comparable à proximité des sites d'étude. La présence de peuplement de régénération naturelle aurait permis d'obtenir une meilleure comparaison entre les plants naturels et les plants de culture afin de valider l'origine des malformations. D'ailleurs, les données disponibles dans la littérature sur les systèmes racinaires naturels et en récipient ne couvrent pas le même domaine biologique et la même tranche d'âge, ils ne pouvaient servir de comparatif fiable et valide. Ces informations auraient permis d'obtenir une meilleure comparaison entre les plants naturels et les plants de culture afin de valider l'origine des malformations. Il aurait aussi été intéressant d'intégrer des arbres codominants et supprimés afin de mieux représenter la variabilité du peuplement. Entre autres, on

suppose que les arbres supprimés devraient présenter une proportion plus importante d'écart vertical possiblement en lien avec les malformations racinaires.

Subséquemment, on s'est abstenu d'accorder des variables spécifiques aux anomalies racinaires. Les variables ont plutôt été attribuées aux descriptions morphologiques du système racinaire et de la tige.

L'absence de réPLICATION équilibrée au niveau des traitements de cultures en récipient limite les conclusions de l'étude sur les différences entre les trois types de production de plants. Néanmoins, la qualité et la fiabilité des moyennes ont été privilégiées, ce qui a demandé un temps important pour la prise des mesures.

5. CONCLUSION

La présente étude a permis de fournir des informations pertinentes sur la description du système racinaire du pin gris en plantation âgée de 18 à 25 ans. L'objectif principal était d'établir un lien entre le développement racinaire du pin gris en plantation sur sa croissance et la qualité de la tige (forme et bois de compression) en fonction de trois types de cultures, deux en récipients (45-110 et 67-50) et une méthode de production à racines nues. Dans le contexte actuel et futur, la production de matière ligneuse dépendra en grande partie du bois des plantations, d'où l'importance de s'assurer que les méthodes de culture utilisées optimiseront le rendement des plantations.

Les hypothèses de travail ont partiellement été confirmées. Les systèmes racinaires ont montré les malformations énumérées dans la littérature telles qu'une profondeur d'enracinement des racines inférieures à 30 cm, un délai dans la reprise de croissance des racines après plantation de même qu'une répartition des racines inégales autour de la tige. D'ailleurs, les arbres possédaient à 70 % une racine pivotante contredisant les résultats de certaines études. Les plants en récipient de type 45-110 n'ont pas montré un pourcentage plus élevé de malformations. Le temps de résidence en récipient n'influencerait donc pas la croissance à moyen terme des racines et de la tige. Les premiers effets de la culture en récipient se seraient probablement adoucis au cours du temps.

Les résultats de notre étude révèlent aussi que les conséquences de la culture en récipient sur les plants ne sembleraient pas désavantager la stabilité des arbres dominants et n'entraîneraient pas de perte significative de qualités au niveau du bois. Or, la réussite du rétablissement de la régénération forestière à la suite d'une coupe constitue la base d'un aménagement forestier durable. Dans une situation d'intensification de la sylviculture, la plantation semble représenter l'un des meilleurs moyens pour renforcer de façon importante

la productivité de nos forêts. Les plantations continueront d'être un outil privilégié pour atteindre les objectifs d'aménagement forestier durable. Avec l'apparition de nouvelles techniques de production et l'exécution d'un travail de bonne qualité, il est envisageable de corriger certains problèmes reliés à la croissance des arbres durant cette phase de leur vie en pépinière. De ce fait, il est possible de conclure que les plants produits en récipients représentent le meilleur potentiel de productivité.

6. RÉFÉRENCES

- Atger, C. et Edelin, C., 1994. Stratégies d'occupation du milieu souterrain par les systèmes racinaires des arbres. *Revue d'Écologie la Terre et la Vie*, 49(4): 343-356.
- Auberlinder, V., 1982. De l'instabilité du pin maritime. *Annales de Recherche Sylvicoles*, AFOCEL, Paris, p. 139-178.
- Aussenac, G. G., 1988. Croissance et développement du système racinaire de semis de trois espèces de conifères : *Pseudotsuga menziesii*, *Pseudotsuga macrocarpa* et *Cedrus atlantica*. *Annals of Forest Science*, 45(2) : 117-124.
- Balisky, A., Salonius, C. et Ponette, Q., 1995. Seedling roots and forest floor: misplaced neglected aspects of British-Columbia's reforestation effort ? *The Forestry Chronicle*, 71(1): 59-65.
- Balleux, P., Lentz, B. et Ponette, Q., 2009. Instabilité et courbure basale des jeunes peuplements de Douglas : évaluation du rôle exercé par le système racinaire. *Forêt Wallonne*, 98: 12-21.
- Béland, M., Bergeron, Y. et Zarnovican. R., 1999. Natural regeneration of jack pine following harvesting and site preparation in the Clay Belt of northwestern Quebec. *The Forestry Chronicle*, 75(5): 821-831.
- Blais, J. R., 1962. Collection and analysis of radial growth data from trees for evidence of past spruce budworm outbreaks. *The Forestry Chronicle*, 38(4): 474-483.
- Burns, R.M. et Honkala, B.H., 1990. *Silvics of North America: 1. Conifers*. Agriculture Handbook 654, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Washington, 675p.
- Chapman, K. A. et Colombo, S. J., 2006. Early root morphology of jack pine seedlings grown in different types of container. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 21(5): 372-379.
- Chapin, F. S. III., 1980. The mineral nutrition of wild plants. *Annual review of ecology and systematics*, 11: 233-260.
- Chrosciewicz, Z., 1990. Site conditions for jack pine seeding. *The Forestry Chronicle*. 66(6): 579-584.

- Chrosciewicz, Z., 1988. Jack pine regeneration following postcut burning under seed trees in central Saskatchewan. *The Forestry Chronicle*, 64(4): 315-319.
- Coutts, M. P., Nielsen, C. C. N. et Nicoll, B. C., 1999. The development of symmetry, rigidity and anchorage in the structural root system of conifers. *Plant and Soil*, 217(1-2): 1-15.
- Coutts, M. P., 1983. Root architecture and tree stability. *Plant and Soil*, 71(1-3): 171-188.
- Dancause, A., 2008. *Le reboisement au Québec*. Québec, Les Publications du Québec, Québec, 177p.
- Danjon, F., Barker, D. H., Drexhage, M., & Stokes, A., 2006. Analysis of 3D structural root architecture data of trees grown on slopes. *Plant Growth Modeling and Applications, PMA'06, Second International Symposium*, pp. 74-77.
- Danjon, F. et Fourcaud, T., 2009. L'arbre et son enracinement. *Innovations Agronomiques*, 6: 17-37.
- Danjon, F., Fourcaud, T. et Bert, D., 2005. Root architecture and wind-firmness of mature *Pinus pinaster*. *New Phytologist*, 168(2): 387-400.
- Danjon, F. et Bert, D., 1999. Structural root architecture of 5-year-old *Pinus pinaster* measured by 3D digitising and analysed with AMAPmod. *Plant and Soil*, 217(1-2): 49-63.
- Del Rio, M., Bravo, F., Pando, V., Sanz, G. et de Grado, R. S., 2004. Influence of individual tree and stand attributes in stem straightness in *Pinus pinaster* Ait. Stands. *Annals of Forest Science*, 61(2): 141-148.
- Drénou, C., 2000. Étude des relations entre systèmes racinaires et stabilité des arbres (à la suite de la tempête de décembre 1999). *Les Dossiers de l'environnement de l'INRA*, 20: 153-159.
- Drénou, C., 2006. *Les racines face cachée des arbres*. Institut pour le développement forestier, Paris, 335p.
- Dupuy, L., Fourcaud, T. et Stokes, A., 2005. A numerical investigation into the influence of soil type and root architecture on tree anchorage. *Plant and Soil*, 278(1-2): 119-134.
- Environnement Canada, 2012. Archive nationale d'informations et de données climatologiques. Normales climatiques, <http://climate.weatheroffice.gc.ca>.
- Farrar, J. L., 1996. *Les arbres du Canada*. Édition Fides. Service Canadien des forêts, groupe communication, St-Laurent, 505p.

- Fernandez, G. C. J., 1991. Repeated measure analysis of line-source sprinkler experiments. HortSciences, 26: 339-342.
- Gagné, P. et Paquette, A., 2008. Revue de la littérature sur la préparation de terrain mécanique pour les mélèzes. Réseau ligniculture Québec, Septembre, 24p.
- Fritts, J.C., 1976. Tree rings and climate. Academic Press Inc, London, 567p.
- Halter, M. R. et Chanway, C. P., 1993. Growth and root morphology of planted and naturally-regenerated Douglas fir and Lodgepole pine. Annales des Sciences forestières, 50(1): 71-77.
- Holmes, R. H., 1983. Computer-Assisted quality control in tree-ring dating and measurement. Tree-ring Bulletin, 43: 69-78.
- Iezzoni, A. F. et Pritts, M. P, 1991. Applications of principal component analysis to horticultural research. HortScience, 26(4): 334-338.
- Janas, P. S. et Brand, D. G., 1988. Comparative growth and development of planted and natural stands of Jack pine. The Forestry Chronicle, 64(4): 320-328.
- JMP, U. S. g. 2009. JMP software. Cary, NC (USA), SAS Institute Inc.
- Jourez, B., 1997. Le bois de tension. 1. Définition et distribution dans l'arbre. Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement, 1(2): 100-112.
- Jozsa, L.A., et Middleton, G.R., 1997. Les caractéristiques déterminant la qualité du bois : nature et conséquences pratiques. Forintek Canada Corporation, Sainte-Foy, Québec, Division de l'Est, Publication spéciale, SP-34F. 42p.
- Kaiser, H.F., 1960. The application of electronic computers to factor analysis. Educational and Psychological Measurement, 20: 141-151.
- Krause, C. et Plourde, P. Y., 2008. Stem deformation in young plantations of black spruce (*Picea mariana* Mill. BSP) and jack pine (*Pinus banksiana* Lamb.) in the boreal forest of Quebec, Canada. Forest Ecology and Management, 2557(7): 2213-2224.
- Krause, C., Plourde, P.-Y. et Gagnon, R., 2002. Gauchissement de la tige d'épinette noire et de pin gris après plantation : Rapport d'avancement des travaux volet 1, UQAC, Chicoutimi, 28p.
- 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, 2171(1-2): 29-37.

- Littell, R. C., 1989. Statistical analysis of experiments with repeated measurements. HortSciences, 24: 37-40.
- Victorin, M.F., Rouleau, E., Brouillet L., 1995. Flore laurentienne 3e édition. Montréal, Les presses de l'Université de Montréal, 1084p.
- MapInfo, C., 2003. MapInfo Professional Version 7.5. M. Corporation. Troy, USA.
- Marquestaut, J., 1978. Les dangers cachés des plants en conteneurs. Annales de Recherches sylvicoles, 1: 35-42.
- Ministère des Ressources Naturelles, 2013. Production de plants au Québec, Gouvernement du Québec, Québec,
<http://www.mrn.gouv.qc.ca/forets/semences/semences-production.jsp>.
- Ministère des Ressources Naturelles et de la Faune, 2010. Ressources et industries forestières portrait statistique, édition 2010. Gouvernement du Québec, Ste-Foy, 73p.
- Nicoll, B. et Dunn, A.J., 2000. The effects of wind speed and direction on radial growth of structural roots. The supporting roots of trees and woody plants: form, function and physiology. Edited by A. Stokes. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht Netherlands, 87: 219–225.
- Nicoll, B. C., Easton, E. P., Milner, A. D., Walker, C., Coutts, M.P. et Grace, J., 1995. Wind stability factors in tree selection: distribution of biomass within root systems of Sitka spruce clones. In: Grace, J. et Coutts, M.P., ed Wind and Trees, Cambridge, UK Cambridge Université Press, pp. 276-292.
- Paré, E.G.; Loving, R.O. et Hill, I.L., 1967. Descriptive geometry. 3rd édition. The Macmillan Company, Collier-Macmillan limited, New York London, 383p.
- Peck, R. Olsen, C. et Dévore, J., 2007. Introductory Statistics and Data Analysis 3rd édition. Cengage Learning, USA, 888p.
- Plourde, A., 2007. Croissance, développement et architecture des structures aériennes et souterraines de pins gris (*Pinus banksiana* Lamb.) dans un peuplement naturel et une plantation. Thèse de doctorat, Université du Québec à Chicoutimi, Chicoutimi, 172p.
- Prégent, G., Bertrand, V. et Charrette, L., 1996. Tables préliminaires de rendement pour les plantations d'épinette noire au Québec. Direction de la recherche forestière, 70p.
- Prévost, M., 2003. Effets du scarifiage sur les propriétés du sol et l'ensemencement naturel dans une pessière noire à mousses de la forêt boréale québécoise. Canadian Journal of Forest Research, 26(1): 72-86.

- Prévost, M., 1992. Effets du scarifiage sur les propriétés du sol, la croissance des semis et la compétition : revue des connaissances actuelles et perspective de recherches au Québec. Annales de Sciences forestières, 49(3): 277-296.
- Quinn, G. P. et Keough, M. J., 2002. Experimental design and data analysis for biologists. Cambridge University Press, New York, 537p.
- Raven, P., Everett, R. et Eichhorn, S., 2007. Biologie végétale. Éditions De Boeck Supérieur, Paris, 870p.
- Ries, S., 1988. Fonctionnement d'un écosystème forestier - Le compartiment d'un taillis de châtaignier (*Castanea sativa* Mill.) du sud-est de la France : biomasse, structure et évolution. Thèse de doctorat, Université de Grenoble, 186p.
- Robert, D. et Catesson, A. N., 2000. Organisation végétative. Doin Editeurs Groupe, Liaisons SA, Edouard-Belin, 359p.
- Ruel, J. C., 1992. La sylviculture face au risque de chablis. L'aubelle, 88: 10.
- Ruel, J. C., 1997. Importance de la régénération préétablie dans les forêts publiques du Québec. Direction générale des forêts, Service de la recherche appliquée du Québec, Québec, 39p.
- Rune, G. et Wahrenjo, M., 2002. Basal sweep and compression wood in young Scots pine trees. Scandinavian Journal of Forest Research, 17(6): 529-537.
- Rune, G. 2003 a. Slits in container wall improve root structure and stem straightness of out planted Scots pine seedlings. Silva Fennica, 37(3): 333-342.
- Rune, G., 2003 b. Instability in plantations of container-grown Scots pine and consequences on stem form and wood properties. Thèse de doctorat, Uppsala : Sveriges lantbruksuniv, Acta Universitatis agriculturae Sueciae, Silvestria, 281: 35p.
- Salifu, K. F. et Timmer, V. R., 2003. Optimizing nitrogen loading of *Picea mariana* seedlings during nursery culture. Canadian Journal of Forest Research, 33(7): 1287-1294.
- Saucier, J. P., Berger, J. P., D'Avignon, H. et Racine, P., 1994. Le point d'observation écologique. Norme Techniques, Gouvernement du Québec, 116p.
- Schweingruber, F. H., 1989. Tree rings basic and applications of dendrochronology. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht Netherlands, 276p.
- Sheedy, G., 1991. Fertilisation d'un jeune peuplement de pin gris éclairci : résultats de dix ans. Gouvernement du Québec, Ministère des forêts, Sainte-Foy, 1-6.

- Sheedy, G., 1993. La stabilité des plants en contenant : résultats des évaluations réalisées dans 54 plantations de pin gris de l'Abitibi. Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, Direction de la recherche forestière. Note de recherche forestière no 47. 18p.
- Sheedy, G., 1996. La stabilité des plantations : résultats des évaluations réalisées en 1989 et en 1994 dans six plantations de pin gris de l'Abitibi. Québec, Direction de la recherche forestière, Note de recherche forestière no. 69. 10p.
- Sheedy, G., 1997. La stabilité des plants en contenant : qu'en est-il exactement ? Québec Min. For. Note de recherche forestière no. 45. 16p.
- Sims, H. P., 1964. Root developpement of jack pine seedlings on burned-over dry sites in southeastern Manitoba. Departement of Forestry, Gouvernement of Canada, 47-1061: 15p.
- Stokes, A., 1999. Strain distribution during anchorage failure of *Pinus pinaster* Ait. at different ages and tree growth response to wind-induced root movement. Plant and Soil, 217(2): 17-27.
- Stokes A. et Guitard, D., 1997. Tree root response to mechanical stress. The Biology of Root Formation and Development, Plenum Publishing, 65: 227-236.
- Stokes, A., Fitter, A. H. et Coutts, M.P., 1995. Reponses of young trees to wind and shading: effects on root architecture. Journal of Experimental Botany, 46(9): 1139-1146.
- Stokes, M A., et Smiley, T. L, 1996. An introduction to tree-ring dating. University of Arizona Press, Arizona, 79p.
- Si-Pierre, H., Gagnon, R. et Bellefleur, P. 1991. Distribution spatiale de la régénération après feu de l'épinette noire (*Picea mariana*) et du pin gris (*Pinus banksiana*) dans la forêt boréale, Réserve faunique Ashuapmushuan, Québec. Canadian Journal of Botany, 69:717-721.
- Sundström, E. et Keane, M., 1999. Root architecture, early development and basal sweep in containerized and bare-rooted Douglas fir *Pseudotsuga menziesii*. Plant and Soil, 217(1-2): 65-78.
- Swetnam, T. W., Thompson, M. A. et Sutherland, E.K., 1985. Using dendrochronology to measure radial growth of defoliated trees. Agric. Handbook No. 639. Washington, D.C.: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Cooperative State Research Service, 39 p.
- Tamasi E., Stokes A., Lasserre B., Danjon F., Berthier S., Fourcaud T. et Chiatante D., 2005. Influence of wind loading on root system development and architecture in oak (*Quercus robur* L.) seedlings. Trees, 19(4): 374-384.

- 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): 63-80.
- Thorpe, H. C. et Timmer, V. R., 2005. Early growth and nutrient dynamics of planted *Pinus banksiana* seedlings after slash-pile burning on a boreal forest site. *Canadian Journal of Soil Science*, 85(1): 173-180.
- Timell, T. E., 1986. Mechanism of compression wood action. Compression wood in gymnosperms. Vol. 1,2 and 3. Berlin, Springer-Verlag. 2150p.
- Tremblay, M., Martel, J., Doucet, R. et Bolghari, H., 1987. Régénération naturelle. Opérations Forestières, novembre, 1987: 22-24.
- Walsh, D., Allaire, J., Gagnon, D. et Lord, D., 2012. Persistance de la racine pivotante des plants de pins gris cultivés dans les récipients 113-25, 67-50 et 63-90: Effet de l'âge au moment de la plantation. UQAC, Consortium de recherche sur la forêt boréale commerciale, Chicoutimi, Québec, Canada.
- Walsh, D., Allaire, J. et Lord, D., 2011. Survie et Croissance de mini-plants d'épinette noire reboisés en forêt boréale: Bilan de 10 ans de plantation. UQAC, Consortium de recherche sur la forêt boréale commerciale, Chicoutimi, Québec, Canada.
- Westing, A. H., 1965. Formation and function of compression wood in gymnosperms. *Botanical Review*, 31(3): 381-480.
- Wightman, K. E., 2000. Bonnes pratiques de culture en pépinière forestière: directives pratiques pour les pépinières communautaires. World Agroforestry Centre, Nairobi, Kenya, 90p.
- Zar, J. H., 1984. Biostatistical analysis. Englewood Cliffs, New Jersey, 717p.

ANNEXE 1**Âge des racines**

Tableau 20. Âge moyen des racines à 0cm et à 30 cm selon l'ordre RP et RS.

Site	Type de récipient	Année de plantation	Âge plantation	Racines latérales principales					Racines latérales secondaires					
				0 cm	*EC	30 cm	* ¹ EC	* ² A	0 cm	* ¹ EC	30 cm	* ¹ EC	* ² A	
PLP01	Racine nue	1985	24	22,1	1,7	20,9	2,3	1,9	20,8	2,5	19,0	2,8	3,2	
PLP03	45-110	1991	18	17,2	1,1	16,2	1,4	0,8	16,4	1,1	15,6	1,3	1,6	
PLP04	45-110	1989	20	19,3	1,5	18,0	1,9	0,7	18,3	1,3	17,0	1,4	1,7	
PLP05	67-50	1988	22	19,7	1,7	18,2	2,4	2,3	18,0	2,6	16,1	3,2	4,0	
PLP07	67-50	1991	19	17,2	1,7	15,4	2,1	1,8	14,9	2,0	12,7	2,6	4,1	
PLP08	67-50	1991	19	17,0	1,4	15,2	2,1	2,0	16,3	1,9	14,7	2,3	2,7	
PLP09	67-50	1989	21	17,9	1,9	16,2	2,2	3,1	16,5	1,8	14,7	2,4	4,5	
PLP10	67-50	1987	23	21,0	2,2	18,0	3,3	2,0	19,2	2,3	16,6	2,8	3,8	
Moyenne de l'âge selon le type de récipient				Moy. âge total	18,3	2,8	16,7	3,0	2,0	17,0	2,8	15,5	2,9	3,3
				45-110	18,2	1,7	17,1	1,9	1,0	17,3	1,5	16,3	1,5	2,0
				67-50	18,6	2,5	16,6	2,9	2,2	17,0	2,7	15,0	3,0	3,8
				Racnue	22,0	1,8	21,0	2,3	2,0	21,0	2,5	19,0	2,8	3,0

*¹ Écart-type*² Le nombre d'année entre la date de plantation et l'âge moyen des racines à 0cm

Annexe 2

Informations générales sur la croissance des tiges

Tableau 21. Caractérisation des arbres échantillonnés par site.

Site	DHB		DHP		Hauteur arbre		Hauteur houppier	
	Moy.	Écart-type	Moy.	Écart-type	Moy.	Écart-type	Moy.	Écart-type
PLP01	19,0	0,9	15,4	0,4	10,8	1,0	6,6	0,4
PLP03	9,6	0,5	7,9	0,3	6,7	0,4	2,2	0,5
PLP04	11,8	0,5	8,9	0,6	6,7	0,9	2,0	0,2
PLP05	11,7	0,8	9,0	1,0	7,6	0,6	1,8	0,8
PLP07	11,7	0,6	9,9	0,4	7,4	0,7	1,7	0,3
PLP08	11,9	2,0	8,5	1,4	6,3	1,0	1,5	1,0
PLP09	9,2	2,4	7,8	2,4	7,2	0,7	2,3	0,2
PLP10	15,7	1,6	13,5	0,7	9,8	0,8	3,6	0,7
Moy. total	12,6	1,1	10,1	0,9	7,8	0,8	2,7	0,5
Moy. 45-110			8,4			6,8		
Moy. 67-50			9,3			7,7		
Moy. Racnu			15,3			10,8		

Tableau 22. Résultat de l'analyse de variance (valeurs de *P* et du F ratio) des mesures de la hauteur et du DHP des arbres.

<i>Hauteur</i>				
Source	dl ¹	ddl ²	F ratio	Prob. > F
Type production de plants	2	5	4,1067	0,0881
<i>DHP</i>				
Type production de plants	2	5	4,6462	0,0724

1 = Degré de liberté

2 = Degré de liberté au dominateur