

PIERRE-MANUEL PLANTE

**DISTRIBUTION RACINAIRE DE TROIS ESPÈCES
D'ARBRES IMPLANTÉES EN HAIES BRISE-VENT
SELON DEUX TYPES DE SOL CONTRASTANTS**

Mémoire présenté
à la Faculté des études supérieures et postdoctorales de l'Université Laval
dans le cadre du programme de maîtrise en agroforesterie
pour l'obtention du grade de Maître ès sciences (M. Sc.)

DÉPARTEMENT DES SCIENCES DU BOIS ET DE LA FORÊT
FACULTÉ DE FORESTERIE, DE GÉOGRAPHIE ET DE GÉOMATIQUE
UNIVERSITÉ LAVAL
QUÉBEC

2012

© Pierre-Manuel Plante, 2012

Résumé

L'objectif de cette étude est de vérifier la distribution racinaire de trois espèces d'arbres implantées en haies brise-vent, soit, le peuplier hybride (*Populus sp.*), le saule (*Salix sp.*) et l'épinette (*Picea sp.*) selon deux types de sol: un sol léger et un sol lourd. La densité racinaire (nombre de racines/dm²) et le nombre de racines par classe de diamètre ont été comptabilisés jusqu'à une profondeur d'un mètre, et ce, à une distance de deux, six et neuf mètres des arbres dans la parcelle agricole.

Les résultats obtenus démontrent que le nombre de racines diminue rapidement après 40 cm de profondeur. Les plus hautes densités racinaires sont observées dans les 30 premiers cm. Le type de sol a eu un léger effet ($p=0,1043$) sur la densité d'enracinement dans les 50 derniers cm de profondeur pour l'ensemble des classes de racines, de plus hautes densités ont été obtenues en sol léger en comparaison au sol lourd. Le peuplier hybride se démarque de façon significative en obtenant un nombre de racines plus élevé que les autres espèces pour les classes 2, 3 et 4. Nous avons observé une étendue limitée à l'intérieur des parcelles agricoles puisque peu de racines ont été comptabilisées à six et à neuf mètres des arbres.

Avant-Propos

J'aimerais à présent profiter du moment pour exprimer toute ma reconnaissance à ceux qui ont contribué à la réalisation de mon projet de maîtrise.

Je tiens en premier lieu à adresser mes plus sincères remerciements à ma directrice de recherche, la Dr. Anne Vanasse qui ma guidé et donné de précieux conseils avant et au cours de la rédaction de mon mémoire. Sa disponibilité, son sens critique, sa gentillesse et sa rigueur m'ont permis de m'améliorer constamment et de pouvoir mener à bien la rédaction de ce mémoire de maîtrise. Je pense aussi à Annie Brégard, professionnelle de recherche, sans qui je n'aurais pas survécu à l'épreuve des analyses statistiques! Merci beaucoup Annie.

Je tiens à remercier André Vézina de l'Institut de technologie et agroalimentaire de La Pocatière, Nathan De Baets anciennement du Centre d'Expertise des Produits Agroforestiers (CEPAF) et Jean-Pierre Dion de Biopterre pour leur aide dans la localisation des haies brise-vent et leur appui technique sur le terrain.

Mes remerciements vont aussi à M. Daniel Marcotte, du département des sols et génie agroalimentaire pour son aide grandement apprécié dans l'analyse granulométrique de mes sols. Enfin, je remercie tous les étudiants et stagiaires; Yannick Bélanger, Olivier Lalonde, Vincent Leblanc, Hélène Munger, Audrey Bouchard et Gilles. Vous avez été d'une aide précieuse.

Encore merci, à toi Guy-Anne, pour m'avoir apporté un soutien moral indispensable tout au long de mes études. Damien, Maël, vous faites partie intégrante de cette belle réussite.

Pour terminer, je remercie Biopterre pour leur appui financier dans le cadre de mon projet de maîtrise.

à mon clan, Guy-Anne, Damien et Maël.

Table des matières

Résumé.....	i
Avant-Propos	ii
Table des matières	iv
Liste des tableaux.....	vi
Liste des figures	vii
Introduction.....	1
2. Revue de littérature.....	3
2.1 Les haies brise-vent	3
2.1.1 Définition et mise en contexte	3
2.1.2 Potentiels d'utilisation	3
2.1.3 Inconvénients et contraintes à l'implantation	4
2.2 Distribution racinaire	5
2.2.1 Architecture racinaire	5
2.2.2 Le choix des espèces à l'étude.....	9
2.2.3 Incidence des propriétés physiques du sol.....	18
2.2.4 Incidence de facteurs environnementaux.....	21
2.3 Méthodes d'étude des racines	23
2.3.1 Méthodes indirectes	23
2.3.2 Méthodes directes	24
3. Hypothèses et objectifs	27
3.1 Hypothèses de recherche	27
3.2 Objectifs de recherche	27
4. Matériels et méthodes	28
4.1 Les sites.....	28
4.2 Les haies	28
4.3 Caractéristiques pédologiques et granulométrie des sites.....	29
4.4 Dispositif expérimental.....	37
4.5 Méthode d'observation des racines.....	37
4.6 Prises de données	38
4.7 Analyses statistiques	39
5. Résultats et Discussion	40
5.1 Densité racinaire de l'ensemble des classes de racines à deux mètres des haies.....	40
5.1.1. Effet de la profondeur d'échantillonnage	41
5.1.2. Effet du type de sol en fonction de la profondeur d'échantillonnage.....	43
5.2 Densité racinaire pour la classe 1 (≤ 1 mm de diamètre) à deux mètres des haies.....	45
5.3 Densité racinaire pour la classe 2 (> 1 à ≤ 5 mm de diamètre), la classe 3 (> 5 à ≤ 10 mm de diamètre) et la classe 4 (> 10 mm) à deux mètres des haies.....	47
5.4 Racines à six et neuf mètres.....	55
6. Discussion générale	56
Conclusion	60
Bibliographie	61
ANNEXE 1 : Présentation des moyennes descriptives des racines comptabilisées à 6 m des haies brise-vent	71

ANNEXE 2 : Présentation des moyennes descriptives des racines comptabilisées à 9 m des haies brise-vent.	74
ANNEXE 3 : Résultats du test du LSD (plus petite différence significative).....	76
ANNEXE 4 : Résultats des analyses physico-chimiques de chacun des sites.....	77

Liste des tableaux

Tableau 1. Classification des racines selon leur diamètre telle que définie dans la littérature.	6
Tableau 2. Informations sur les principales caractéristiques des haies brise-vent étudiées .	30
Tableau 3. Informations sur les principales caractéristiques pédologiques des sites étudiés.	31
Tableau 4. Analyses statistiques pour la densité racinaire de l'ensemble des classes de racines à deux mètres des haies ainsi que pour les classes 1, 2, 3 et 4.	40
Tableau 5. Densité et fréquence relative de l'ensemble des classes racinaires selon la profondeur d'échantillonnage en sol léger et en sol lourd à deux mètres des haies brise-vent.	42
Tableau 6. Densité et fréquence relative des racines de classe 1 (≤ 1 mm de diamètre) et proportion des racines de classe 1 par rapport à l'ensemble des racines selon la profondeur d'échantillonnage à deux mètres des haies brise-vent.	46
Tableau 7. Nombre moyen de racines de la classe 2 (>1 à ≤ 5 mm de diamètre) pour chaque espèce pour toute la profondeur.....	47

Liste des figures

Figure 1. Illustration du réseau plongeant situé dans le compartiment central et du réseau traçant où on retrouve les racines horizontales. Adaptée de Drénou, 2006.....	8
Figure 2. Adaptation du système racinaire selon l'orientation du vent. Adaptée de Danjon et coll. 2005.	22
Figure 3. Granulométrie de l'horizon de surface des sites des haies d'épinette.....	35
Figure 4. Granulométrie de l'horizon de surface des sites des haies de peuplier hybride....	36
Figure 5. Granulométrie de l'horizon de surface des sites des haies de saule.....	37
Figure 6: Schéma du dispositif expérimental d'un site pour l'étude proposée.....	38
Figure 7. Densité racinaire de l'ensemble des classes de racines selon la profondeur d'échantillonnage en sol léger et lourd à deux mètres des haies brise-vent. Les intervalles sur les bâtonnets indiquent l'erreur-type.....	41
Figure 8. Densité racinaire de l'ensemble des espèces d'arbres pour la classe 1 (≤ 1 mm de diamètre) selon la profondeur d'échantillonnage effectué à deux mètres des haies brise-vent. Les intervalles sur les bâtonnets indiquent l'erreur-type.	47
Figure 9. Densité racinaire de l'ensemble des espèces d'arbres et des types de sol pour la classe 2 (>1 à ≤ 5 mm de diamètre) selon la profondeur d'échantillonnage effectué à deux mètres des haies brise-vent. Les intervalles sur les bâtonnets indiquent l'erreur-type.....	48
Figure 10. Densité racinaire pour la classe 3 (>5 à ≤ 10 mm de diamètre) selon l'espèce et la profondeur d'échantillonnage effectué à deux mètres des haies brise-vent. Les intervalles sur les bâtonnets indiquent l'erreur-type.....	49
Figure 11. Densité racinaire pour la classe 4 (>10 mm de diamètre) des espèces de saule, d'épinette et de peuplier selon la profondeur d'échantillonnage effectué en sol léger (A) et en sol lourd (B) à deux mètres des haies brise-vent. Les intervalles sur les bâtonnets indiquent l'erreur-type.....	50

Introduction

« Que le territoire agricole serve d'assise au développement rural, dans une perspective de multifonctionnalité de l'agriculture et d'occupation dynamique du territoire » (CAAAQ, 2008). Cette recommandation tirée du rapport Pronovost, paru en janvier 2008, met en évidence le rôle que doit dorénavant se donner l'agriculture au sein de l'espace rural québécois. Il s'avère que l'agriculture peut produire des effets externes (externalités) positifs décrits par Debailleul (2001; cité dans Baumgartner, 2006) comme :

[...] à produire un paysage agricole de qualité, à entretenir une architecture rurale esthétique, à ne pas porter atteinte à la qualité de l'environnement, à maintenir une biodiversité riche et des habitats fauniques diversifiés [...]

À ces fonctions environnementales et sociales, on peut ajouter que l'agriculture possède une fonction économique; apport alimentaire, production de fibres, agrotourisme et emploi rural (Gagnon, 2005). Ainsi, on parle de multifonctionnalité de l'agriculture. On reconnaît généralement à l'unanimité le caractère multifonctionnel de l'agriculture, mais la faisabilité de son application reste encore à développer et à supporter. On reconnaît toutefois que l'agroforesterie constitue un fournisseur remarquable de biens et services écologiques (De Baets et coll., 2007).

La littérature présente plusieurs définitions de l'agroforesterie. Leakey (1996) suggère que : [...] l'agroforesterie devrait être considérée comme un système de gestion des ressources qui est dynamique, écologique et naturel et qui, par l'intégration des arbres dans le paysage agricole, permet une production durable et diversifiée, procurant aux paysans des bénéfices sociaux, économiques et environnementaux accrus. De Baets et coll. (2007) proposent une autre définition, tout de même semblable à la précédente; l'agroforesterie est un système intégré de gestion des ressources du territoire rural qui repose sur l'association intentionnelle d'arbres ou d'arbustes à des cultures et des élevages, et dont l'interaction permet de générer des bénéfices économiques, environnementaux et sociaux. À la lecture de ces deux définitions, on conçoit que l'agroforesterie supporte le caractère multifonctionnel de l'agriculture.

De Baets et coll. (2007) distinguent deux types d'aménagements agroforestiers au Québec, d'une part, les systèmes à vocation productive et d'autre part, les systèmes à caractère multifonctionnel. La distinction entre les deux systèmes est principalement due au fait que les premiers mettent l'accent sur la production de ressources alimentaires et forestières. Ces systèmes productifs prennent, entre autres, la forme de cultures intercalaires et de cultures de sous-bois. Les systèmes multifonctionnels, quant à eux, combinent la production de produits ligneux et non ligneux aux services environnementaux, sociaux et territoriaux (De Baets et coll., 2007). Les haies brise-vent et les systèmes riverains agroforestiers sont deux exemples de techniques agroforestières multifonctionnelles.

En agroforesterie, l'enracinement de l'arbre idéal serait profond et avec une quantité minimum de racines à la surface afin, entre autres, de récupérer les éléments nutritifs lessivés et limiter les interactions avec le système racinaire des cultures adjacentes (Wood et Burley, 1993; Garrett et coll., 2009). Cette approche théorique est toutefois en contradiction avec la plupart des observations; la majorité des racines se retrouvent dans les horizons de surface (Schroth, 1995). Plusieurs facteurs influencent l'enracinement des arbres. Le type de sol aura un impact considérable sur le développement racinaire de l'arbre (Drénou, 2006); les sols engorgés d'eau vont limiter la prospection racinaire en profondeur par exemple. Enfin, l'architecture racinaire sera aussi tributaire de l'espèce en question.

L'adoption à grande échelle de techniques agroforestières sur le territoire rural québécois est loin d'être acquise, notamment pour des raisons historiques et économiques. La perception de plusieurs agriculteurs reste négative (Caron et coll., 2009). Ainsi, l'étude des systèmes racinaires d'arbres implantés en haies brise-vent permettra de mieux comprendre les interactions entre les arbres et les cultures et par le fait même d'améliorer leur aménagement ainsi que leur intégration dans l'espace rural québécois.

2. Revue de littérature

2.1 Les haies brise-vent

2.1.1 Définition et mise en contexte

Le brise-vent est une barrière naturelle ou artificielle dont le principal objectif est de réduire la vitesse du vent (Brandle et coll., 2009). Le brise-vent naturel est un alignement d'arbres et/ou d'arbustes plantés perpendiculairement aux vents dominants (Schroeder et Kort, 2007). Il peut être implanté autour des bâtiments d'élevage, le long des routes et fréquemment en bordure, ou à l'intérieur, des champs agricoles (Schroeder et Kort, 2007).

Le brise-vent apparaît dans le paysage rural au Royaume-Uni dans les années 1400 où le gouvernement écossais suggéra la plantation d'arbres afin de protéger les cultures (Droze, 1977; cité dans Brandle et coll., 2004). Depuis ce temps, les haies brise-vent sont devenues une composante majeure de plusieurs systèmes agricoles de la planète (Brandle et coll., 2009). Au Canada, un programme a été implanté dans les provinces des Prairies au début du XXe siècle suite à une succession de dommages causés aux cultures par de grands vents (Wiseman et coll., 2007). L'administration chinoise a elle aussi initié dans les années 50 une vaste campagne de plantation de haies brise-vent et de massif forestier afin de réduire l'érosion éolienne en bordure des zones désertiques du nord du pays (Zhao et coll., 1995 cité dans Brandle et coll., 2004). L'utilisation des haies brise-vent en agriculture est plus récente au Québec. Ce sont les producteurs de tabac de la région de Lanaudière, dans les années 1940, qui ont été les premiers à adopter cette technique agroforestière afin de protéger leurs cultures (Caron et coll., 2009). Son utilisation s'est par la suite peu à peu étendue. Si bien qu'on estime que depuis 25 ans, entre 300 et 500 kilomètres de haies brise-vent sont annuellement implantés sur le territoire québécois (De Baets et coll., 2007).

2.1.2 Potentiels d'utilisation

Le potentiel d'utilisation des haies brise-vent dans l'espace rural québécois est considérable (Caron et coll., 2009). Autour des bâtiments agricoles, les haies brise-vent peuvent procurer de nombreux avantages. Elles atténuent l'impact visuel des bâtiments d'élevage et

favorisent sous certaines conditions une réduction des odeurs et de la poussière (De Baets et coll., 2007; Schroeder et Kort, 2007). De plus, une haie bien localisée peut entraîner des réductions significatives, jusqu'à 10 %, des coûts de chauffage (Vézina et coll. (2007a). Ces économies varient en fonction de la structure de la haie (hauteur, longueur, largeur et orientation) et des espèces ligneuses qui la composent.

Les brise-vent adjacents aux routes améliorent les conditions de conduite hivernale. Ils captent la neige, réduisent les accumulations de neige sur la chaussée et la poudrière (Volk et coll., 2006). Selon Caron et coll. (2009), la plupart des axes routiers québécois orientés de l'est vers l'ouest bénéficieraient de la protection offerte par des brise-vent.

Par ailleurs, l'implantation d'une haie favorise un microclimat bénéfique aux cultures agricoles. En réponse à la réduction de la vitesse du vent, la teneur en eau du sol et la température de l'air durant le jour augmentent (Kort, 1988; Brandle et coll., 2004). De plus, une réduction de la vitesse du vent combinée à une plus grande teneur en eau du sol réduisent les risques d'érosion éolienne (Caron et coll., 2009). D'autres bienfaits sont aussi le résultat d'une diminution de la vitesse du vent; amélioration de la pollinisation, réduction des dommages mécaniques causés par le sol aux tissus des jeunes plants et augmentation de la couverture de neige (Kort, 1988; Vézina, 1991). Une synthèse de plusieurs travaux de recherche réalisée par Kort (1988) démontre que la synergie de ces bienfaits engendre pour une grande variété de cultures des augmentations de rendement allant de 6 à 44%.

Enfin, d'autres bénéfices associés aux haies brise-vent sont fréquemment cités dans la littérature dont la séquestration de carbone et la lutte aux changements climatiques (Brandle et coll., 1992 cité dans Brandle et coll., 2009; Montagnini et Nair, 2004), le support au maintien ou encore à l'augmentation de la biodiversité en milieu agricole (Millspaugh et coll., 2009). Finalement, dans certains cas, les haies brise-vent ont le potentiel de diversifier les revenus agricoles par le biais de la vente de bois ou de petits fruits (Vézina et coll., 2007b).

2.1.3 Inconvénients et contraintes à l'implantation

La perte de rendement de la culture adjacente à la haie brise-vent est probablement l'inconvénient majeur de ce type d'aménagement (Brandle et coll., 2009). Celle-ci est

variable d'un site à l'autre, mais s'étend généralement sur une distance équivalente à deux fois la hauteur de la haie (Kort, 1988). Elle s'explique par une concurrence entre les arbres et les cultures pour les ressources nutritives, lumineuses et hydriques (Kort, 1988; Vandebelt et coll., 1990; Sudmeyer et coll., 2002). D'autres désagréments sont cités dans la littérature, dont l'augmentation de l'incidence des maladies fongiques due à un manque de circulation d'air et de l'accroissement de l'humidité de l'air (Brandle et coll., 1984), le risque de gel dû à une insuffisance de la circulation de l'air (Jensen, 1964 cité dans Caron et coll., 2009) et l'entretien fréquent d'une jeune haie (Vézina et coll., 2007b).

2.2 Distribution racinaire

2.2.1 Architecture racinaire

Le système racinaire d'un arbre est formé de deux types de racines; les racines ligneuses et les racines fines (McClaugherty et coll., 1982; Lyford, 1980; Drénou, 2006). Ces auteurs distinguent les racines ligneuses des racines fines par leur aptitude à produire du xylème secondaire, le bois, et par leur caractère permanent. Les racines ligneuses de par leur croissance annuelle en longueur et en diamètre, ainsi que leurs ramifications, assurent l'accroissement du volume de sol exploré et exploité par l'arbre et assurent la fixation de l'arbre dans le sol. Ces racines portent les racines fines dont la fonction principale est d'assurer l'approvisionnement en eau et en éléments nutritifs de l'arbre (Gilman, 1990a; Baize et Jabiol, 1995; Gray, 2000). Il est à noter qu'elles sont généralement mycorhizées (Drénou, 2006).

Dans la littérature, il est courant de séparer les racines en différentes classes de diamètre (Tableau 1). On reconnaît généralement que le diamètre des racines fines se situe entre 0,5 à 2 mm et que celui des racines ligneuses peut aller de 2 mm à plusieurs décimètres (Tableau 1). Les classes de diamètre sont arbitraires et ne peuvent être totalement corrélées à des fonctions spécifiques des racines (Böhm, 1979; Baize et Jabiol, 1995). L'utilisation de différentes classes de diamètre apparaît donc être un choix d'ordre pratique afin de faciliter le travail et ainsi obtenir des informations sur l'abondance de racines fines, petites, moyennes et grosses composant le système racinaire.

Par ailleurs, au premier abord, l'architecture racinaire des arbres exprime un profond désordre. Néanmoins, les arbres adultes possèdent une architecture racinaire très semblable caractérisée par deux réseaux de racines ligneuses; un réseau plongeant et un réseau traçant, et deux compartiments distincts; un compartiment central autour du collet et un compartiment périphérique (Lyr et Hoffman, 1967; Lyford, 1980; Helliwell, 1989; Lucot, 1994; Drénou, 2003).

2.2.1.1 Profondeur d'enracinement

Le réseau plongeant inclut le pivot primaire, issu de la graine, et est appelé très souvent à disparaître rapidement chez de nombreuses espèces (Sutton, 1980; Gilman, 1990b; Cutler et coll., 1990; Raimbault, 1991). Il sera remplacé ultérieurement par les pivots secondaires. Ces racines pour la plupart verticales ou quelquefois obliques (Gilman, 1990a; Lucot, 1994) atteignent une profondeur pouvant aller exceptionnellement jusqu'à cinq ou six mètres (Stone et Kalisz, 1991), mais rarement au-delà d'un mètre et demi (Ludovici, 2004; Drénou, 2006) à deux mètres (Gasson et Cutler, 1990). Ces quelques grosses racines profondes portent peu de racines fines (Drénou, 2006).

Tableau 1. Classification des racines selon leur diamètre telle que définie dans la littérature.

Très fines	Fines	Petites	Moyennes	Grosses	Très grosses	Espèces ou peuplements investigués	Références
< 0,5mm	>0,5-2mm			>10-20mm		espèces variées	Böhm, 1979
	< 1mm			> 1mm		olivier (<i>Olea europaea</i>)	Fernandez et coll., 1991
				> 2mm		pinède-chênaie	Sainju et Good, 1993
	<0,5m m		0,5-2mm	>2-5mm		cassia du Siam (<i>Cassia siamea</i>), faux mimosa (<i>Leucaena leucocephala</i>) et gliricidia (<i>Gliricidia sepium</i>)	Rao et coll., 1993
		<2mm	2-5mm	>5mm		pommier (<i>Malus domestica</i>)	Fernandez et coll., 1995
	< 2mm			> 2mm		pin à encens (<i>Pinus taeda</i>) et copalme d'Amérique (<i>Liquidambar styraciflua</i>)	Mou et coll., 1997

	≤ 2mm					saule vannier (<i>Salix viminalis</i>)	Rytter et Hansson, 1996
		< 2mm		> 2mm		pin tordu latifolié (<i>Pinus contorta</i>) et épinette blanche (<i>Picea glauca</i>)	Nadeau et Pluth, 1997
< 1mm	1-2mm	>2-5mm	>5-10 mm			chêne sessile (<i>Quercus petraea</i>) et chêne péonculé (<i>Quercus robur</i>)	Thomas, 2000
< 1mm	1-5mm		5-20 mm	20-50mm	> 50mm	sapin de Douglas (<i>Pseudotsuga menziesii</i>)	Curt et coll., 2001
	<2mm	2-5mm	5-20mm	>20mm		épinette de Norvège (<i>Picea abies</i>)	Schmid et Kazda, 2002
	≤ 1mm	1,1-5mm	5,1-10mm	> 10mm		érica (<i>Erica</i> sp.), fougère aigle (<i>Pteridium aquilinum</i>), ronce (<i>Rubus ulmifolius</i>) et <i>Ulex jussiaei</i>	Silva et Rego, 2003
	≤ 2mm	2-≤ 5mm	5-≤ 10 mm	10-≤ 20mm	< 20mm	Pin maritime (<i>Pinus pinaster</i>), pin de Monterey (<i>Pinus radiata</i>), Eucalyptus commun (<i>Eucalyptus globulus</i>) et Eucayptus de Kochi (<i>Eucalyptus kochii</i>)	Sudmeyer et coll., 2004
	<2mm	2-20mm				hêtre (<i>Fagus sylvatica</i>)	Bakker et coll., 2008

2.2.1.2 Extension racinaire latérale

Le réseau traçant réunit les racines ligneuses issues des pivots et/ou du collet et ayant une direction de croissance horizontale ou légèrement oblique (Coutts, 1989 et Drénou, 2006). Ces racines, appelées charpentières, peuvent être longues et rayonnent parfois à plus de 40 mètres du collet (Stone et Kalisz, 1991; Cutler, 1993). Les charpentières peuvent être réparties de manière plus ou moins étagée le long du pivot primaire ou être uniquement situées à proximité du collet (Lyford, 198; Lucot et Bruckert, 1992).

2.2.1.3 Développement de l'ancrage racinaire

L'agencement des réseaux plongeants et traçants conduit à la différenciation de deux compartiments. Le compartiment central, d'un rayon de un à trois mètres autour du collet, est constitué de grosses charpentières horizontales portant l'ensemble des pivots secondaires de l'arbre et assure à ce dernier la stabilité et l'ancrage au sol nécessaire (Lyford, 1980; Gilman, 1990a; Raimbault, 1991; Drénou, 2001; Ludovici, 2004). Le compartiment périphérique est essentiellement composé de racines horizontales superficielles dont la profondeur reste constante, généralement dans les 30 à 60 premiers centimètres de profondeur (Gilman, 1990a; Lucot, 1994; Drénou, 2006). La figure 1 illustre ces deux réseaux ainsi que les deux compartiments.

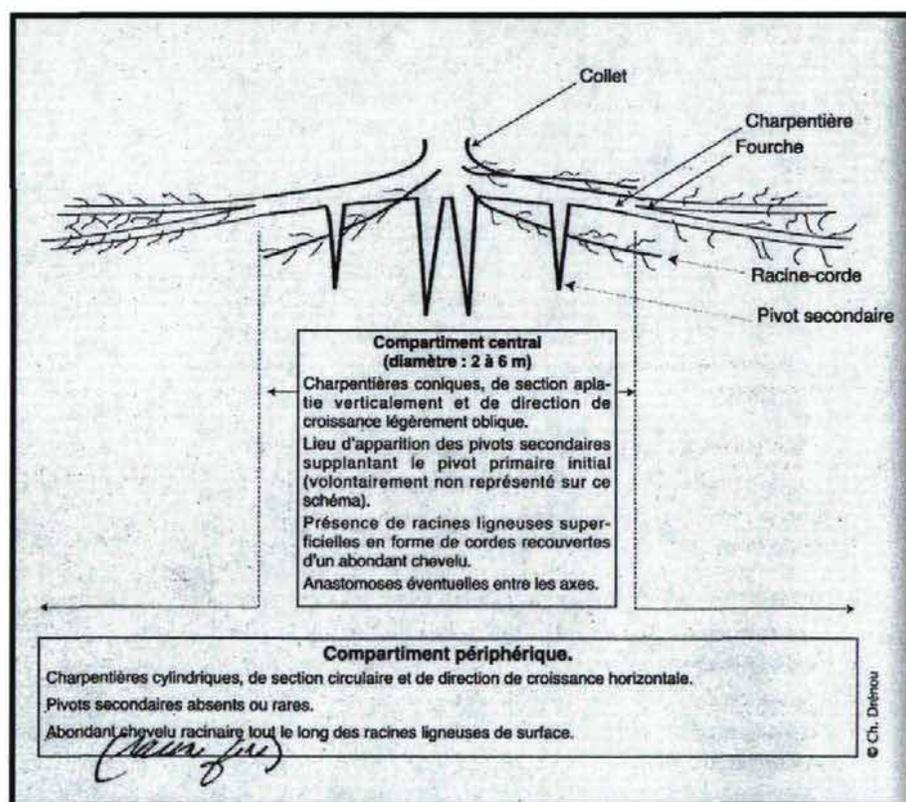


Figure 1. Illustration du réseau plongeant situé dans le compartiment central et du réseau traçant où on retrouve les racines horizontales. Adaptée de Drénou, 2006

Bien qu'il existe une architecture racinaire similaire, il existe des processus d'enracinement propres à certaines espèces d'arbres. À cet égard, Raimbault (1991) et Atger et Edelin (1994) ont démontré que certaines essences tropicales telles que le kaiman-udu (*Laetia procera*), le bois canon (*Cecropio obtusa*) et le platane hybride (*Platanus hybrida*) ont la

faculté de répliquer totalement ou partiellement leur système racinaire dans l'espace et le temps, un processus appelé réitération. Cette stratégie d'occupation des sols peut conduire, d'une part, à l'ajout de nouvelles racines sur des portions anciennes ayant cessé leur allongement et d'autre part, elle peut aussi aboutir à la mise en place de nouvelles générations de charpentières près du collet. Enfin, un deuxième processus d'enracinement correspond à la direction de croissance des racines explorant le sol en profondeur avec trois cas de figure : des racines toutes verticales (Lyford et Wilson, 1964; Lucot, 1994; Drénou, 2003), des racines obliques dans le compartiment central, puis verticales au-delà (Lyford, 1980; Raimbault, 1991) et enfin des racines toutes obliques (Drénou, 2003; Köstler et coll., 1968 cité dans Drénou, 2006). Par conséquent, ces stratégies d'occupation du milieu souterrain se refléteront dans la distribution racinaire et dans la densité des systèmes racinaires (Drénou, 2006).

Il s'avère donc que les arbres exposent une organisation racinaire commune, mais chaque espèce ou chaque sujet au sein d'une espèce exprime une forme d'enracinement qui lui est propre (Drénou, 2000). Afin d'éclaircir ces propos, prenons en exemple le cas du pin maritime (*Pinus pinaster*) dont l'enracinement a été observé chez 14 sujets répartis sur six sites dans cinq régions de la France (Drénou, 2003). L'auteur décrit l'observation d'un pivot primaire dont la ramification conduit à la naissance d'un à trois étages de charpentières selon les sites, mais l'arbre conserve à chaque fois, indépendamment du site, les trois caractéristiques de son type morphologique : pivots secondaires tous verticaux, charpentières linéaires et incapacité de produire une deuxième génération de charpentières (aucune réitération).

2.2.2 Le choix des espèces à l'étude

L'agroforesterie implique par définition des interactions souterraines entre les plantes ligneuses et les cultures. Inévitablement, le système racinaire d'arbres ou d'arbustes établis pourra concurrencer celui de la culture annuelle pour les ressources nutritives et hydriques (Vandelbelt et coll. 1990). Afin d'atténuer cette concurrence, il est souhaitable que les ligneux aient des systèmes racinaires qui pénètrent profondément, mais s'étendent peu latéralement (Young, 1995; Garrett et coll, 2009). Cependant, dans certains cas, l'inconvénient d'un enracinement profond est que celui-ci est susceptible d'atteindre le

système souterrain de drainage agricole et de causer des dommages en l'obstruant (Shultz et coll, 2009). Ces derniers auteurs suggèrent de planter l'arbre à une distance minimale du drain qui est équivalente à la hauteur des arbres à maturité. Ainsi, selon les auteurs, on évite que les racines encombrant et bouchent les drains agricoles. À ce propos, Marchand et Masse (2008) ont récemment mis en lumière les enjeux de développement et d'application de quatre techniques agroforestières suite à une consultation d'agriculteurs québécois et d'autres provenant des prairies canadiennes. Les auteurs ont présenté à 81 personnes quatre techniques agroforestières implantées à l'aide du peuplier hybride et du saule; les plantations en blocs, les systèmes de bande de protection riveraine, les systèmes de culture à courte rotation et les systèmes de culture intercalaires. Les agriculteurs étaient par la suite appelés à dévoiler leur perception en regard à ces techniques en terme de désagréments et d'opportunités. Près de 47 % des agriculteurs perçoivent le système racinaire des arbres comme un enjeu technique freinant l'adoption de l'agroforesterie en considérant les risques engendrés par la présence d'arbres près des drains agricoles.

Cette étude exploratoire de Marchand et Masse (2008) souligne l'importance de valider ou non ces perceptions et de préciser l'état des systèmes racinaires de deux genres ligneux, *Populus* et *Salix*, dont le potentiel agroforestier est considérable. À cet égard, la section suivante fera brièvement état de l'utilisation du peuplier et du saule en agroforesterie et de l'état des connaissances de leur architecture racinaire. Nous jugeons aussi pertinent d'aborder le genre *Picea* puisqu'il s'agit d'un genre abondamment utilisé lors de l'implantation de haies brise-vent au Québec (De Baets et coll., 2007).

2.2.2.1 Utilisation agroforestière et architecture racinaire

Peuplier hybride (*Populus sp.*)

La physiologie particulière du peuplier hybride (*Populus sp.*) et sa croissance rapide lui confèrent des avantages appréciables et en font un choix intéressant pour certaines techniques agroforestières (Fortier et coll., 2008). D'une part, en milieu riverain, le peuplier hybride est bien adapté aux conditions d'excès d'eau temporaire et procure à moyen terme des bénéfices qui complètent la strate herbacée; stabilisation accrue des berges grâce aux racines profondes, accumulation rapide de phosphore dans sa biomasse (Kelly et coll., 2007), amélioration de l'habitat faunique (Schultz et coll. 2009), création d'un microclimat bénéfique à la faune aquatique et embellissement du paysage agricole (Fortier et coll., 2008). D'autre part, en système de culture intercalaire où l'un des objectifs est de maximiser l'utilisation de la terre afin de créer des bénéfices économiques et environnementaux, certains clones de peuplier hybride permettent d'atteindre rapidement une production de bois de grande qualité, un facteur essentiel à la rentabilité du système (Rivest et Olivier, 2007). Au Québec, les cultures intercalaires sont très peu répandues, mais la recherche universitaire s'y intéresse de plus en plus (De Baets et coll., 2007). Une récente étude québécoise de Rivest et coll. (2009) démontre qu'il est envisageable, sous certaines conditions, d'obtenir d'une culture de soya associée aux peupliers hybrides une productivité similaire à celle observée en régie conventionnelle (sans peupliers hybrides). Dans le même ordre d'idée, le peuplier hybride se prête bien à la ligniculture en courte rotation dont l'objectif principal est l'obtention d'un maximum de rendement de matière ligneuse. Sans être considérée comme une pratique agroforestière en soi, la ligniculture en courtes rotations offre un potentiel certain, en particulier pour la mise en valeur des friches agricoles (De Baets et coll., 2007). Enfin, en ce qui concerne les haies brise-vent, le peuplier hybride est déjà fréquemment utilisé sur le territoire québécois (De Baets et coll., 2007) puisque sa croissance rapide en hauteur lui permet d'exercer une protection à court terme (Vézina et coll., 2007b). Selon ces derniers, les racines envahissantes du peuplier constituent un frein à son utilisation.

À la lumière d'une revue bibliographique exhaustive, il est possible de dégager un schéma général de la distribution des racines ainsi que de l'architecture racinaire du genre *Populus*.

En premier lieu, Turrel (1967) a effectué une excavation complète d'un peuplier hybride (I-214) âgé de cinq ans. Il a établi que les racines de surface ne survivent pas au travail du sol réalisé, dans ce cas, jusqu'à une profondeur de 15 cm. Au-delà et jusqu'à une profondeur de 55 cm, ce qui correspond aux horizons riches, les racines sont longues, assez grosses et horizontales. Dans la strate de profondeur 55-90 cm toujours humide, les racines sont courtes. Aussi, il démontre qu'aucune racine n'est présente dans les horizons engorgés, les peupliers ne poussent pas dans l'eau bien qu'ils soient de grands consommateurs d'eau. Gale et Grigal (1987) affirment que 40 % des racines, sans égard aux diamètres de celles-ci, de *Populus tremuloides* se trouvent dans les 10 premiers centimètres de sol.

Strong et La Roi (1983a, 1983b et 1985) ont accompli une série de profils afin d'observer la distribution, la profondeur, le diamètre et l'étendue racinaire de peuplements de *Populus tremuloides* âgés de 19 à 170 ans établis sur texture fine et grossière. Dans un premier temps, sur texture sableuse (grossière), ils observent, près de la souche, une architecture racinaire marquée par l'émergence de quelques racines plongeantes et par la croissance de racines obliques à partir des racines latérales. Ces racines obliques descendent à une profondeur d'un mètre et elles sont particulièrement ramifiées. Les racines au diamètre supérieur à 5 mm sont généralement observées dans les 10 premiers cm. Quant aux racines fines (< 5mm), elles sont distribuées le long du profil, dont la profondeur excède au moins 1,25 m, mais demeurent néanmoins plus nombreuses dans les 10 premiers cm. De façon générale, 50 % des racines se trouvent dans les premiers 23 cm de profondeur avec une densité plus élevée dans la strate 0-5,5 cm. Dans un deuxième temps, sur un loam argileux (texture fine), le peuplier démontre un enracinement traçant avec seulement quelques racines horizontales légèrement obliques, de courtes racines situées près de la souche et très peu de racines verticales, lesquelles descendent jusqu'à 50 cm de profondeur. La couche superficielle de sol, 0-11 cm, présente la plus grande densité racinaire, on y retrouve 50 % des racines. Indépendamment des textures de sol, les racines latérales s'étendent jusqu'à 2 mètres de la souche à une profondeur variant entre 3 et 8 cm.

Stone et Kalisz (1991) ont réalisé une revue bibliographique portant sur l'extension maximum des racines verticales et horizontales de plusieurs espèces du genre *Populus*. On y apprend que le *Populus deltoides* expose une profondeur maximale d'enracinement de 3,6

mètres sur un loam sableux argileux alors que le *Populus tremuloides* révèle une extension horizontale maximale de 30,5 mètres sur une argile.

Puri et coll. (1994), Gray (2000) et Crow et Houston (2004) observent chez le *Populus deltoides* et le peuplier hybride des distributions racinaires semblables. Dans l'étude de Puri (2003), celui-ci dénombre près de 100 % du nombre total de racines fines (< 2 mm de diamètre) dans les 30 premiers cm et environ 80 % des racines dont le diamètre excède 5 mm ont été dénombrés dans la strate 0-60 cm de profondeur. Gray (2000), dont l'étude consistait à quantifier la distribution racinaire à différentes distances de la souche de peupliers hybrides âgés de 12 ans, dénombre 95 % du nombre total des racines dans les 40 premiers cm. Crow et Houston (2004), dans leur étude portant sur 16 peupliers hybrides, ont démontré que l'horizon 0-36 cm contient en moyenne 81 % du nombre total de racines. En ce qui concerne l'extension des racines latérales, Puri et coll. (1994) a mesuré des racines pouvant aller jusqu'à 5,2 mètres de distance de la souche. Gray (2000) a quant à lui observé, dans un système intercalaire, des racines à 4,5 mètres de la souche. Il affirme par ailleurs que le travail du sol élimine la croissance racinaire dans la portion où a lieu le travail. Mulia et Dupraz (2006) ont observé, aussi dans un système intercalaire, pour des peupliers hybrides de 20 m de hauteur, des racines pouvant aller au moins jusqu'à 8 m de l'arbre. De plus, une proportion importante des ces racines étaient situées à plus de 2 m de profondeur.

Enfin, Dehoche (1997) et Drénou (2003) apportent des observations descriptives au sujet de l'architecture racinaire de peupliers hybrides obtenus de plançons¹. Dehoche (1997) décrit que les peupliers hybrides du groupe interaméricain² (cultivar Beaupré, Boelare, Raspalje, Unal) possèdent des racines de surface qui sont étendues, un enracinement très développé et un système racinaire mixte (verticale et horizontale) tout en étant très charpenté (plusieurs étages de charpentières présentes). Il ajoute, au sujet des peupliers hybrides du groupe euraméricain³, que ces derniers possèdent un système racinaire horizontal fasciculé essentiellement de surface. Drénou (2003) amène quelques précisions au sujet des peupliers

¹ Un plançon est essentiellement un matériel végétal utilisé pour la plantation des peupleraies. C'est une tige de 3-4 mètres de hauteur, sans racine ni branche. Il est enfoncé dans le sol au moment de la plantation à une profondeur de 1 mètre environ (Drénou, 2006).

² Le groupe interaméricain fait référence à un croisement entre le *Populus trichocarpa* et *Populus deltoides*.

³ Le groupe euraméricain fait référence à un croisement entre le *Populus deltoides* et *Populus nigra*.

hybrides. Ses observations des architectures racinaires suggèrent l'impossibilité d'apposer un type de développement racinaire à un groupe. Dans un premier temps, l'auteur observe pour le cultivar Beaupré (groupe interaméricain) des directions de croissance toutes verticales chez les racines explorant le sol en profondeur. Elles peuvent changer de direction en cas d'obstacles, mais reviennent à la verticale dès la disparition des contraintes. Puis dans un deuxième temps, pour un autre clone issu des interaméricains, le Raspalje, Drénou (2003) observe chez les arbres adultes des pivots verticaux sous les racines horizontales, de grosses racines obliques issues du plançon concentrées dans la partie centrale et un ou deux étages de charpentières horizontales. Dès lors, il devient difficile d'associer une architecture racinaire à un groupe.

Le saule (Salix sp.)

Leurs caractéristiques physiologiques intrinsèques incluent une capacité d'enracinement en profondeur supérieure à d'autres espèces ligneuses (Schultz et coll., 1995), un système racinaire étendu (Kuzovkina et Quigley, 2005), une tolérance reconnue aux sols engorgés d'eau (Jackson et Attwood, 1996), une croissance en hauteur rapide (Vézina et coll., 2007b) et une multiplication végétative facilitée (Kuzovkina et Quigley, 2005). Ces caractéristiques font en sorte que les espèces du genre *Salix* sont particulièrement bien disposées à être utilisées dans le cadre de projets agroforestiers et de génie végétal. La croissance rapide du saule fait en sorte qu'il se prête bien à la ligniculture en courtes rotations. Au Québec, d'importants travaux sont menés depuis une vingtaine d'années afin de comparer la croissance et le rendement en fonction des espèces et des clones utilisés (De Baets et coll., 2007). Aussi, les espèces du genre *Salix* sont abondamment utilisées dans des travaux de restauration et de stabilisation des berges (Kuzovkina et Quigley, 2005; Volk et coll., 2006). Enfin, on les utilise aussi afin de créer des haies brise-vent ou encore des structures naturelles de protection (Volk et coll., 2006). À ce sujet, Vézina et coll. (2007b) affirme que ses racines envahissantes constituent un frein à son utilisation.

Rytter et Hansson (1996) rapportent que 90 % des racines de saules établies en ligniculture en courtes rotations sont d'un diamètre inférieur à 2 mm et qu'elles se retrouvent majoritairement dans une profondeur inférieure à 30 cm, bien que quelques racines aient été observées à 1,3 mètre de profondeur. Une étude réalisée par Schroeder et coll. (2007)

comparant la distribution racinaire de quatre saules appartenant à deux espèces de saules, régulièrement récoltés (dans le but de produire de la biomasse) ou non semble confirmer les chiffres obtenus par Rytter et Hansson (1996). Les saules, indépendamment de l'espèce et s'ils étaient récoltés ou non, montraient un enracinement concentré dans la strate 0-45 cm. De fait, entre 88 et 98 % des racines de tous les saules se trouvaient dans la strate 0-45 cm. Ajoutons aussi que 94 % des racines avaient un diamètre inférieur à 1 mm, 5 % avaient un diamètre entre 1 et 10 mm et seulement 1 % du nombre total des racines avaient un diamètre entre 10 et 15 mm.

Dans une autre étude réalisée dans un système de ligniculture en courte rotation par Crow et Houston (2004), 77 % des racines se trouvaient dans l'horizon 0-36 cm. De plus, 65 % des racines étaient d'un diamètre inférieur à 1 mm et le diamètre des racines diminuait avec l'augmentation de la profondeur.

Bien que ces derniers résultats puissent suggérer que l'enracinement du saule est concentré en surface, il existe des observations nous indiquant que les racines du saule peuvent atteindre des profondeurs importantes. Stone et Kalisz (1991) ont réalisé une revue bibliographique portant sur l'extension maximum des racines verticales et horizontales du genre *Salix*. D'une part, on y apprend que Cutler et Richardson (1981, cités dans Stone et Kalisz, 1991) ont observé, dans une argile, un enracinement latéral de 40 mètres pour une espèce du genre *Salix sp.* D'autre part, selon Sprackling et Read (1979, cités dans Stone et Kalisz, 1991), les racines de l'espèce *Salix amygdaloides* peuvent atteindre une profondeur de 4,2 mètres sur un sable loameux. Dans une étude réalisée par Keller et coll. (2003), où les auteurs abordent l'efficacité de quatre espèces végétales à extraire les métaux lourds du sous-sol, le *Salix viminalis* se démarque par une colonisation racinaire des horizons profonds (mesures prises jusqu'à 0,7 m), se prêtant ainsi très bien à une décontamination des sols en profondeur. Selon les auteurs, ces résultats pointent dans la direction de ceux obtenus par Polomski et Kuhn (1998; cités dans Keller et coll., 2003) où ces derniers ont confirmé des potentiels d'enracinement à 2 mètres de profondeur.

Enfin, Schultz et coll. (1995) ont comparé la biomasse racinaire de huit espèces végétales, dont trois espèces d'arbres (le saule, le peuplier hybride et l'érable argenté), implantées dans un système riverain agroforestier. Les mesures de biomasse ont été compilées à partir d'échantillons pris sous chacune des espèces. Parmi les trois espèces d'arbres, le saule se

démarque avec une biomasse racinaire près de trois fois celle du peuplier hybride et deux fois celle de l'érable argenté. De plus, 16 % de la biomasse totale racinaire du saule se trouvait dans la strate 75-110 cm de profondeur. Ces résultats illustrent que le saule a la capacité de créer un enracinement dense et profond dans des sols dont les contraintes d'humidité sont potentiellement sévères.

L'épinette blanche (Picea glauca) et l'épinette de Norvège (Picea abies)

L'épinette blanche est l'une des espèces les plus utilisées en reboisement au Québec avec 28 millions de plants mis en terre annuellement (Carles et coll., 2008). L'épinette blanche est aussi l'espèce la plus employée après le frêne rouge dans les haies brise-vent (De Baets et coll., 2007). L'épinette de Norvège, originaire d'Europe, est aussi fréquemment implantée en haie brise-vent dans les zones adaptées à sa rusticité (De Baets et coll., 2007). Ces deux espèces démontrent une grande capacité d'adaptation à différentes conditions pédologiques et climatiques (Puhe et Ulrich, 2001 cités dans Puhe, 2003; Vézina et coll., 2007b). Leur feuillage persistant offre une protection continue toute l'année et présente l'avantage de réduire les odeurs et les coûts de chauffage des bâtiments d'élevage (Vézina et coll., 2007a). L'épinette blanche est plus rustique et demande moins d'entretien que l'épinette de Norvège (Vézina et coll., 2007b). Cette dernière procure toutefois une protection plus hâtive grâce à une croissance en hauteur plus rapide (Vézina et coll., 2007b).

Strong et La Roi (1983b) ont déraciné quatre spécimens d'épinette blanche âgés de 19 à 58 ans, dont trois établis en sol sableux et un établi sur un sable reposant sur un loam argileux, en vue de décrire leur système racinaire. L'étude réalisée en Alberta en forêt boréale consistait à mesurer l'étendue des racines latérales, la profondeur d'enracinement, la biomasse racinaire et d'observer l'architecture verticale (racines obliques et plongeantes) et horizontale (racines latérales) de l'espèce. Les mesures recueillies et les observations font état d'un enracinement similaire, peu importe le type de sol. De fait, les racines latérales constituaient plus de 95 % de la biomasse racinaire. Ces racines latérales, au nombre de quatre à six, s'étendaient jusqu'à environ sept mètres de la souche à une profondeur variant de 5 à 10 cm. Sous les racines latérales à 30 cm de la souche, les auteurs ont observé des racines obliques dont le caractère ramifié et lignifié laisse supposer une fonction d'ancrage. Ces racines allongent avec le temps puisqu'elles étaient absentes sur un arbre âgé de 19 ans

et atteignaient un mètre de profondeur pour un arbre de 58 ans. Les auteurs ajoutent au sujet de ces racines, sans préciser davantage, qu'elles sont moins développées sur texture fine. Enfin, les racines latérales portent aussi des racines fines (< 5 mm), courtes, ramifiées et obliques pouvant atteindre 40 cm de profondeur. Leur nombre croît le long des racines latérales au fur et à mesure que la hauteur de l'arbre augmente.

Nadeau et Pluth (1997) ont vérifié le système racinaire d'épinettes blanches âgées de 10 ans et plantées sur des sols de type loameux et loam argileux. La densité et la distribution racinaire ont été notées en exposant les racines sur une tranchée de 1 m x 1 m à moins de 20 cm des tiges. Les résultats indiquent que les petites racines (< 2 mm de diamètre) atteignent un mètre de profondeur et que les racines dont le diamètre excède 2 mm de diamètre se retrouvent principalement dans la strate 0-48,5 cm de profondeur. La densité racinaire est la plus élevée en surface et décroît en profondeur.

Dans une autre étude portant sur la distribution racinaire de l'épinette blanche, Van Rees (1997) démontre que la majorité des racines (50 %) se retrouvent dans l'horizon superficiel du sol forestier. De plus, bien que les résultats montrent un enracinement pouvant atteindre 1,2 mètre de profondeur pour une grande variété de types de sol, seulement 10 % du nombre total de racines sont dénombrées au-delà de 60 cm. Ces résultats réaffirment en partie ceux obtenus par Safford et Bell (1972) dans une plantation d'épinette blanche au Maine. Ces derniers ont mesuré la biomasse des racines fines (≤ 3 mm) à intervalle irrégulier jusqu'à une profondeur de 45 cm. Les résultats indiquent un enracinement essentiellement superficiel, où 87 % de la biomasse racinaire totale provient de l'horizon de surface (0-15 cm).

Au sujet de l'épinette de Norvège, Drénou (2003 et 2006) constate chez huit spécimens une architecture commune composée de trois à cinq longues et grosses racines ligneuses horizontales et superficielles, souvent plus longues que l'arbre n'est haut. Sous ces racines ligneuses, appelées charpentières, apparaissent de nombreux pivots verticaux ramifiés qui atteignent une profondeur variable selon le type de sol (Puhe, 2003). Contrairement aux idées véhiculées, Puhe (2003) affirme qu'il est inexact de décrire l'enracinement de l'épinette de Norvège comme étant superficiel. Il cite en exemple Wagenknecht et Belitz (1959, cités dans Puhe, 2003) qui ont trouvé des racines à 4 mètres de profondeur dans des

sols à texture sableuse ou encore une de ses propres études (Puhe, 1994; cité dans Puhe, 2003) où des racines appartenant à un spécimen de 28 ans ont été détectées à 2,5 mètres de profondeur sur un loam argileux.

Les résultats des études de Drénou (2003 et 2006) et de Puhe (2003) s'ajoutent à ceux rassemblés par Stone et Kalisz (1991) dans une synthèse de travaux portant sur l'extension maximum des racines verticales et horizontales de plusieurs espèces du genre *Picea*. Selon cette revue bibliographique, Köstler et coll. (1968, cités dans Stone et Kalisz, 1991) et Vater (1927, cité dans Stone et Kalisz, 1991) ont mesuré respectivement une profondeur d'enracinement de 6 et 2,1 mètres, de même qu'une extension des racines latérales de 18 et 9,3 mètres pour l'épinette de Norvège.

2.2.3 Incidence des propriétés physiques du sol

Bien que la génétique ait une incidence sur le type d'enracinement (Das et Chaturvedi, 2008), la distribution racinaire dépend de nombreux autres facteurs, notamment de la fertilité des sols, des techniques culturales et des différentes contraintes de sol (Lebourgeois et Jabiol, 2002; Drénou, 2003 et 2006; Bakker et coll., 2008).

Ainsi, on sait que les racines tendent à se développer dans des milieux où les ressources sont abondantes (Mou et coll., 1995 et 1997; Schmid et Kazda, 2002; Hutchings et John, 2003). À cet égard, Sainju et Good (1993) et Strong et La Roi (1985) ont démontré que la densité racinaire est directement reliée à la teneur en matière organique, à la concentration des éléments nutritifs et à la porosité à l'intérieur du profil de sol.

Pour ce qui est des techniques culturales, les méthodes de propagation, les densités de plantation et le travail du sol sont reconnues comme étant des facteurs déterminants pour l'enracinement. Selon Sutton (1969, cité dans Puhe, 2003) et Harrington (1989, cité dans Gray, 2000), les arbres qui sont plantés exposent une architecture racinaire différente des arbres qui poussent en milieu naturel. Ils concluent que la plantation d'arbres déforme considérablement le système racinaire, influençant ultérieurement le développement racinaire. Gilman (1990a) précise que l'arbre planté présente très rarement un pivot primaire intact, profond et même que celui-ci est pour la plupart du temps absent.

Aussi, la concurrence entre arbres voisins peut induire un développement vertical des racines, lesquelles seraient normalement horizontales chez des sujets isolés. De fait, Caldwell (1987, cité dans Drénou, 2006) a comparé la morphologie racinaire de pommiers (*Malus. sp.*) plantés à des espacements de 0,3 m à celle de pommiers plantés à des espacements de 2,4 m. La densité de plantation la plus élevée présentait une morphologie racinaire verticale. Il semble toutefois que ce n'est pas toujours le cas. Puri et coll. (1994) ont démontré que la profondeur d'enracinement des peupliers deltoïdes (*Populus deltoides*) est inversement proportionnelle à la densité de plantation. La profondeur d'enracinement la plus élevée était chez des sujets distancés de 6 mètres. Enfin, Drénou (2000) affirme que, dans le cas d'une plantation, le système racinaire des arbres se retrouvant à la limite de celle-ci est plus développé, surtout les racines poussant vers l'extérieur du périmètre de la plantation.

Dans le même ordre d'idée, un travail soutenu du sol affecte l'enracinement de l'arbre. Coker (1959, cité dans Gilman, 1990b) affirme que les arbres ont une extension racinaire latérale moins élevée en sol cultivé comparativement aux arbres établis en milieu non cultivé. Gray (2000) confirme les observations de Coker et ajoute que la croissance des racines de peupliers hybrides en cultures intercalaires est significativement réduite à une profondeur correspondant au travail du sol par la machinerie agricole.

Il est toutefois clair que, sur un site donné, l'architecture racinaire dépend avant tout de la réaction de l'espèce aux contraintes du sol qui modifient parfois radicalement sa morphologie spécifique (Curt et coll., 2001; Lebourgeois et Jabiol, 2002; Ludovici, 2004). Pour croître dans le sol, les racines ont deux possibilités : emprunter les pores et les fissures existants ou se frayer un chemin en écartant les agrégats (Drénou, 2006). La profondeur et la densité d'enracinement sont donc fortement affectées par des facteurs exogènes : les contraintes physiques (Curt et coll., 1998 et 2001; Charnet, 2003). Parmi celles-ci, les plus importantes sont la texture, la structure, la densité apparente et la pierrosité (Charnet, 2003). Curt et coll. (1998) ont établi que les conditions pédologiques favorables à l'enracinement, dans un horizon donné, sont une faible compacité, la présence d'éléments grossiers peu nombreux ou de petites dimensions et la présence de matière organique. À l'opposé, la densité racinaire diminue quand l'horizon est fortement compact (Crossley, 1940; Gilman et coll., 1987; Coutts, 1989) ou podzolisé (Charnet, 2003) ou engorgé d'eau

(Puhe, 2003) ou encore lorsque les éléments grossiers sont abondants (Curt et coll., 1998). Dans le cas d'un horizon engorgé d'eau, l'excès d'eau crée un déficit d'oxygène et le système racinaire se trouve en partie asphyxié. On y observe une nécrose des racines fines et grossières (Coutts, 1989; Charnet, 2003). La hauteur de la nappe phréatique et ses variations déterminent alors la profondeur maximale d'enracinement (Puhe, 2003; Charnet, 2003; Drénou, 2006).

Les grands types de matériaux composant les sols imposent des contraintes au développement racinaire. Selon certains auteurs, les sols à haute teneur en argile peuvent limiter considérablement la prospection verticale des racines (Thomas, 2000; Ludovici, 2004; Falkiner et coll., 2006). En effet, la diminution de la densité racinaire serait, entre autres, proportionnelle à l'augmentation en argile d'un horizon donné (Strong et La Roi, 1985; Sainju et Good, 1993; Sudmeyer et coll., 2004). À titre d'exemple, Sudmeyer et coll. (2004) ont observé pour le pin de Monterey un enracinement maximal à 53 cm de profondeur en sol argileux comparativement à 1,05 m en sol sableux. Toutefois, Drénou (2006) et Charnet (2003) nuancent ces propos et affirment qu'il faut se méfier de la généralisation fréquente selon laquelle l'argile équivaut à un plancher pour les racines. Ils citent, à cet égard, l'étude réalisée par Lebourgeois et Jabiol (2002) qui ont mis en évidence, sur des argiles de décarbonation, des enracinements très denses en profondeur, jusqu'à 1,5 m dans le cas du chêne sessile (*Quercus petraea*) et 1,1 m dans le cas du chêne pédonculé (*Quercus robur*). Les auteurs concluent que tout dépend de la structure de l'argile. Une argile profonde et compacte peut être bien structurée et colonisée par les racines. À l'opposé, sur des horizons argileux très compacts, d'origine sédimentaire, les racines sont généralement déviées et deviennent traçantes (Charnet, 2003).

L'enracinement sur sol sableux présente aussi des particularités. Ces types de sol, caractérisés par une porosité supérieure à l'argile, offrent peu de résistance à la pénétration des racines et facilitent ainsi l'élongation racinaire (Ludovici, 2004). Ceci expliquerait un enracinement dense avec des pivots profonds (Gilman, 1990a) et un enracinement maximal plus profond observé sur sol sableux, 1,3 m en sol sableux versus 1 m en sol argileux (Strong et La Roi, 1983a). Une étude réalisée par Sudemeyer et coll. (2004) illustre bien les propos de Gilman ainsi que ceux de Strong et La Roi. Les auteurs ont constaté des différences significatives dans le profil d'enracinement de quatre essences (le pin maritime,

le pin de Monterey, l'eucalyptus commun et l'eucalyptus de Kochi établies sur sol sableux et sableux/argileux (couche de sable d'épaisseur variable reposant sur de l'argile). Dans les sols sableux profonds, l'enracinement était uniforme le long du profil de 1,5 mètre. Sur les sols sableux/argileux, la densité racinaire était significativement plus importante dans les horizons sableux du profil. Les auteurs ont aussi noté que les racines d'un diamètre supérieur à 5 mm étaient généralement confinées aux couches sableuses du profil. Ce fait correspond aux affirmations de McMichael et Quisenberry (1993) et Ludovici (2004), selon lesquelles le diamètre moyen des racines en sol sableux serait supérieur à celui observé en sol argileux.

Toutefois, en présence de sols sableux podzolisés les profils d'enracinement changent comparativement à ceux examinés par Gilman (1990a) et Sudmeyer et coll. (2004). On y observe souvent des enracinements à deux étages, le premier dans l'horizon de surface, séparé de l'horizon d'accumulation, lui aussi bien colonisé par les racines, par un horizon éluvié de transition, où les racines sont rares (Charnet, 2003; Drénou, 2006). Aussi, suite aux processus de podzolisation dans certains sols sableux, apparaît dans le profil, des densités apparentes élevées, appelées fragipan ou ortstein. Cette couche cimentée fait obstacle aux racines et la rend souvent infranchissable (Fernandez et coll., 1995; Charnet, 2003).

Par ailleurs, les arbres disposés en haies brise-vent croissent souvent en milieu agricole où les conditions sont complètement différentes d'un milieu forestier (Drénou, 2006). En effet, les sols agricoles sont plus susceptibles de présenter des signes de compaction dus aux passages répétés de la machinerie. Selon Drénou (2006), un tassement du sol est une altération de la structure du sol qui entraîne une perte de porosité fortement défavorable aux racines.

2.2.4 Incidence de facteurs environnementaux

2.2.4.1 Le vent

Le vent est une force extérieure qui exerce sur l'arbre un stress mécanique (Coutts et coll., 1999; Danjon et coll., 2005). Avec l'âge, la prise de vent augmente et la partie des racines traçantes située dans la zone centrale fait l'objet de très fortes sollicitations mécaniques

(Drénou, 2006). Par conséquent, cette partie des racines a une croissance radiale plus forte que les autres racines et s'épaissit avec l'âge (Danjon et coll., 2005). De plus, chez de nombreuses essences, les arbres renforcent leur système racinaire selon leur position par rapport au vent dominant (Danjon et coll., 2005).

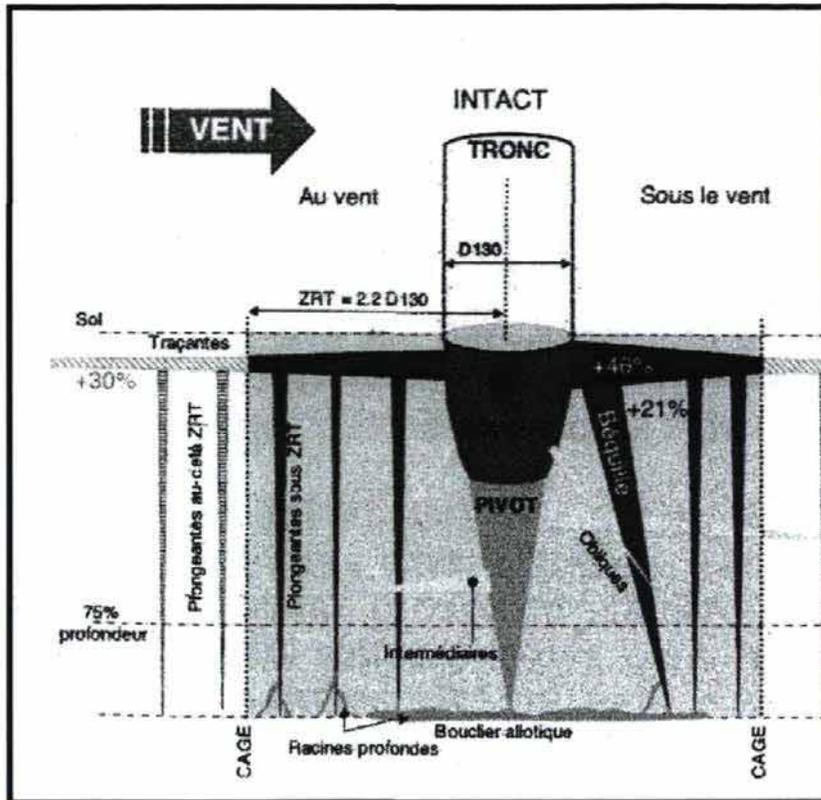


Figure 2. Adaptation du système racinaire selon l'orientation du vent. Adaptée de Danjon et coll. 2005.

Les racines placées du côté du vent dominant sont plus nombreuses et ramifiées tandis que les racines sous le vent sont épaisses et peu nombreuses (Coutts et coll., 1999; Tamasi et coll., 2005). Dès lors, on a déduit que le système racinaire de l'arbre s'adapte fortement et sélectivement aux stress mécaniques (Danjon et coll., 2005).

2.2.4.2 Contraintes hydriques

Le manque d'eau autant que les excès d'eau entraînent des modifications sur la morphologie racinaire de l'arbre (Drénou, 2006). En condition de sécheresse temporaire, l'arbre intensifie la croissance des racines fines dans les zones encore humides du sol et augmente la contribution du système racinaire profond à l'absorption de l'eau (Drénou,

2006). Dans les régions à sécheresses saisonnières, la morphologie de l'arbre se transforme et se caractérise par un rapport entre biomasse racinaire et biomasse aérienne très élevé (Drénou, 2006).

Un excès d'eau dans le sol, lié à la présence d'une nappe temporaire ou permanente ou encore par la présence d'un horizon imperméable, se manifeste par la saturation des pores. Dès lors, la présence de l'oxygène devient insuffisante afin de maintenir une croissance des racines, le système racinaire se trouve en partie asphyxié. Par conséquent, l'extrémité des racines est détruite et le développement racinaire cesse (Coutts, 1989). Cependant, toutes les essences ne présentent pas la même sensibilité à l'engorgement en eau de leur système racinaire (Lévy et Lefèvre, 2001 cités dans Drénou, 2006). Le saule vannier (*Salix viminalis*), contrairement à l'épinette (Puhe, 2003) montre une extrême tolérance aux sols engorgés et déficients en oxygène. Cette capacité à croître dans ces conditions s'expliquerait, entre autres, par l'ajout de racines riches en tissus aerenchymes (Jackson et Attwood, 1996).

2.3 Méthodes d'étude des racines

Il existe peu d'opportunités naturelles d'observer les racines au cours de la vie d'un arbre. On les voit au moment de la plantation et parfois à la suite d'un chablis. Dans certaines situations, l'érosion fait apparaître une partie du système racinaire. Les scientifiques ont donc mis au point des techniques d'étude des racines avec la possibilité de les combiner entre elles (Drénou, 2006).

2.3.1 Méthodes indirectes

Ces méthodes utilisent des radars (Hruska et coll., 199; Drénou, 2006) ou des traceurs qui peuvent être radioactifs ou non (Böhm, 1979; Lucot, 1994; Drénou, 2006). Dans le cas du radar, il s'agit de sonder le sol pour localiser les racines. Les ondes émises par l'appareil sont réfléchies vers ce dernier lorsqu'elles rencontrent un obstacle ou une différence de structure. Pour ce qui est des traceurs, cette méthode fait appel à une solution d'éléments qui est injectée dans l'arbre. Cette méthode permet d'estimer l'extension latérale des racines et l'étude de la diffusion des éléments minéraux au sein d'un arbre.

Ces méthodes ont l'avantage d'être non destructives, mais demeurent délicates à mettre en œuvre, coûteuses et longues (Lucot, 1994; Drénou, 2006). De plus, elles ne donnent pas accès à la répartition des racines en profondeur. D'autres méthodes sont disponibles afin d'étudier *in situ* l'enracinement et la distribution spatiale des systèmes racinaires.

2.3.2 Méthodes directes

De nombreuses méthodes directes pour l'étude des racines ont été mises au point et adaptées à la mesure d'un ou plusieurs paramètres :

- Méthode de la tarière (Mackie-Dawson et Atkinson, 1991; Baize et Jabiol, 1995; Gray, 2000) : elle consiste à prélever un volume de sol à différente profondeur et à des distances variables de l'arbre à l'aide d'une tarière. Le sol et les racines sont ensuite séparés afin de déterminer le poids, le nombre et le diamètre des racines. Cette méthode cause peu de dégâts à l'arbre et la seule présence de racines est signe que l'horizon est prospecté. En revanche, cette méthode est inutilisable en sol superficiel caillouteux et pour les grosses racines.
- Méthode de l'excavation (Weaver, 1926 cité dans Böhm, 1979; Lucot, 1994) : il s'agit de dégager le système racinaire par projection d'eau ou d'air en le laissant en place et en totalité. Cette méthode permet l'observation du système racinaire en entier. Cependant, elle s'avère très coûteuse en temps et en moyens matériels. De plus, elle nécessite, préalablement, l'abattage de l'arbre.
- Méthode du monolithe (Mackie-Dawson et Atkinson, 1991) : un volume de sol est découpé autour de l'arbre pour être ensuite lavé à l'eau afin de séparer les racines du sol. On détermine ainsi le poids, le nombre et la distribution des racines. Elle s'avère toutefois difficile à appliquer en présence de caillou et en présence de sol friable.
- Méthode du profil (Böhm, 1979) : elle consiste à étudier les racines sur les parois lisses de tranchées ouvertes à l'endroit où on veut observer les racines. Elle est valable pour tous les types de sol et ne nécessite pas de matériel important lors de sa mise en place. Elle permet de déterminer plusieurs paramètres racinaires : nombre,

distribution, diamètre et profondeur. En revanche, elle ne permet pas l'observation des racines verticales, en particulier les pivots.

Pour la méthode du profil, il existe de nombreuses variantes à cette méthode :

1. Huguet (1973, cité dans Fernandez et coll., 1991) a mis au point une méthode d'étude de l'enracinement qui consiste à ouvrir une tranchée spirale à partir de la base du tronc. Cette méthode permet de décrire les variations des paramètres racinaires en fonction de la profondeur et la distance au tronc. Elle demeure toutefois peu utilisée puisqu'elle est délicate à mettre en place (Lucot, 1994).
2. Curt et coll. (1998) réalisent une fosse pédologique ouverte en arc de cercle sur deux mètres de largeur. Ils observent, dans un deuxième temps, le système racinaire sur toute la profondeur du profil, entre 35 et 135 cm. Les racines sont dénombrées par tranche de 10 cm d'épaisseur en partant de la surface et par classes de diamètre.
3. Falkiner et coll. (2006) utilisent deux fosses installées de manière à ce que l'une d'elles soit placée parallèle à une rangée d'arbres et l'autre perpendiculaire à cette dernière. L'inconvénient de cette méthode est qu'elle nécessite un espacement suffisant sur le rang entre les arbres afin de réaliser mécaniquement l'ouverture de la tranchée.
4. Sudmeyer et coll. (2004) utilisent une tranchée suffisamment large de manière à observer le profil d'enracinement et de réaliser le dénombrement des racines sur une surface d'un mètre et demi. Ils réalisent des tranchées à différentes distances de la rangée d'arbres afin de quantifier l'extension horizontale des systèmes racinaires.

En résumé, parmi les méthodes décrites, la méthode du profil (Sudmeyer et coll., 2004) est relativement facile à mettre en place et permet la mesure de plusieurs paramètres racinaires : diamètre, distribution et profondeur. Elle s'applique à tous les types de sol et de contraintes et en particulier aux obstacles physiques.

Ainsi, à la lumière de la littérature, il apparaît que les propriétés physiques du sol, dont la texture, peut influencer le développement racinaire d'une espèce d'arbre. De plus, des différences d'enracinement entre les espèces d'arbres est possible et tout à fait

envisageable. En Amérique du Nord, à notre connaissance, aucune étude élaborée n'a portée sur le développement racinaire de plusieurs espèces d'arbres plantées en haies brise-vent et ce, en prenant en considération l'influence du type de sol. Cela nous amène à notre projet de recherche et aux hypothèses et objectifs suivants.

3. Hypothèses et objectifs

3.1 Hypothèses de recherche

1. L'enracinement en sol léger des espèces *Picea sp.* ; *Populus sp.* et *Salix sp.* est plus dense et plus profond que l'enracinement de ces espèces en sol lourd.
2. Les densités et les distributions racinaires sont différentes entre les espèces, peu importe la texture du sol.
3. Les systèmes racinaires de toutes les espèces à l'étude sont peu étendus à l'intérieur des champs.

3.2 Objectifs de recherche

L'objectif général cette étude est d'observer la distribution verticale et horizontale du système racinaire de plusieurs espèces d'arbres implantés en sols légers et en sols lourds. Les objectifs spécifiques sont les suivants :

1. Comparer la distribution verticale des espèces d'arbres *Picea abies* et *Picea glauca*; *Populus sp.* et *Salix viminalis* et *Salix bebbiana*. en sols légers et en sols lourds;
2. Observer et quantifier l'enracinement de ces espèces dans un rayon restreint;
3. Vérifier l'étendue horizontale des systèmes racinaires de ces trois essences dans des aménagements matures de haies brise-vent.

4. Matériels et méthodes

4.1 Les sites

L'étude a été réalisée dans les municipalités régionales de comté (MRC) de Kamouraska et de l'Islet, dans le giron de la ville de La Pocatière, au Québec, au sein des régions administratives du Bas St-Laurent et Chaudière-Appalaches. Ces dernières s'étendent en bordure de la rive sud du fleuve St-Laurent en aval de la ville de Québec. On peut identifier au sein des deux MRC deux divisions physiographiques principales : les basses terres du St-Laurent et les hautes terres des Appalaches (Baril et Rochefort, 1965; Baril et Rochefort, 1979). La première, d'une altitude variant de 3 à 170 mètres, présente des sols à texture fine et à drainage imparfait. On y retrouve aussi une zone de transition entre les basses terres et les hautes terres où les sols sont graveleux et sableux. Après cette zone de transition, on retrouve la deuxième division physiographique d'une élévation moyenne de 300 mètres où les sols dérivés de tills dominant. Selon le système de classification de Thornthwaite (1948 cité dans Baril et Rochefort, 1965), le climat de la région est du type humide et à faible déficit en eau durant l'été. La région est le domaine de l'érablière à tilleul (Saucier et coll., 2003). Afin de répondre à l'objectif général, nous avons relevé neuf sites sur texture sableuse (sols légers), situés dans la zone de transition des basses terres, et neuf autres sites, localisés dans les basses terres, sur des textures à prédominance argileuse (sols lourds). Certaines caractéristiques des haies brise-vent (localisation, espèces, nombre d'années, etc.) sont présentées dans le tableau 2 alors que les caractéristiques pédologiques et la granulométrie des sites sont présentées au tableau 3.

4.2 Les haies

Les haies étaient majoritairement monospécifiques afin de faciliter l'identification des racines (Tableau 2). Seules les haies de *Salix bebbiana* et de *Salix viminalis* étaient multispécifiques. Ces dernières présentaient une alternance entre saules et arbustes. Les haies de chacune des espèces d'arbres présentaient, dans la mesure du possible, un âge et une hauteur similaire. Il s'avère qu'il a été impossible de trouver des espèces identiques implantées en haies brise-vent pour l'ensemble des sites. Nous avons étudié les genres et

les espèces suivantes : épinette blanche (*Picea glauca*) et épinette de Norvège (*Picea abies*); peuplier hybride (*Populus deltoides* X *Populus nigra*) appelé clone fédéral de type euraméricain (André Vézina, com. pers., 2011) et saule de Bebb (*Salix bebbiana*) et saule vannier (*Salix viminalis*). Par ailleurs, soulignons que le choix des arbres étudiés à l'intérieur des haies s'effectuait selon l'allure générale de l'arbre (absence de signes de maladies) et de sa représentativité de l'ensemble de la haie (hauteur et diamètre similaire).

4.3 Caractéristiques pédologiques et granulométrie des sites

Les principales caractéristiques pédologiques ainsi que les profils pédologiques présentés au tableau 3 sont tirées des études pédologiques des comtés de Kamouraska (Baril et Rochefort, 1965) et de l'Islet (Baril et Rochefort, 1979). Aussi, huit prélèvements de sol par site dans le but de constituer quatre échantillons par site a aussi été réalisé. Ces prélèvements à tous les 25 cm, et ce, jusqu'à un mètre de profondeur, ont été pris à l'aide d'une tarière hollandaise. Ces échantillons de sol ont permis de réaliser une granulométrie en laboratoire (méthode de l'hydromètre) afin de déterminer la texture spécifique des sites étudiés (Figures 3, 4 et 5 et Tableau 3). L'échantillon de surface (0-25 cm) a aussi été envoyé dans un laboratoire accrédité dans le but d'obtenir des analyses physico-chimiques, ces résultats sont présentés en annexe 4.

Tableau 2. Informations sur les principales caractéristiques des haies brise-vent étudiées

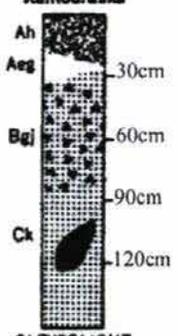
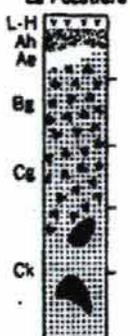
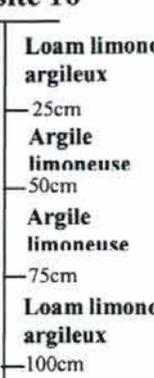
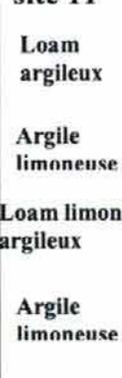
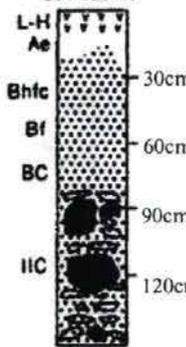
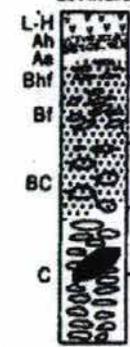
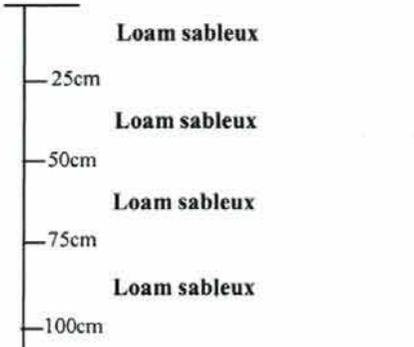
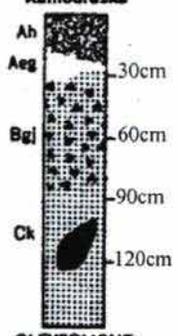
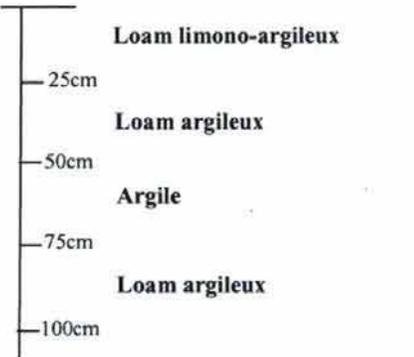
	Localisation géographique	Genre et espèces d'arbres	Âge (années)	Hauteur moyenne (m)	Espacement moyen entre les arbres sur la haie (m)	Orientation ⁴	Cultivé (C) ou Prairie (P) en 2008
Site							
1	comté de Kamouraska	P. abies	42	15,5	2,20	N-S	C
2	comté de Kamouraska	P. abies	42	15,8	2,20	N-S	C
3	comté de Kamouraska	P. abies et glauca	28	9,5	1,65	N-S	P
4	comté de l'Islet	P. glauca	18	5,7	1,61	N-S	P
5	comté de Kamouraska	P. abies	15	7,7	1,90	N-S	C
6	comté de Kamouraska	P. abies	55	16,7	2,00	E-O	P
7	comté de Kamouraska	Populus. Sp	28	26,0	2,48	N-S	C
8	comté de Kamouraska	Populus. Sp	28	21,7	3,15	N-S	P
9	comté de Kamouraska	Populus. Sp	28	21,0	3,02	N-S	P
10	comté de Kamouraska	Populus. Sp	28	19,0	1,73	N-S	C
11	comté de Kamouraska	Populus. Sp	28	16,0	3,13	N-S	C
12	comté de Kamouraska	Populus. Sp	28	15,0	2,43	N-S	C
13	comté de l'Islet	S. viminalis	6	4,9	4,00	N-S	C
14	comté de l'Islet	S. bebbiana	12	7,5	aléatoire	N-S	C
15	comté de l'Islet	S. bebbiana	12	7,0	aléatoire	N-S	C
16	comté de Kamouraska	S. viminalis	14	6,3	4,00	N-S	P
17	comté de Kamouraska	S. viminalis	26	6,6	4,00	N-S	C
18	comté de Kamouraska	S. viminalis	6	4,1	4,00	N-S	P

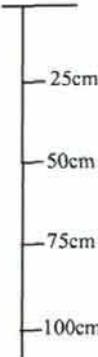
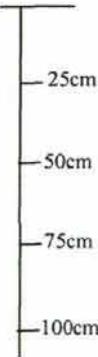
⁴ N réfère à Nord, S à Sud, O à Ouest et E à Est

Tableau 3. Informations sur les principales caractéristiques pédologiques des sites étudiés.

Site	Principales caractéristiques pédologiques	Profil pédologique	Granulométrie	
			site 1	site 2
1 et 2	<ol style="list-style-type: none"> Podzol Série St-Pacôme de type sable loameux Drainage bon à excessif Horizon Bhf souvent cimenté par endroits en un orstein à environ 25cm Sol pauvre 	<p>St-Pacôme</p>	<p>site 1</p> <ul style="list-style-type: none"> 0-25cm: Loam sableux 25-50cm: Sable loameux 50-75cm: Sable loameux 75-100cm: Sable loameux 	<p>site 2</p> <ul style="list-style-type: none"> 0-25cm: Loam sableux 25-50cm: Sable 50-75cm: Loam sableux 75-100cm: Sable loameux
3	<ol style="list-style-type: none"> 60 % Affleurement rocheux, série Affleurement rocheux et 40 % Sable loameux, série St-Pacôme Voir caractéristiques du site 1 et 2 	<p>St-Pacôme</p>	<ul style="list-style-type: none"> 0-25cm: Loam sablo argileux 25-50cm: Loam sableux 50-75cm: Loam sablo argileux 75-100cm: Loam argileux 	
4	<ol style="list-style-type: none"> 40 % Argile, série La Pocatière, 30 % sable loameux, série Saint-Pacôme et 20 % sable loameux à loam argileux Présence de variations texturales, dues à des lits ou lentilles de limon et de sable Structure polyédrique de modérément à bien développée Drainage imparfait à modérément bon 	<p>St-Pacôme</p> <p>La Pocatière'</p>	<ul style="list-style-type: none"> 0-25cm: Loam limono-argileux 25-50cm: Loam limono-argileux 50-75cm: Loam 75-100cm: Loam 	

<p>5</p>	<ol style="list-style-type: none"> 60 % Argile, série Kamouraska et 40 % Argile, série La Pocatière Structure polyédrique modérément développée Drainage imparfait à mauvais Ces séries renferment parfois des lits ou lentilles de sable à l'intérieur du profil Bonne fertilité 				
<p>6</p>	<ol style="list-style-type: none"> 100 % Loam argileux, série De l'Anse Drainage mauvais pH de 3.9 entre 50 et 91 cm (horizon Aeg2) Riche en matière organique dans les 15 premiers cm 				
<p>7,8 et 9</p>	<ol style="list-style-type: none"> 60 % Loam sablo-graveleux, série St-André et 40 % Loam sablo-schisteux, série St-André Très bon drainage Fertilité faible à moyen Excessivement pierreux 		<p>site 7</p>	<p>site 8</p>	<p>site 9</p>

10,11 et 12	<ol style="list-style-type: none"> 60 % Argile, série Kamouraska et 40 % Argile, série La Pocatière Idem que site 5 	<p>Kamouraska</p>  <p>GLEYSOLIQUE G. F. ORTHIQUE</p>	<p>La Pocatière</p>  <p>GLEYSOLIQUE G. F. DÉGRADÉ</p>	<p>site 10</p> 	<p>site 11</p> 	<p>site 12</p> 
13,14 et 15	<ol style="list-style-type: none"> 60 % Sable loameux, série St-Pacôme et 40 % Loam sablo-schisteux, série St-André Drainage bon à excessif Excessivement pierreuse Fertilité pauvre à moyen 	<p>St-Pacôme</p>  <p>PODZOL À ORTSTEIN</p>	<p>St-André</p>  <p>PODZOL ORTHIQUE</p>			
16	<ol style="list-style-type: none"> 100 % Argile, série Kamouraska Structure polyédrique assez bien développée entre 25 et 75 cm Renferme parfois des lits de sable à l'intérieur du profil Drainage imparfait Bonne fertilité 	<p>Kamouraska</p>  <p>GLEYSOLIQUE G. F. ORTHIQUE</p>				

<p>17</p>	<p>1. 60 % Argile, série Kamouraska et 40 % Argile, série La Pocatière 2. Idem que site 5</p>	<p>Kamouraska Ah Aeg 30cm Bgl 60cm Ck 90cm 120cm GLEYSOLIQUE G. F. ORTHIQUE</p>	<p>La Pocatière L-H Ah Ae Bg Cg Ck GLEYSOLIQUE G. F. DÉGRADÉ</p>	 <p>Argile limoneuse 25cm Argile lourde 50cm Argile lourde 75cm Argile lourde 100cm</p>
<p>18</p>	<p>1. 100 % Loam argileux, série De l'Anse 2. Idem que site 6</p>	<p>De l'Anse L-F 30cm Bmg (Aeg2) 60cm 90cm 120cm Cgw GLEYSOL TOURBEUX</p>	 <p>Argile limoneuse 25cm Argile limoneuse 50cm Argile limoneuse 75cm Argile limoneuse 100cm</p>	

Légende des profils pédologiques :

- | | | | |
|--|---|--|--|
| | Structure polyédrique, avec ou sans accumulation d'argile. | | Matières organiques peu minéralisées (mor, moder). Horizons L, F et H. |
| | Roc appalachien: grès, quartzite, phyllades etc. | | Matières organiques minéralisées (mull), Horizon Ah. |
| | Horizon fluvial (2): perte de sesquioxides de fer et d'alumine, d'argile silicatée, et/ou de matières organiques. | | Texture (1) grossière: gravier, galets. |
| | Pierres anguleuses et blocs erratiques. | | Texture modérément grossière: sable, loam sableux. |
| | Texture fine à très fine: loam argileux à argile. | | Texture moyenne: loam à loam argileux. |

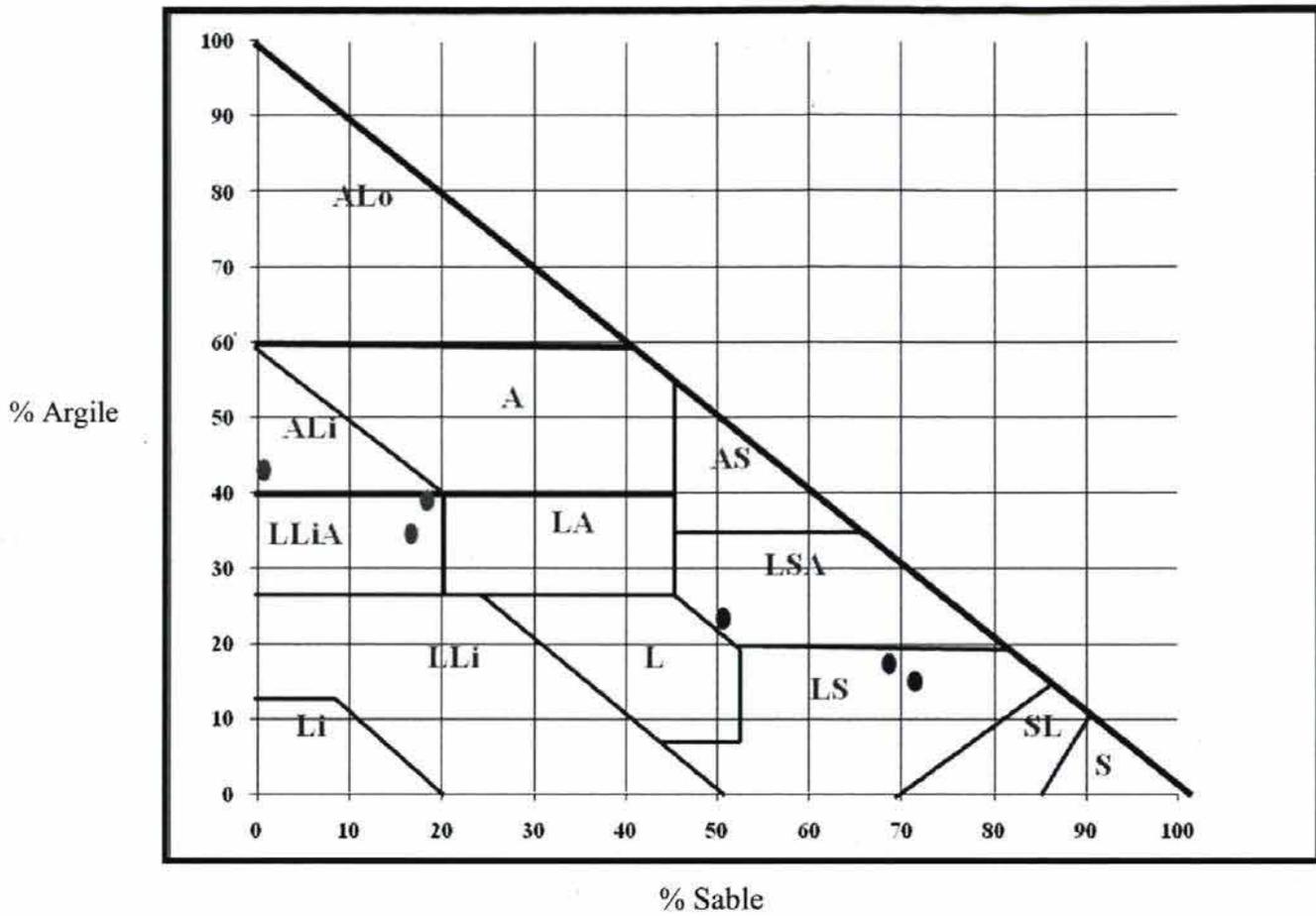


Figure 3. Granulométrie de l'horizon de surface des sites des haies d'épinette.

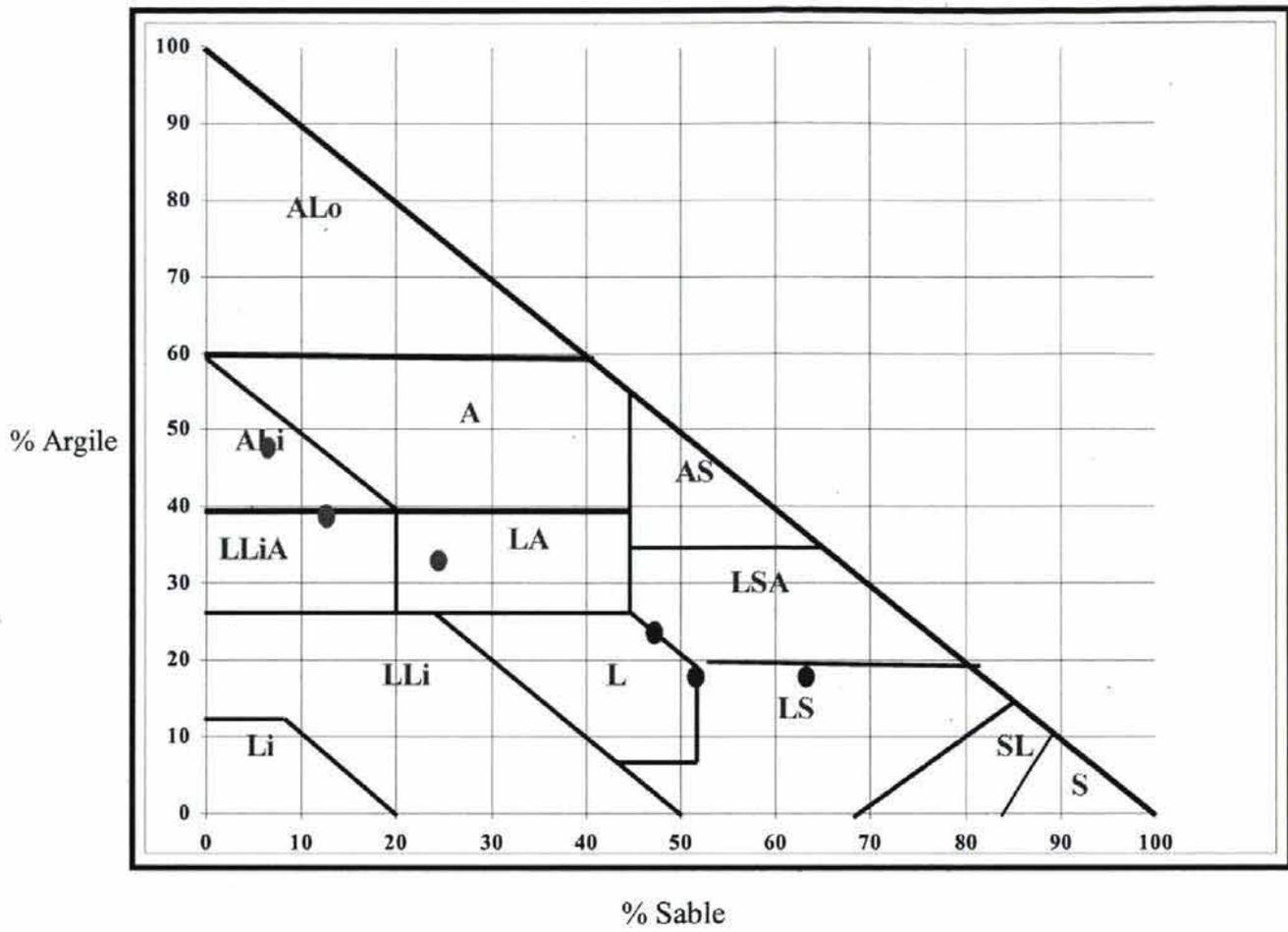


Figure 4. Granulométrie de l'horizon de surface des sites des haies de peuplier hybride.

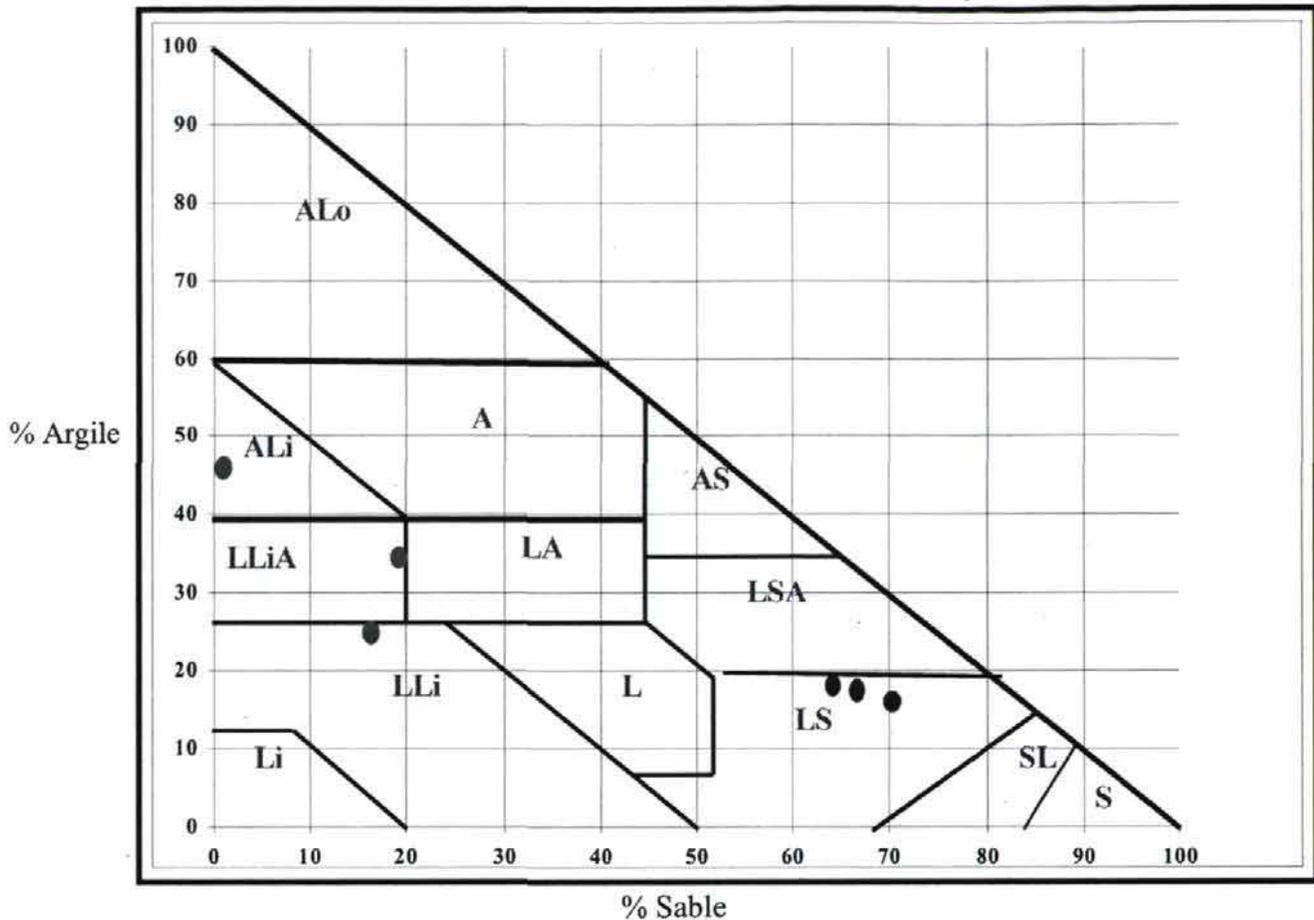


Figure 5. Granulométrie de l'horizon de surface des sites des haies de saule.

4.4 Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental était constitué d'un plan entièrement aléatoire de type factoriel avec deux facteurs à l'étude; le type de sol (2) et les espèces (3) composant les haies brise-vent. Ce dispositif comprenait trois répétitions, pour un total de 18 unités expérimentales. Pour chaque haie, trois transects ont été considérés.

4.5 Méthode d'observation des racines

L'évaluation de la distribution verticale et horizontale des racines d'arbres a été réalisée à l'aide de la méthode du profil (Sudmeyer et coll., 2004). Cette méthode consiste à étudier

les racines sur les parois lisses de tranchées ouvertes à l'endroit où on veut observer les racines. Les tranchées étaient rectilignes d'une largeur d'environ 2 mètres par 1,2 mètre de profondeur. Trois transects distancés d'un minimum de 10 mètres ont été tracés perpendiculaires à la ligne d'arbres sur chaque site. Les tranchées de chaque transect ont été creusées dans le champ adjacent du côté de la rangée d'arbres qui ne présentait aucune contrainte (fossé, bâtiments, enclos, etc.), tantôt sous le vent dominant, tantôt au vent. Les premières tranchées ont été creusées parallèlement aux haies brise-vent à une distance de deux mètres de l'arbre. Cette distance correspond généralement à l'endroit où les racines principales (ancrage) se subdivisent en racines pivotantes secondaires ou obliques, en racines moyennes et en racines fines (Curt et coll., 2001; Drénou, 2006). Par la suite, des tranchées ont été creusées le long de chaque transect à des distances de six et si nécessaire neuf mètres. À cet égard, si aucune racine n'était observée à six mètres, il n'y avait alors aucun décompte à neuf mètres. La figure suivante illustre le dispositif expérimental de l'étude pour un site.

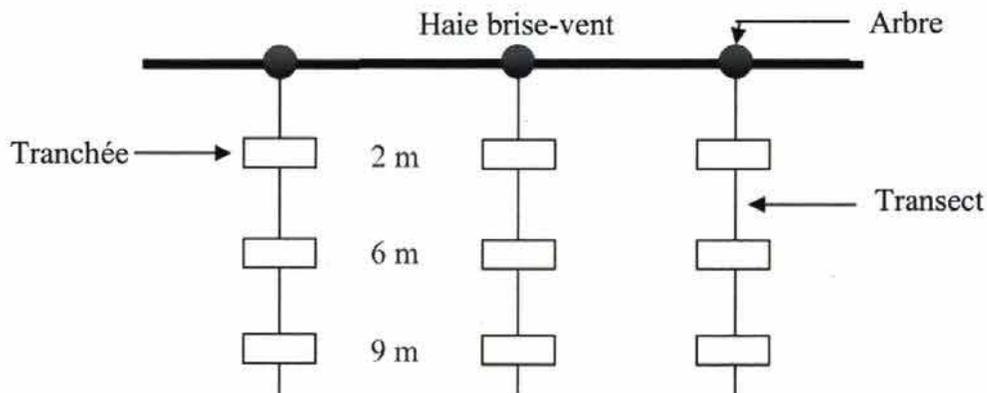


Figure 6: Schéma du dispositif expérimental d'un site pour l'étude proposée.

4.6 Prise de données

Les sites ont été visités au cours des mois de mai, juin, août, septembre et octobre 2008 afin d'effectuer les mesures nécessaires. Les tranchées ont été creusées à l'aide d'une pelle mécanique. Les parois ont été par la suite parfois légèrement lissées à l'aide d'une pelle ou d'une truelle afin de faciliter l'observation des racines. Le comptage des racines a été fait immédiatement après leur exposition. Afin de faciliter cette procédure, nous avons disposé

un cadre de 1 m x 1 m sur la paroi. L'intérieur de ce cadre était subdivisé en carrés de 10 cm x 10 cm. Cela a permis de déterminer la densité racinaire (nombre de racines/dm²) selon chaque strate de profondeur; 0-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm, 30-40 cm, 40-50 cm, 50-60 cm, 60-70 cm, 70-80 cm, 80-90 cm et 90-100 cm. L'aspect lignifié de la racine permettait de discriminer une racine ligneuse provenant des arbres d'une racine fine. Les racines fines des arbres n'ont pas été discriminées de celles pouvant appartenir à une mauvaise herbe ou encore aux plantes fourragères, compte tenu du niveau de difficulté à les distinguer. La distribution verticale a été obtenue en observant la profondeur d'enracinement.

Au même moment, nous avons déterminé le diamètre des racines présentes dans chaque carré. Les diamètres ont été regroupés dans quatre classes; classe 1 : racines $\leq 1,0$ mm (racines fines); classe 2 : racines de 1,1 à 5,0 mm (petites racines); classe 3 : racines de 5,1 à 10 mm (racines moyennes) et classe 4 : racines de ≥ 10 mm (racines grossières). La connaissance du diamètre des racines est importante puisqu'elle peut nous renseigner sur la relation entre les pores du sol et le potentiel de pénétration des racines (Wiersum, 1957; cité dans Böhm, 1979).

Ainsi, les variables présentées ultérieurement portent sur la densité racinaire à deux mètres pour chaque strate de profondeur sans égard au diamètre. Les densités racinaires sont aussi présentées pour chacune des classes de diamètre; classe 1 (racines fines), classe 2 (racines petites), classe 3 (racines moyennes) et classe 4 (racines grossières). Le nombre de racines de tous les diamètres (les quatre classes) pour chacune des strates a aussi été transformé en fréquence (%) par rapport au nombre total de racines observé dans l'ensemble du profil (100 cm x 100 cm). Pour la classe 1, nous avons ajouté la proportion que représentent ces racines par rapport à l'ensemble des racines observées à chaque strate de profondeur. Finalement, des mesures sur la hauteur des arbres, leurs espacements dans la haie, l'orientation des haies a également été recueillie.

4.7 Analyses statistiques

Compte tenu qu'il n'y a pas eu de racines observées à six et neuf mètres sur une majorité de sites, l'analyse statistique des résultats n'a pas pu être réalisée à ces distances comme nous l'avions planifié. Par conséquent seules les données à 2 m ont été analysées par l'analyse de

la variance (ANOVA). Les données recueillies à deux mètres ont été analysées avec la procédure Mixed de SAS. Les espèces et les types de sol ont été considérés en facteurs fixes et les répétitions en facteur aléatoire. Les strates de profondeur ont été analysés en données répétées (énoncé REPEATED). La normalité des données a été vérifiée avec la procédure UNIVARIATE et l'homogénéité des variances a été vérifiée par une analyse des résidus. Les données brutes ont été transformées (en racine ou log) lorsque nécessaire pour respecter les postulats de l'analyse de variance. Les moyennes détransformées ont été rapportées par la suite. Le seuil de signification était fixé à $P \leq 0,05$. Un test de comparaison multiple a été utilisé (LSMEANS /option DIFF) au besoin pour effectuer des comparaisons de moyennes 2 à 2.

5. Résultats et Discussion

5.1 Densité racinaire de l'ensemble des classes de racines à deux mètres des haies

Lorsqu'on considère l'ensemble des classes racinaires (total des classes de 1 à 4), on constate que l'espèce et le sol n'influencent pas la densité racinaire (Tableau 4). Autrement dit, ni le peuplier, l'épinette ou le saule démontrent une différence d'enracinement, et ce, dans un sol léger ou lourd. Toutefois, il y a un effet très marqué de la profondeur d'échantillonnage sur les densités racinaires ainsi qu'une tendance d'interaction ($p=0,1043$) entre les types de sol et la profondeur d'échantillonnage.

Tableau 4. Analyses statistiques de la densité racinaire de l'ensemble des classes des racines et des classes 1, 2, 3 et 4 à deux mètres des haies brise-vent.

Facteur à l'étude	Valeur de P				
	Classe ensemble	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4
Espèce	0,243	0,328	0,017	0,001	0,010
Sol	0,449	0,603	0,139	0,312	0,481
Espèce*Sol	0,846	0,843	0,978	0,520	0,603
Profondeur	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001

Espèce*Profondeur	0,662	0,452	0,404	0,008	0,295
Sol*Profondeur	0,104	0,252	0,153	0,442	0,411
Espèce*Sol*Profondeur	0,593	0,895	0,321	0,417	0,047

Différence significative lorsque $P \leq 0,05$.

5.1.1. Effet de la profondeur d'échantillonnage

Les plus hautes densités racinaires ont été observées dans les couches superficielles du sol, soit dans les 30 premiers cm (Figure 7 et Tableau 5). En termes de proportion, 63 et 71 % des racines du profil d'observation se retrouvent dans la couche 0 à 30 cm pour le sol léger et le sol lourd respectivement (Tableau 5). Au-delà de cette profondeur, la diminution de la densité racinaire est constante et graduelle. Dans le cas des sols légers, après une diminution constante, la densité racinaire se stabilise dans la strate 50 à 80 cm. Pour ce qui est des sols lourds, la diminution de la densité racinaire est constante. Ainsi, les plus hautes densités racinaires sont atteintes dans la couche superficielle.

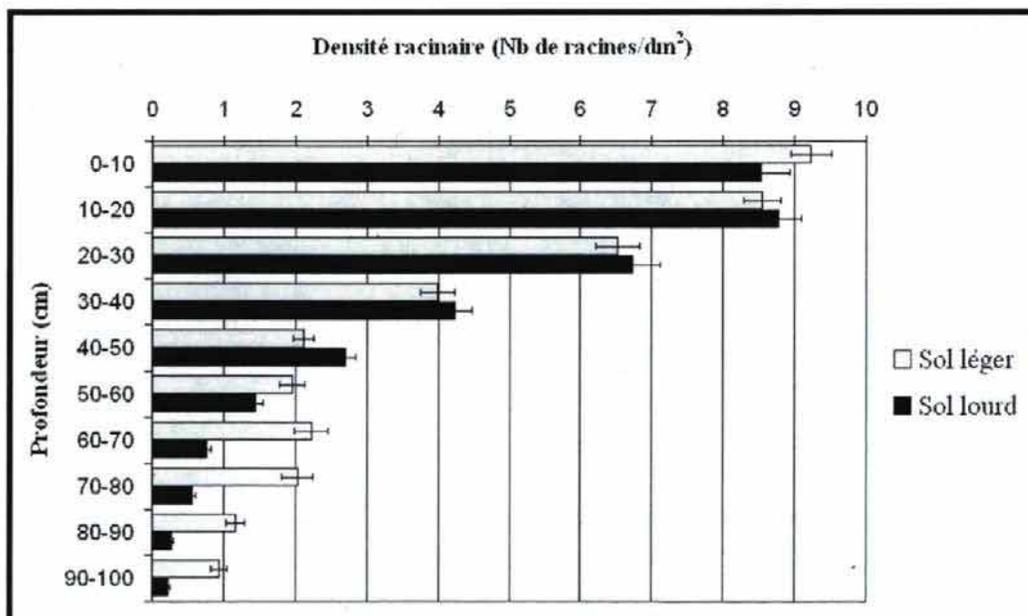


Figure 7. Densité racinaire de l'ensemble des classes de racines selon la profondeur d'échantillonnage en sol léger et lourd à deux mètres des haies brise-vent. Les intervalles sur les bâtonnets indiquent l'erreur-type.

Ces résultats sont similaires à de nombreuses études réalisées en milieux tempérés (Sainju et Good, 1993; Gray, 2000; Schmid et Kazda, 2002; Bakker et coll., 2008; McIvor et coll., 2008; Douglas et coll., 2010) ou en milieux tropicaux (Puri et coll., 1994; Sudmeyer et coll., 2004). Pour ces auteurs, les densités racinaires plus élevées en surface s'expliqueraient par divers facteurs, dont, une teneur plus élevée en matière organique, une meilleure aération, une plus faible densité apparente et une facilité d'accès aux ressources hydriques. De plus, la combinaison de ces facteurs ferait en sorte de stimuler la décomposition de la matière organique et de procurer une plus grande concentration d'éléments nutritifs facilement accessible aux racines (Strong et La Roi, 1985). D'après nos résultats, la densité des racines des arbres dans la zone superficielle du sol démontre que celle-ci offre probablement des conditions de croissance plus avantageuses en comparaison aux couches plus profondes. De plus, la présence de sols agricoles cultivés près des haies brise-vent pourrait induire une augmentation de la fertilité de la couche superficielle en conséquence de la fertilisation et des amendements.

Tableau 5. Fréquence relative de l'ensemble des classes racinaires selon la profondeur d'échantillonnage en sol léger et en sol lourd à deux mètres des haies brise-vent.

Profondeur (cm)	Fréquence relative (%)	
	Sol léger	Sol lourd
0-10	23,8	24,9
10-20	21,9	25,7
20-30	16,8	19,6
30-40	10,3	12,3
40-50	5,4	7,9
50-60	5,2	4,1
60-70	5,7	2,3
70-80	5,2	1,8
80-90	3,1	0,9
90-100	2,3	0,6
Total	100	100

Il a également été démontré que le système racinaire profond se concentre autour de l'arbre afin d'offrir à ce dernier l'ancrage nécessaire et un support (Lyford, 1980; Raimbault, 1991; Drexhage et Gruber, 1998 Drénou, 2006). Au sujet de nos résultats en ce qui a trait de la profondeur d'enracinement maximale observée sur les sites, ceux-ci reflètent en partie ceux obtenus dans la littérature scientifique. Les observations réalisées par Raimbault (1991) sur

plus de 60 espèces d'arbres lui permettent de conclure que les racines profondes et verticales se retrouvent à une courte distance du collet, un à deux mètres maximum de rayon de la souche. Dans ce compartiment central, les racines atteignent couramment un mètre de profondeur (Strong et La Roi, 1983b; Gilman, 1990a; Lucot, 1994). Sudmeyer et coll. (2004) ont démontré, dans une étude similaire, que la profondeur d'enracinement la plus élevée est près de l'arbre. Ainsi, l'observation de racines à un mètre de profondeur s'expliquerait en partie par le positionnement de notre paroi d'observation. Elle était localisée à deux mètres du collet de l'arbre, un endroit où le système racinaire est naturellement profond afin de maintenir l'arbre. Bien que le positionnement de notre tranchée par rapport à l'arbre explique en partie nos résultats, la profondeur de ce système sera toutefois influencée par divers aspects, entre autres l'âge de l'arbre (Puhe, 2003), l'espèce (Silva et Rego, 2003; Drénou, 2006) et les propriétés physiques du sol (Gilman, 1990a). Aussi, Puhe (2003) a démontré que l'épinette de Norvège développe progressivement son système racinaire profond et quadruple la proportion de racines situées à un mètre de profondeur entre 10 et 28 ans afin de mieux supporter l'arbre et de répondre à ses besoins hydriques. Cette augmentation de la profondeur d'enracinement avec l'âge n'a toutefois pas été observée dans une étude réalisée par Bakker et coll. en 2008 en France pour le hêtre commun. Les résultats obtenus par Bakker et coll. (2008) montrent que la capacité d'enracinement de cette espèce en profondeur est davantage liée aux conditions du sol, plus particulièrement la fertilité, l'aération et la porosité.

5.1.2. Effet du type de sol en fonction de la profondeur d'échantillonnage

Nos résultats montrent que le type de sol a un effet non significatif sur l'enracinement des arbres dans les premiers 50 cm. Toutefois, une plus grande densité racinaire (tendance à $p=0,1043$) a été observée en sol léger en comparaison au sol lourd dans les 50 derniers cm (Figure 7). Signalons qu'il n'y avait pas de couches indurées dans les sols lourds. La densité racinaire plus élevée dans les couches inférieures (>50 cm de profondeur) pour les sols légers pourrait s'expliquer de plusieurs façons. Le régime hydrique des sols légers et lourds est très contrasté. En sol léger, où la texture est grossière à modérément grossière, la macroporosité est importante et permet le drainage des eaux excédentaires et l'aération du sol (Baril et Rochefort, 1965). Dans le cas des sols lourds, la microporosité y est importante

et l'infiltration verticale est ralentie. Or, une mauvaise perméabilité peut entraîner des engorgements temporaires et des asphyxies (Baize et Jabiol, 1995). Cette diminution de la teneur en oxygène peut aussi être causée par des remontées temporaires de la nappe phréatique (cas de la série de l'Anse, Tableau 3) ou des inondations. L'aération du sol est primordiale afin de procurer aux racines l'oxygène dont elles ont besoin afin de se développer et de réaliser leurs fonctions (Gilman et coll., 1987). En conséquence, les racines ont un développement superficiel et leur pénétration verticale est limitée dans les sols inondés (Gilman, 1990a; Crow, 2005), mal drainés (Coutts, 1989; Puhe, 2003) et mal oxygénés (Kazarjan, 1969; cité dans Drénou, 2000; McMichael et Quisenberry, 1993). Les conditions hydriques en profondeur pourraient avoir limité la croissance des racines dans le cas des sols lourds (Thomas, 2000). Cette distinction entre les deux types de sol au sujet du régime hydrique et par conséquent, les répercussions sur l'aération du sol pourrait expliquer en partie cette tendance à observer une plus grande abondance de racines en sol léger en profondeur.

Nos résultats sont comparables à ceux de Strong et La Roi (1985), de Sainju et Good (1993) et de Sudmeyer et coll. (2004). D'après ces auteurs, la teneur en argile d'un sol influencerait la capacité des racines de se développer en profondeur. Dans ces études, l'enracinement était faible ou même restreint par des densités apparentes élevées dans les sols où les argiles étaient prédominantes. Néanmoins, nos résultats contredisent ceux de Thomas (2000) dont l'étude consistait, entre autres, à évaluer la distribution racinaire du chêne sessile dans un sol argileux sableux en Europe centrale. Les résultats de Thomas (2000) montrent que sur les sites qualifiés de sableux, 50 % des racines, dont le diamètre est inférieur à 10 mm, étaient situées dans les 22 premiers cm de sol. En contrepartie, dans les sols argileux, 50 % des racines étaient concentrées dans la strate 0-37 cm de profondeur. L'auteur établit une corrélation positive entre les ressources nutritives en profondeur, particulièrement l'azote, et l'abondance des racines afin d'expliquer cette différence entre les sols sableux et argileux. Pour les sols sableux, le processus de minéralisation pourrait être inhibé en période de sécheresse lors des périodes estivales et ainsi moins d'azote serait disponible pour stimuler la croissance racinaire.

L'abondance de pierres et de cailloux pour une grande majorité de sites en sol léger a pu influencer à la hausse le nombre de racines dénombrées sur les parois d'observation dans la strate 50 cm et plus. Une étude de Lucot (1994) concernant le système racinaire du sapin pectiné (*Abies alba*) et du chêne pédonculé a permis d'observer que les racines de ces espèces se ramifient au contact d'un obstacle. Ces ramifications issues de pivots verticaux produisent des racines latérales et par conséquent, celles-ci apparaissent sur le profil et induisent un accroissement de la densité racinaire. Ce constat de Lucot (1994) a aussi été vérifié par Curt et coll. (2001) dont l'étude consistait à comparer l'enracinement du Douglas (*Pseudotsuga menziesii*) implanté sur sept types de sol. Les sites dont la teneur en petits cailloux était la plus élevée présentaient une augmentation du nombre de racines, mais seulement celles ayant un diamètre entre 5 et 20 mm.

5.2 Densité racinaire pour la classe 1 (≤ 1 mm de diamètre) à deux mètres des haies

Selon le tableau 4, seule la profondeur d'échantillonnage a influencé la densité des racines appartenant à la classe 1. On constate que 65 % des racines fines sont présentes dans les couches 0 à 30 cm de profondeur (Tableau 6). Ces couches présentent aussi les plus hautes densités racinaires qui diminuent au fur et à mesure que la profondeur augmente (Figure 7). Les résultats démontrent que les racines fines composent la grande majorité du nombre total de racines dénombrées sur les parois pour chacune des couches, soit entre 76 et 91 % des racines (Tableau 6). Notons la présence de racines fines à 1 m de profondeur. À ce propos, ces racines colonisant les profondeurs jouent un rôle essentiel dans l'approvisionnement en eau et en éléments nutritifs (Stone et Kalisz, 1991 cités dans Drexhage et Gruber, 1998).

La proportion de racines fines de notre étude est légèrement plus élevée que celle observée dans la littérature. Dans une étude réalisée en Nouvelle-Zélande, Douglas et coll. (2010) ont observé que 59 % des racines du peuplier étaient d'un diamètre inférieur à 2 mm et que celles-ci atteignaient au moins 90 cm de profondeur. Aussi, dans une étude portant sur la distribution racinaire de plusieurs espèces du genre *Salix* et *Populus*, Crow et Houston (2004) notent que les racines fines (< 1 mm) représentent près de 66 % du nombre total de racines et au moins 50 % de ces racines fines se retrouvent dans les premiers 36 cm. Enfin,

dans une revue de littérature réalisée sur l'épinette de Norvège, Puhe (2003) affirme que les plus hautes densités des racines fines (< 2 mm) sont habituellement observées à la surface du sol, soit dans la strate 0-30 cm de profondeur. Les fortes proportions de racines fines pourraient s'expliquer par leurs caractéristiques intrinsèques, soit la capacité d'absorber l'eau et de prélever les éléments nutritifs. En fait, l'aptitude d'un arbre d'absorber l'eau et les éléments nutritifs du sol est directement relié à sa capacité de développer un système racinaire extensif (Ludovici, 2004). La prolifération du système racinaire est quant à elle fortement reliée aux propriétés physiques et chimiques du sol (Strong et La Roi, 1983b; Rytter et Hansson, 1996). D'autre part, ces racines fines sont portées par des racines d'un diamètre supérieur, les racines ligneuses dont le rôle est d'accroître la stabilité de l'arbre, mais aussi le volume de sol prospecté et la quantité d'éléments nutritifs disponibles (Lucot, 1994). Compte tenu du fait que la vaste majorité des racines ligneuses se retrouve dans les 40 premiers cm (classes 2, 3 et 4), il est logique d'y retrouver une haute proportion de racines fines.

Tableau 6. Fréquence relative des racines de classe 1 (≤ 1 mm de diamètre) et proportion des racines de classe 1 par rapport à l'ensemble des racines selon la profondeur d'échantillonnage à deux mètres des haies brise-vent.

Profondeur	Fréquence relative des racines de classe 1 (%)	Proportion en % (racines classe 1/ensemble)
0-10	22,6	76,4
10-20	23,3	80,9
20-30	18,6	84,8
30-40	12,0	87,8
40-50	7,0	87,5
50-60	4,7	82,4
60-70	4,3	86,6
70-80	4,0	84,6
80-90	2,0	80,0
90-100	1,7	90,9
Total	100	

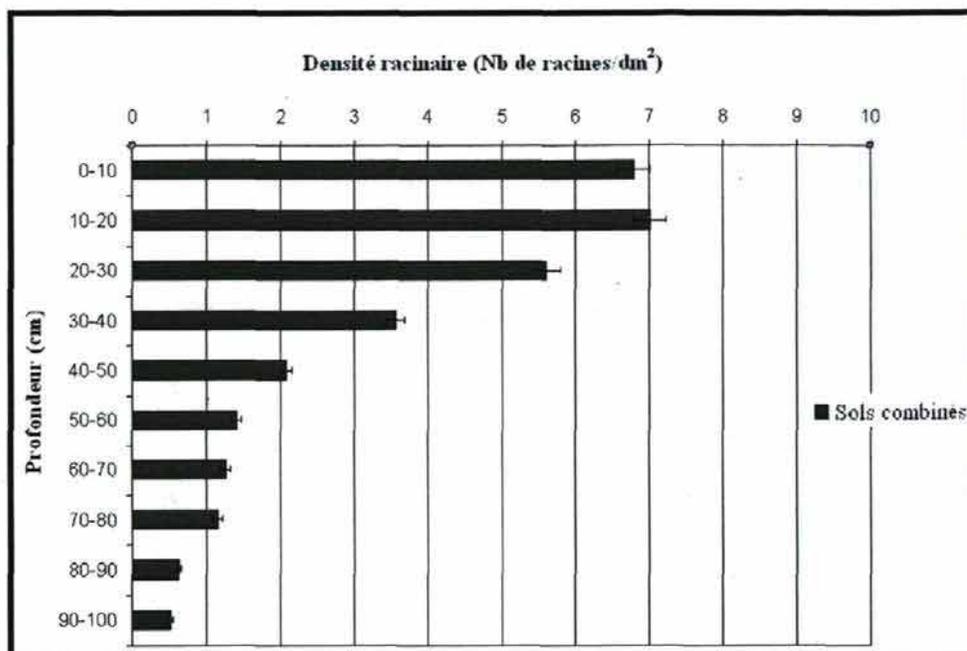


Figure 8. Densité racinaire de l'ensemble des espèces d'arbres pour la classe 1 (≤ 1 mm de diamètre) selon la profondeur d'échantillonnage effectué à deux mètres des haies brise-vent. Les intervalles sur les bâtonnets indiquent l'erreur-type.

5.3 Densité racinaire pour la classe 2 (>1 à ≤ 5 mm de diamètre), la classe 3 (>5 à ≤ 10 mm de diamètre) et la classe 4 (> 10 mm) à deux mètres des haies

Selon le tableau 4, l'espèce ($p= 0,017$) et la profondeur d'échantillonnage ($p\leq 0,001$) ont influencé la densité des racines appartenant à la classe 2. Le nombre de racines de peuplier se démarque des deux autres espèces de façon significative (Tableau 7), il est un peu plus élevée ($p=0,061$) que celui des épinettes, mais nettement plus élevée que celui des saules ($p=0,006$) (annexe 3). Bien que l'interaction entre les espèces et la profondeur ne soit pas significative, la figure 9 permet d'illustrer que la densité racinaire diminue pour l'ensemble des espèces au fur et à mesure que la profondeur augmente (Figure 9).

Tableau 7. Nombre moyen de racines de la classe 2 (>1 à ≤5 mm de diamètre) pour chaque espèce selon un échantillonnage effectué à deux mètres des haies brise-vent.

	Espèces		
	Épinette	Peuplier	Saule
Total	50,4ab	80,0a	35,9b

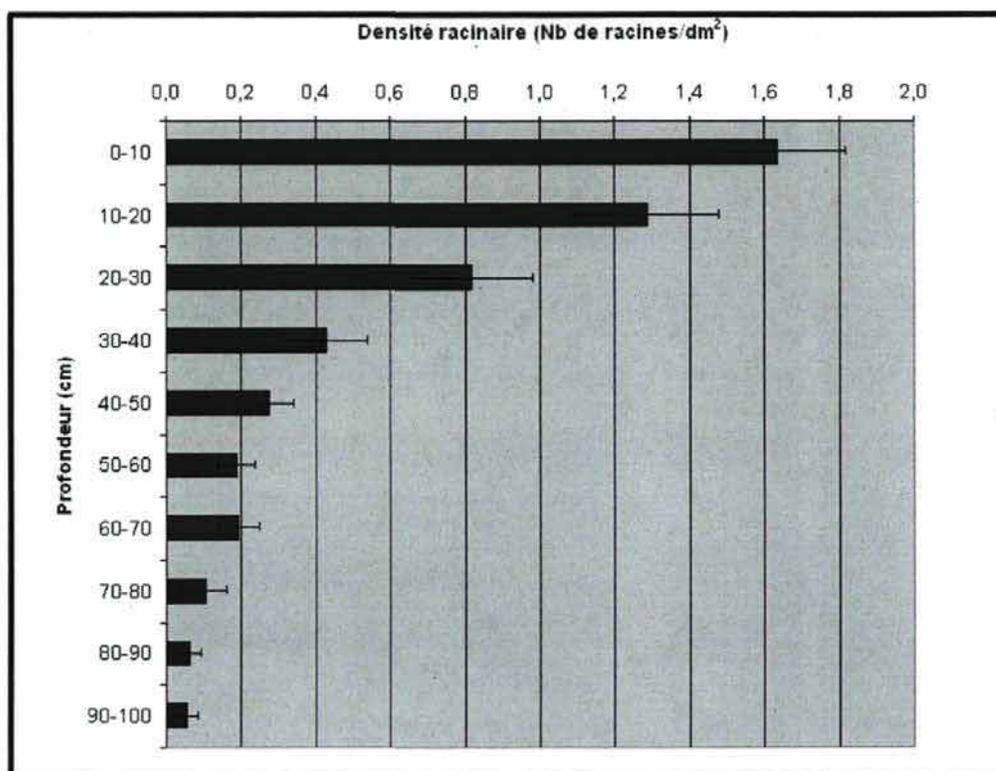


Figure 9. Densité racinaire de l'ensemble des espèces d'arbres et des types de sol pour la classe 2 (>1 à ≤5 mm de diamètre) selon la profondeur d'échantillonnage effectué à deux mètres des haies brise-vent. Les intervalles sur les bâtonnets indiquent l'erreur-type.

Pour les racines de classe 3 (>5 à ≤10 mm), les résultats démontrent un effet significatif de l'espèce et de la profondeur d'échantillonnage et une interaction significative entre l'espèce et la profondeur d'échantillonnage (Tableau 4). La densité racinaire du peuplier est supérieure ($p=0,0084$) de celle du saule et de l'épinette aux profondeurs 10-20; 40-50 et 60-70 cm (Figure 10 et Annexe 3). La majorité des racines de cette classe sont dans l'horizon superficiel, soit de 0 à 30 cm. Une fois de plus, on observe que la densité racinaire diminue

pour l'ensemble des espèces au fur et à mesure que la profondeur augmente. Signalons le comportement racinaire du saule (Figures 9 et 10), lequel montre une diminution abrupte du nombre de racines au-delà des horizons de surface (0-30 cm).

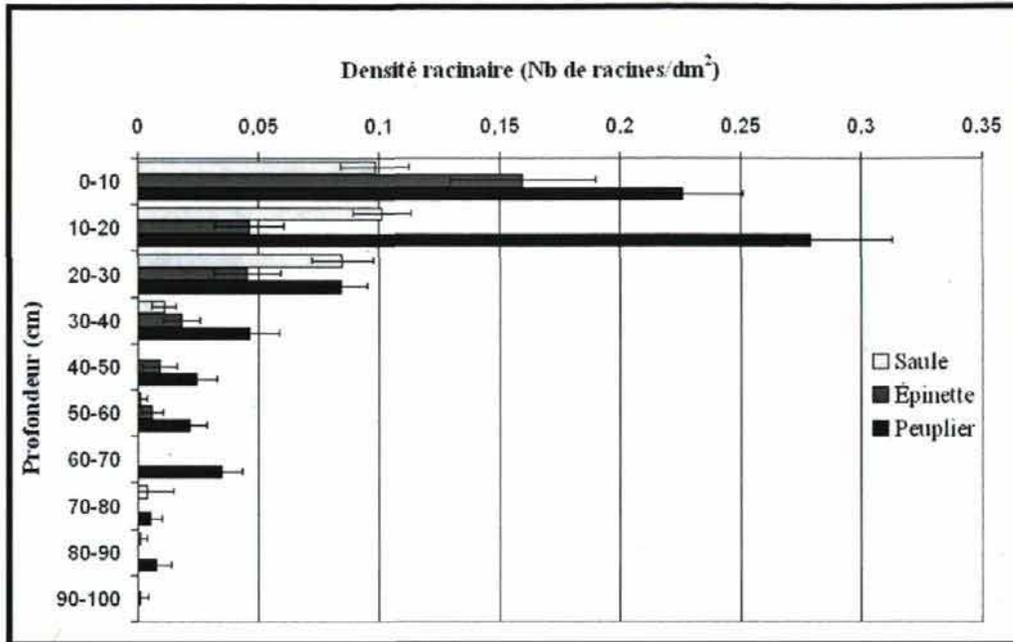


Figure 10. Densité racinaire pour la classe 3 (>5 à ≤10 mm de diamètre) selon l'espèce et la profondeur d'échantillonnage effectué à deux mètres des haies brise-vent. Les intervalles sur les bâtonnets indiquent l'erreur-type.

Pour les racines de la classe 4 (> 10 mm de diamètre), les résultats démontrent un effet significatif de l'espèce et de la profondeur d'échantillonnage et une interaction significative entre l'espèce, le sol et la profondeur d'échantillonnage (Tableau 4). Mentionnons que les racines de cette classe étaient présentes seulement dans la strate 0-50 cm de profondeur. Selon la figure 11, on constate que, dans l'horizon 0-20 cm, le peuplier présente une densité racinaire plus élevée en sol léger qu'en sol lourd, ce qui n'est pas le cas pour les autres espèces. Toutefois, au-delà de 20 cm, la densité racinaire du peuplier diminue rapidement en sol léger. En sol lourd, la densité racinaire du peuplier tend à être constante jusqu'à 40 cm de profondeur. L'épinette en sol lourd montre un profil de densité racinaire similaire au peuplier; une densité relativement constante dans les 30 premiers cm puis une diminution au-delà de cette profondeur. En sol léger, l'épinette montre une densité racinaire supérieure à celle du saule dans l'horizon 0-10 cm. Dans les strates 20-50 cm en sol léger, la densité racinaire du saule est supérieure à l'épinette et parfois à celle du peuplier. En sol lourd, la

densité racinaire du saule demeure comparable aux deux autres espèces dans la strate 0-20 cm, mais diminue rapidement au-delà de cette profondeur.

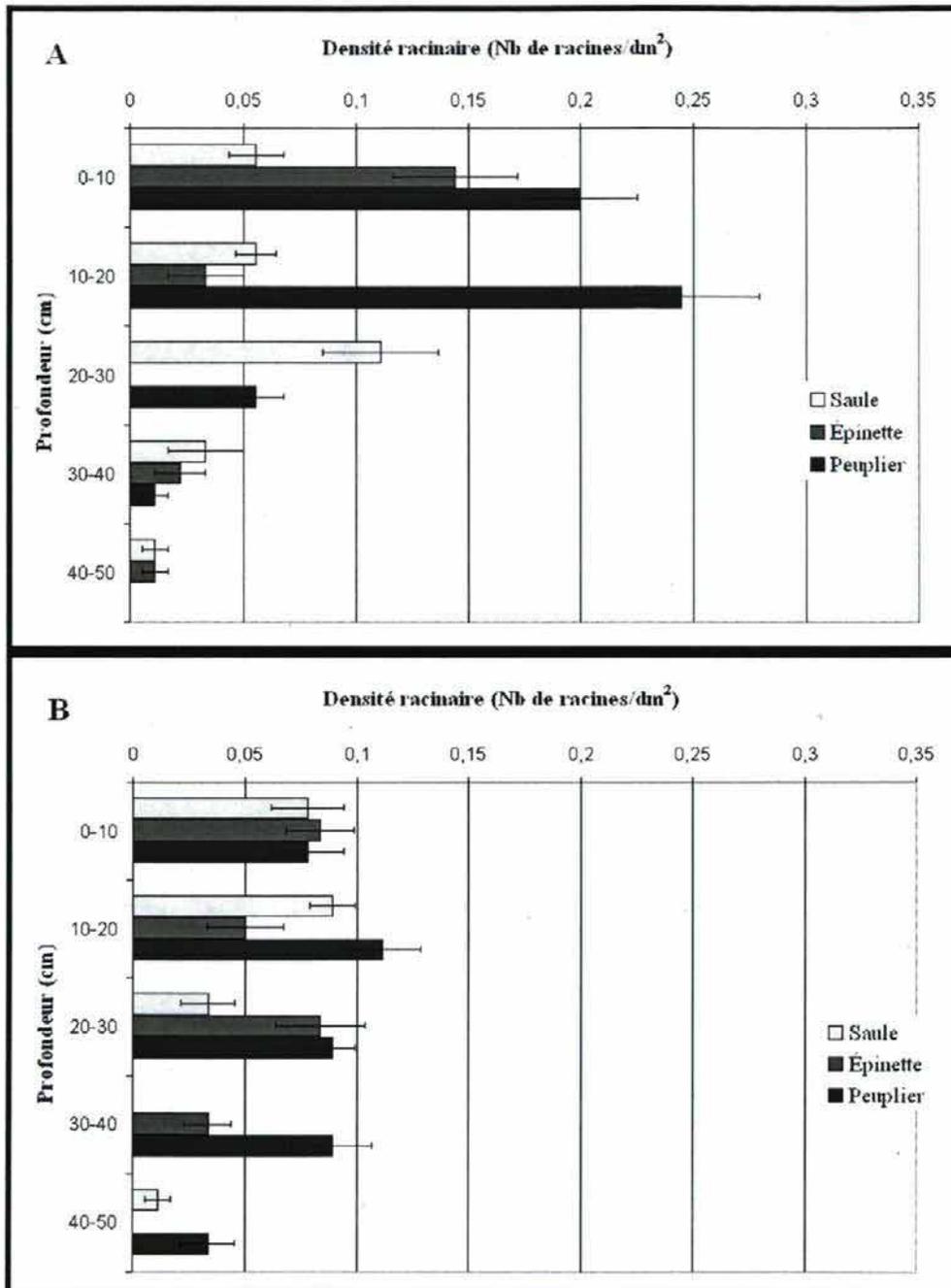


Figure 11. Densité racinaire pour la classe 4 (>10 mm de diamètre) des espèces de saule, d'épinette et de peuplier selon la profondeur d'échantillonnage effectué en sol léger (A) et en sol lourd (B) à deux mètres des haies brise-vent. Les intervalles sur les bâtonnets indiquent l'erreur-type.

Les résultats obtenus pour les classes 2, 3 et 4 se comparent à certaines études portant sur différentes espèces d'arbres. Lyford (1980) mentionne que les racines latérales du chêne rouge (*Quercus rubra*) se développent à des profondeurs moyennes de 30 cm, alors que les racines ligneuses de l'érable rouge (*Acer rubrum*) s'étendraient à des profondeurs moyennes de 10 cm (Lyford et Wilson, 1964). McIvor et coll. (2008) ont observé que la majorité des racines ligneuses (≥ 2 mm) de peupliers hybrides étaient situées dans les premiers 40 cm. Dans une autre étude portant sur le peuplier deltoïde, Puri et coll. (1994), ont aussi observé qu'au moins 50 % des racines de plus de 5 mm de diamètre se retrouvent dans la couche 0-30 cm. Watson et O'Loughlin (1990) notent que la plupart des racines latérales du pin de Monterey se retrouvent dans les 50 premiers cm de profondeur. En fait, les racines les plus longues et les plus grosses en terme de diamètre sont aussi celles dont la profondeur d'enracinement est la moindre. Gray (2000) affirme quant à lui que 95 % des racines du peuplier hybride sont confinées dans les 40 premiers cm. Toutefois, Sudmeyer et coll. (2004) ont observé chez l'eucalyptus commun des racines de 20 mm de diamètre à 1 m de profondeur. Aussi, Lucot (1994) a mis en évidence des systèmes racinaires denses, profonds et dont les racines sont de diamètre parfois supérieur à 20 mm. Notons cependant que dans cette étude, la paroi d'observation était située à quelques cm de la souche.

Les racines latérales (les charpentières) sont issues de la différenciation d'un petit nombre d'axes portés par la racine primaire, le pivot (Coutts, 1989). Ces axes sont répartis le long du pivot ou encore uniquement situés à proximité du collet (Drénou, 2006). Ces premières racines vont par la suite croître dans un plan horizontal ou encore selon un angle par rapport à l'axe vertical. À cet égard, Lucot (1994) a montré que l'angle moyen des racines latérales du chêne pédonculé et du sapin pectiné était de 83° et 77° respectivement. Dans tous les cas, ces racines primaires sont les plus vigoureuses en terme de vitesse d'extension et de croissance secondaire (Coutts et Nicoll, 1991). Les racines sont en forte concurrence pour les photosynthétats, ainsi la croissance d'une racine se fait au détriment d'une autre (Coutts et coll., 1999). On voit donc apparaître des racines dominantes avec le temps. Aussi, il est possible que ces racines issues près de la base de l'arbre aient un avantage sur celles en profondeur puisqu'elles sont les premières à recevoir les photosynthétats (Coutts et coll., 1999). Ces racines latérales de gros diamètre sont donc pour la plupart situées près de la surface et sont à la base du développement des racines au diamètre inférieur. Ainsi, il est

tout à fait logique de retrouver la majorité des racines de classe 2 et 3 dans les horizons de surface, elles prennent origine des racines de classe 4.

Par ailleurs, nous savons que le volume de sol prospecté par les racines pourra varier selon les espèces. Cette différence entre les espèces en ce qui concerne la stratégie d'occupation du sol, est particulièrement bien illustrée par Atger et Edelin (1994). Ces derniers insistent sur les processus de réitération par lequel certaines essences dupliquent totalement ou partiellement leur propre architecture racinaire. Ainsi, cette capacité de réitération entraîne la multiplication des racines de gros diamètre et assure par conséquent un maillage plus complet du sol colonisé (Drénou, 2006). Cependant, la réitération est coûteuse d'un point de vue énergétique et l'arbre se doit d'établir un équilibre entre une exploration maximale du sol, en particulier pour l'eau, et un transport efficace des ressources hydriques à un coût minimum (Fitter, 1987). En ce qui a trait aux ressources disponibles, celles-ci pourraient influencer le nombre de racines susceptibles de se développer ultérieurement en racines structurantes ou jouant un rôle dans l'ancrage et l'exploration du sol (Coutts, 1987; Coutts et al, 1999).

Aussi, le développement racinaire serait intimement lié à l'âge et par conséquent très souvent lié au diamètre de l'arbre et à celle de la taille. L'interrelation entre ces paramètres est manifeste dans une étude réalisée par Watson et O'Loughlin (1990). Le système racinaire de 13 pins de Monterey (cinq arbres âgés de huit ans, cinq arbres âgés de 16 ans et trois âgés de 25 ans) a été excavé. Les observations réalisées ont permis aux auteurs de conclure que l'extension et la profondeur des racines augmentaient avec l'âge. Par conséquent, la biomasse racinaire augmentait aussi. Les auteurs ont aussi établi une régression linéaire hautement significative entre la biomasse racinaire et le diamètre à hauteur poitrine des arbres. Ces observations ont été plus tard reprises par Lebourgeois et coll. (2002) qui concluent, après avoir observé le système racinaire de 117 chênes (*Quercus petraea* et *Quercus robur*) et 312 hêtres communs affectés par un chablis, que l'augmentation de la taille de l'arbre se traduit par une motte racinaire plus grosse, un volume de sol prospecté plus important et un plus grand nombre de racines latérales et verticales, surtout celles de diamètre supérieur à 20 mm.

Cette augmentation du volume racinaire et de la grosseur des racines en fonction de la taille pourrait s'expliquer par la nécessité de stabiliser l'arbre en réponse au vent (Nicoll et Ray, 1996; Danjon et coll. 2005). Avec l'âge et la taille de l'arbre, la prise au vent augmente, l'architecture se transforme et les charpentières latérales acquièrent une importance mécanique croissante. Ces charpentières horizontales répartissent le poids de l'arbre à la surface du sol (Drénou, 2006). La zone à l'intérieur de laquelle les pressions sont les plus fortes est nommée zone de défilement rapide (Zone of Rapid Taper ou ZRT dont le terme est de Eis, 1972 cité dans Danjon et coll. 2008). Elle est par définition la zone où les racines vont montrer un plus grand diamètre racinaire afin de mieux résister à la tension et à la flexion induite par le mouvement de l'arbre. Au-delà de cette zone, les racines vont montrer un diamètre inférieur.

La différence des hauteurs entre les espèces étudiées pourrait expliquer en partie les différences en ce qui concerne les densités racinaires des racines de classe 2, 3 et 4. Le peuplier présente une hauteur moyenne de près de 20 mètres, soit huit mètres de plus que l'épinette et environ 14 mètres de plus que le saule (Tableau 2). Au sujet de l'interaction entre le sol et la profondeur concernant les racines de classe 3, les possibilités pouvant expliquer cette différence méritent d'être approfondies.

À deux mètres de la tige, ces racines de classe 4 sont des charpentières dont la croissance s'établit à partir de la racine primaire (le pivot). La croissance radiale de ces racines ligneuses est influencée par des facteurs environnementaux et internes (Coutts, 1987). À cet égard, l'accroissement de l'arbre avec l'âge et par conséquent l'augmentation de la prise au vent implique des réponses physiologiques de l'arbre (Telewski, 1995; Stokes et coll., 1995) afin de lutter contre le déracinement. Ce phénomène a été illustré par Nicoll et Ray (1996). Ces derniers ont trouvé une relation inversement proportionnelle entre la profondeur d'enracinement et l'extension racinaire. Aussi, ils affirment que l'enracinement superficiel entraîne une plus grande allocation de la biomasse vers les organes souterrains. Il a pu être démontré que la partie la plus sollicitée est la zone située à l'équivalent d'une dizaine de fois le diamètre à 1,3 m (D130) de l'arbre (Danjon et coll., 2005). Les forces qui s'opposent au renversement de l'arbre sont la résistance en tension des racines au vent, la résistance en flexion des racines sous le vent, la résistance en torsion des racines traçantes

perpendiculaires au vent, la résistance au cisaillement du sol, le poids de la plaque sol-racines et l'action du pivot, lorsque présent (Coutts, 1986 et Weber et Mattheck, 2005 cités dans Danjon et coll., 2008). Ainsi, dans cette zone de forte sollicitation sous stress, la production d'éthylène stimulerait la croissance radiale de racines (Stokes et coll., 1995). Cette accumulation de bois implique par conséquent que ces racines reçoivent une plus grande quantité de photosynthétats, probablement au détriment d'autres parties de l'arbre (Coutts et coll., 1999).

Par ailleurs, la sensibilité des arbres au déracinement augmente généralement lorsqu'on passe des sols argileux à limoneux puis à sableux où les dégâts après tempêtes sont souvent les plus importants (Bréda et coll., 2002 dans Drénou, 2006). Deux propriétés du sol intimement liées à la texture du sol expliquent en partie ces observations; la cohésion et l'adhésivité. La cohésion est une propriété permettant aux particules du sol de rester associées les unes aux autres et l'adhésivité est la capacité du sol d'adhérer aux racines. En sol sableux, ces deux propriétés sont moindres vis-à-vis une texture limoneuse ou encore argileuse (Drénou, 2006). Ainsi, la résistance au cisaillement en zone de tension (face au vent) est très faible. En sol argileux, la résistance au cisaillement est stable au vent et sous le vent, car l'argile, très imperméable, emprisonne l'eau et empêche les particules du sol de se resserrer ou de s'écarter (Drénou, 2006). Ceci pourrait impliquer une moindre sollicitation biomécanique dans la zone de défilement rapide (ZRT) pour les arbres implantés sur sols argileux. Un élément de réponse est amené par Ennos (1995) qui a constaté une augmentation de la croissance de contrefort racinaire, autant sous le vent que face au vent, sur un sol tropical riche en humus dont la cohésion était moindre. Ses résultats contrastaient avec ceux obtenus par Mattheck (1991, 1993 cités dans Ennos, 1995) qui a observé une croissance de contrefort racinaire pour le peuplier seulement pour le côté face au vent dans un sol ferme (d'une forte cohésion). Ainsi, la plus grande quantité de racines de classe 4 en sol léger pourrait s'expliquer par les propriétés intrinsèques des différentes textures des sols et les différences de hauteur entre les peupliers en sols légers et ceux implantés en sols lourds.

5.4 Racines à six et neuf mètres

Compte tenu que sur certains sites, il n'y a pas eu de racines observées à six et neuf mètres, l'analyse statistique des résultats n'a pas pu être réalisée, à cause d'un nombre trop important de données manquantes. C'est la raison pour laquelle seules les moyennes descriptives sont présentées aux tableaux 2 à 9 à l'annexe 1 et 2. Il est important de rappeler que sur plusieurs de ces sites, on cultivait des prairies (Tableau 3). D'autres sites (2 et 7) présentaient des populations de mauvaises herbes dont la présence a influencé le dénombrement racinaire. Nous devons donc être prudents dans l'interprétation des résultats pour les classes I et II puisque le système racinaire des plantes fourragères et des mauvaises herbes est non lignifié et généralement fibreux et peut être confondu avec celui des espèces d'arbres implantés dans les haies. Il n'en demeure pas moins que nous pouvons souligner certains aspects.

Le système racinaire du saule est peu étendu, un seul site (site 2), en sol léger, montre des racines à six mètres et ce dernier n'expose aucune racine à neuf mètres. Aussi, les racines de la classe 1 se retrouvent sur l'ensemble du profil et celles de la classe 2 sont situées en surface. Il n'y a eu aucune racine de 5 mm et plus de dénombrée. Dans le cas de l'épinette, le site 2 en sol léger et le site 6 en sol lourd présentent des racines à six mètres. Ce dernier site présente aussi des racines à 9 mètres et dont le diamètre atteint parfois au moins 10 mm. Pour ce qui du peuplier, tous les sites en sol léger montrent une abondance de racines à six mètres. La majorité d'entre elles sont d'un faible diamètre ($\leq 5\text{mm}$) et aucune racine n'a été dénombrée à neuf mètres. La présence de prairies sur ces sites peut expliquer la présence de racines à six mètres. En sol lourd, deux sites (sites 1 et 3) présentent des racines à six mètres et un seul (site 1) à neuf mètres.

Retenons que le peuplier est l'espèce dont le système racinaire est le plus fréquemment observable à six mètres, suivi de l'épinette et enfin du saule. À neuf mètres, seul le sol lourd présente des racines dans le cas du peuplier et de l'épinette. Notons également que la profondeur d'enracinement diminue au fur et à mesure que le diamètre augmente. Ainsi, les racines lignifiées sont principalement situées dans les 50 premiers centimètres de sol.

6. Discussion générale

L'agroforesterie implique des interactions entre les espèces ligneuses et les cultures implantées dans les parcelles agricoles. Ces interactions peuvent générer des bénéfices environnementaux et économiques. Bien que certaines techniques agroforestières, telles que les haies brise-vent, soulèvent un intérêt grandissant, elles demeurent peu adoptées pour l'instant. Plusieurs raisons sont évoquées pour expliquer cet état de fait, tel que l'appréhension des producteurs agricoles face au risque de voir les racines des arbres endommager les drains agricoles souterrains ou de diminuer le potentiel de rendement des cultures adjacentes.

L'objectif de cette étude était de vérifier la distribution racinaire de trois espèces d'arbres implantées en haies brise-vent dans la région de La Pocatière, soit, le peuplier hybride (*Populus sp.*), le saule (*Salix sp.*) et l'épinette (*Picea sp.*) selon deux types de sol aux propriétés physiques contrastées : un sol léger et un sol lourd. La densité racinaire (nombre de racines/dm²) et le nombre de racines par classe de diamètre ont été comptabilisés jusqu'à une profondeur d'un mètre, et ce, à une distance de deux, six et neuf mètres des arbres dans la parcelle agricole.

Nous posions comme première hypothèse de recherche que l'enracinement en sol léger des espèces *Picea sp.*; *Populus sp.*; et *Salix sp.* est plus dense et plus profond que l'enracinement de ces espèces en sol lourd. À la lumière de nos résultats, nous infirmons cette hypothèse. Dans les deux types de sol, il a été possible d'observer des racines à 1 m de profondeur. Les densités racinaires étaient similaires entre les types de sol puisque aucune différence significative n'a été détectée. Les plus hautes densités racinaires sont observées dans les couches superficielles du sol, soit les 30 premiers cm. Les résultats obtenus démontrent que le nombre de racines diminue rapidement après 40 cm de profondeur. Les densités racinaires sont en constante diminution au fur et à mesure que la profondeur augmente ($p < 0,001$ pour l'effet profondeur au Tableau 4). Cependant, le type de sol a tendance ($p = 0,1043$ au Tableau 4) à avoir un effet sur la densité d'enracinement dans les 50 derniers cm de profondeur pour toutes les classes ensemble, de plus hautes densités ont été obtenues en sol léger en comparaison au sol lourd.

La deuxième hypothèse posée était que les densités et les distributions racinaires sont différentes entre les espèces, peu importe la texture du sol. Nous confirmons, en partie, cette hypothèse. À cet égard, seul le peuplier hybride se démarque de façon significative en obtenant un nombre de racines plus élevé que les autres espèces, et ce à différente profondeur, pour les classes de racines supérieures à 1 mm de diamètre. Selon le tableau 4, l'espèce ($p=0,017$) et la profondeur d'échantillonnage ($p\leq 0,001$) ont influencé la densité des racines appartenant à la classe 2. Le nombre de racines de peuplier se démarque des deux autres espèces de façon significative (Tableau 7), il est un peu plus élevée ($p=0,061$) que celui des épinettes, mais nettement plus élevée que celui des saules ($p=0,006$). Pour les racines de classe 3 (>5 à ≤ 10 mm), les résultats démontrent un effet significatif de l'espèce et de la profondeur d'échantillonnage et une interaction significative entre l'espèce et la profondeur d'échantillonnage (Tableau 4). La densité racinaire du peuplier est supérieure ($p=0,0084$) de celle du saule et de l'épinette aux profondeurs 10-20; 40-50 et 60-70 cm (Figure 10 et Annexe 3). La majorité des racines de cette classe sont dans l'horizon superficiel, soit de 0 à 30 cm. Enfin, pour les racines de la classe 4 (> 10 mm de diamètre), les résultats démontrent un effet significatif de l'espèce et de la profondeur d'échantillonnage et une interaction significative entre l'espèce, le sol et la profondeur d'échantillonnage (Tableau 4). Mentionnons que les racines de cette classe étaient présentes seulement dans la strate 0-50 cm de profondeur. La différence des hauteurs entre les espèces étudiées pourrait expliquer en partie les différences en ce qui concerne les densités racinaires des racines de classe 2, 3 et 4. Le peuplier présente une hauteur moyenne de près de 20 mètres, soit huit mètres de plus que l'épinette et environ 14 mètres de plus que le saule, ce qui a pu entraîner un enracinement plus important et de plus hautes densités racinaires (Tableau 2).

La troisième hypothèse posée était que les systèmes racinaires de toutes les espèces à l'étude sont peu étendus à l'intérieur des champs. Nous confirmons cette hypothèse. Nous avons observé une étendue limitée puisque peu de racines ont été comptabilisées à six mètres des arbres. Le peuplier est l'espèce dont le système racinaire est le plus fréquemment observable à six mètres, suivi de l'épinette et enfin du saule. À neuf mètres, seul le sol lourd présente des racines dans le cas du peuplier et de l'épinette. Le fait d'avoir

observé une étendue limitée des racines dans les champs adjacents supporte l'idée que les racines latérales se développent en surface et sont éliminées par le travail superficiel du sol.

Les résultats de cette étude nous laissent paraître qu'effectivement il existe des risques de voir les racines se rendre aux drains agricoles, lesquels sont habituellement situés à environ 90 cm de profondeur. Afin de réduire les risques, il importe alors de maintenir une distance minimale entre le lieu d'implantation de la haie brise-vent et les drains de la parcelle agricole adjacente. Schultz et coll. (2009) suggèrent de maintenir une distance minimale équivalente à une fois la hauteur que peut atteindre l'arbre mature. Dans notre étude, sachant que très peu de racines étaient présentes à 6 mètres des haies brise-vent, même dans le cas du peuplier, cette distance proposée par Schultz et coll. (2009) pourrait limiter les lieux d'implantation, surtout dans le cas du peuplier où l'arbre mature peut atteindre plus de 20 mètres de hauteur. À titre d'exemple, en suivant la norme d'une fois la hauteur de l'arbre mature, il serait déconseillé d'établir un système agroforestier de type cultures intercalaires sur une parcelle drainée souterrainement avec des rangées de peuplier hybride espacées de moins de 40 m. Or, dans ce type de système agroforestier, la distance préconisée entre les lignes d'arbres pour optimiser la production combinée de bois et de cultures agricoles se situe souvent entre 25 et 40 m. Dans une étude réalisée par Gray (2000), dans un système de culture intercalaire, l'auteur a démontré que 95 % des racines du peuplier hybride étaient situées dans les premiers 40 cm de profondeur. De plus, 90 % des racines étaient dans un rayon de 4,5 m de la souche de l'arbre. Mulia et Dupraz (2006; cités dans Caron et coll., 2009) ont observé que les arbres plantés en systèmes de cultures intercalaires avaient développé des profils racinaires distincts de ceux des plantations conventionnelles, en raison notamment de la compétition de la culture intercalaire, qui avait forcé leurs racines à se développer dans des horizons non exploités par la culture, particulièrement en profondeur. Ainsi, dans le cas du peuplier et de l'épinette, il apparaît peut-être exagéré de maintenir une distance minimale équivalente à une fois la hauteur de l'arbre mature entre le lieu d'implantation de la haie brise-vent et le système de drainage. Cette suggestion de Schultz et coll. (2009) serait par contre envisageable dans le cas du saule, où l'arbre mature mesure parfois moins de 5 mètres. D'autres facteurs sont aussi à prendre en considération, tels que la durée de l'implantation et la gestion du système agroforestier. Le système racinaire se densifie et prend de l'expansion en profondeur et en

longueur avec le temps (Drénou, 2006). Sachant cela, si l'objectif est de pratiquer la ligniculture de courte rotation ou encore de récolter le bois de jeunes arbres implantés dans des bandes riveraines ou des haies brise-vent dans le but de se procurer de la biomasse, le risque de voir les racines s'étendre sur de longues distances et se développer à des profondeurs élevées est plus faible.

Cependant, nous devons garder en tête que le processus de développement racinaire des arbres est fortement influencé par le milieu souterrain, les conditions environnementales et l'espèce d'arbre en question. Des études portant sur d'autres espèces ligneuses établies sous des conditions différentes à celles retrouvées dans la région de La Pocatière pourraient apporter des précisions supplémentaires utiles dans l'aménagement de systèmes agroforestiers.

Conclusion

C'est dans le but de mieux comprendre les interactions entre les arbres et les cultures et par le fait même d'améliorer leur aménagement ainsi que leur intégration dans l'espace rural québécois que l'étude des systèmes racinaires d'arbres implantés en haies brise-vent a été entreprise.

L'expérience réalisée dans la région de La Pocatière a permis d'évaluer la distribution verticale et horizontale du système racinaire de *Picea sp.* ; *Populus sp.* et *Salix sp.* en sols légers et en sols lourds.

Les résultats obtenus montrent que les racines sont localisées principalement dans les couches superficielles du sol, soit 0-30 cm. Les racines fines sont présentes sur l'ensemble du profil et elles représentent au moins 76% de l'ensemble des racines observées. Cette étude démontre que les racines sont peu envahissantes à une profondeur de plus de 50 cm, et ce, dans un rayon de deux mètres de souche de l'arbre. Le peuplier hybride se démarque de l'épinette et du saule en terme de densité racinaire pour les classes de racines supérieures à 1 mm de diamètre. Enfin, le sol lourd semble avoir tendance à limiter le développement racinaire à plus de 50 cm de profondeur. L'extension des racines à l'intérieur des champs était minime puisque très peu de racines ont été observées à 6 m des haies brise-vent. Ces résultats suggèrent que les racines des espèces étudiées ne concurrencent pas ou très peu les cultures adjacentes. De plus, les résultats démontrent que le système racinaire est principalement concentré près de la souche.

Enfin, l'aménagement des haies brise-vent devrait tenir compte des drains agricoles puisque le système racinaire des arbres atteint au moins 1 m de profondeur dans un rayon de 2 mètres des arbres.

Bibliographie

- Atger, C. et Edelin, C. 1994. Stratégies d'occupation du milieu souterrain par les systèmes racinaires des arbres. *Rev. Ecol. (Terre-Vie)*. 49 :343-356.
- Bakker, M.R., Turpault, M.P et Huet, S. 2008. Root distribution of *Fagus sylvatica* in a chronosequence in western France. *Journal of Forest Research*. 13:176-184.
- Baize, D. et Jabiol, B. 1995. Les racines. Dans *Guide pour la description des sols*. Institut National de la Recherche Agronomique, Paris. p. 163-174.
- Baril, R. et Rochefort, B. 1965. Étude pédologique du comté de Kamouraska. Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation. Gouvernement du Québec.
- Baril, R. et Rochefort, B. 1979. Étude pédologique du comté de L'Islet. Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation. Gouvernement du Québec.
- Baumgartner, J. 2006. Promouvoir une agriculture multifonctionnelle pour renouer les liens des paysages agroforestiers dans la MRC du Rocher-Percé. Article préliminaire à l'essai de maîtrise. Université du Québec à Montréal, Montréal, 14 p.
- Böhm, W. 1979. *Methods of studying root systems*. Springer Verlag, Berlin. 188 p.
- Brandle, J.R., Jonhson, B.B. et Dearthmont, D.D. 1984. Windbreak economics: The case of winter wheat production in eastern Nebraska. *J. Soil Water Conserv.* 39:339-343.
- Brandle, J.R., Hodges, L. et Zhou, X.H. 2004. Windbreaks in North American agricultural systems. *Agroforestry systems*. 61:65-78.
- Brandle, J.R., Hodges, L., Tyndall, J. et Sudmeyer, R.A. 2009. Windbreak practices. Dans *North American Agroforestry : An integrated science and practice*. H.E. Garrett (éd.). America Society of Agronomy, Inc. p.74-104.
- Carles, S.A., Lamhamedi, M.S., Beaulieu, J., Colas, F. et Margolis, H.A. 2008. Quelle proportion de la variabilité génétique des plants d'épinette blanche (*Picea glauca*) existe déjà au stade de la graine? 2^{ème} colloque annuel du Centre d'Étude de la Forêt. Québec. 12-14 mars 2008
- Charnet, F. 2003. L'enracinement des arbres et les propriétés physiques des sols. *Forêt-entreprise*. 154 :37-43.
- Commission sur l'avenir de l'agriculture et de l'agroalimentaire québécois (CAAAQ).2008. *Agriculture et agroalimentaire québécois : assurer et bâtir l'avenir*. Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et des Pêcheries du Québec. Québec, Canada, 274 p.

- Coutts, M.P. 1987. Development processes in tree root systems. *Canadian Journal of Forestry Research*. 17 :761-767.
- Coutts, M.P. 1989. Factors affecting the direction of growth of tree roots. *Annales des Sciences Forestières*. 46 :277-287.
- Coutts, M.P. et Nicoll, B.C. 1991. Orientation of lateral roots of trees. *New Phytologist*. 119:227-234.
- Coutts, M.P., Nielsen, C.C.N. et Nicoll, B.C. 1999 The development of symmetry and anchorage in the structural root systems of conifer. *Plant and Soil*. 217 :1-15.
- Crossley, D.I. 1940. The effect of a compact subsoil horizon in root penetration. *Journal of Forestry*. 10:794-796.
- Crow, P. et Houston, T.J. 2004. The influence of soil and coppice cycle on the rooting habit of short rotation poplar and willow coppice. *Biomass and Bioenergy*. 26:497-505.
- Crow, P. 2005. The influence of soils and species on tree root depth. Forestry Commission. United Kingdom. 7 p.
- Curt, T., Bouchaud, M., Lucot, E., Bardonnnet, C. et Bouquet, F. 1998. Influence des conditions géopédologiques sur le système racinaire et la croissance en hauteur du Douglas dans les monts du Beaujolais. *Ingénieries EAT*. 16 :29-46.
- Curt, T., Lucot, É. et Bouchard, M. 2001. Douglas-fir biomass and rooting profile in relation to soils in a mid-elevation area (Beaujolais Mounts, France). *Plant and Soil*. 233: 109-125.
- Cutler, D.F., Gasson, P.E. et Farmer, M.C. 1990. The wind blown tree survey: analysis of results. *Arboricultural Journal*. 14: 265-286.
- Cutler, D.F. 1993. Interactions between tree roots and construction work. *Arboricultural Journal*. 17: 47-55.
- Danjon, F., Fourcaud, T. et Bert, D. 2005. Root architecture and wind-firmness of mature *Pinus pinaster*. *New Phytologist*. 168:387-400.
- Danjon, F., Drénou, C., Dupuy, L. et Lobourgeois, F. 2008. Le rôle du sol et de l'ancrage racinaire. Dans « La forêt face aux tempêtes » Eds Birot Y., Landmann, G. Bonhême I. Editions Quae (Série Synthèses) 433 pages, 155-176.
- Das, D.K. et Chaturvedi, O.P. 2008. Root biomass and distribution of five agroforestry tree species. *Agroforestry System*. 74:223-230.
- De Baets, N., Gariépy, S. et Vézina, A. 2007. *Le portrait de l'agroforesterie au Québec*. Agriculture et Agroalimentaire Canada. Québec, Canada, 76 p.

- Dehoche, Y. 1997. L'enracinement des peupliers. *Forêt-entreprise*. 139 :50-56.
- Douglas, G.B., McIvor, I.R., Potter, J.F. et Foote, L.G. 2010. Root distribution of poplar at varying densities on pastoral hill country. *Plant Soil*. 333 :147-161.
- Drénou, C. 2000. Étude des relations entre systèmes racinaires et stabilité des arbres. *Les Dossiers de l'environnement de l'INRA*. 20: 153-159.
- Drénou, C. 2001. L'enracinement des arbres adultes. Premières observations. *Forêt-entreprise*. 139 :50-52.
- Drénou, C. 2003. Typologie et variations de l'enracinement des arbres adultes. *Forêt-entreprise*. 153 :27-32.
- Drénou, C. 2006. *Les racines : Face cachée des arbres*. Paris : Institut pour le développement forestier. 335 pp.
- Drexhage, M. et Gruber, F. 1998. Architecture of the skeleton root system of 40-year-old *Picea abies* on strongly acidified soils in the Harz Mountains (Germany). *Canadian Journal of Forestry Research*. 28:13-22.
- Caron, L., Duchesne, L., Gordon, A., Khasa, D., Kort, J., Oliver, A., Rivest, D. et Vézina, A. 2009. Agroforesterie. Dans *Manuel de foresterie*. Ordre des ingénieurs du Québec (2^e ed.) Éditions Multi-Monde. p. 849-872.
- Ennos, A.R. 1995. Development of buttresses in rainforest trees: the influence of mechanical stress. Dans *Wind and Trees*. M.P. Coutts et J. Grace (éd.). Cambridge University Press. p 293-301.
- Falkiner, R.A., Nambiar, E.K.S., Polglase, P.J., Theiveyanathan, S. et Stewart, L.G. 2006. Root distribution of *Eucalyptus grandis* and *Corymbia maculata* in degraded saline soils of south-eastern Australia. *Agroforestry Systems*. 67:279-291.
- Fernandez, J.E., Moreno, F., Cabrera, F., Arrue, J.L. et Martin-Aranda, J. 1991. Drip irrigation, soil characteristic and the root distribution and root activity of olive trees. *Plant and Soil*. 133:239-251.
- Fernandez, R.T., Perry, R.L. et Ferree, D.C. 1995. Root distribution patterns of nine apple rootstocks in two contrasting soil types. *American Society for Horticultural Science*. 120:6-13.
- Fitter, A.H. 1987. An architectural approach to the comparative ecology of plant root systems *New Phytologist*. 1:61-77.

- Fortier, J., Truax, B. et Gagnon, D. 2008. Peuplier hybride en zone riveraine-Améliorer l'agroenvironnement tout en produisant du bois. Agriculture et Agroalimentaire Canada. Québec, Canada, 12 p.
- Gagnon, B. 2005. La rétribution des biens et services environnementaux en milieu agricole. Ministère du Développement Durable, de l'Environnement et des Parcs. Québec, Canada, 67 p.
- Gale, M.R. et Grigal, D.F. 1987. Vertical root distribution of northern tree species in relation to successional status. *Canadian journal of forestry research*. 17:829-834.
- Garrett, H.E., McGraw, R.L. et Walter, W.D. 2009. Alley cropping practices. Dans *North American Agroforestry: An integrated science and practice*. H.E. Garrett (éd.). America Society of Agronomy, Inc. p.133-162.
- Gasson, P.E. et Cutler, D.F. 1990. Tree root plate morphology. *Arboricultural Journal*. 14:193-264.
- Gilman, E.F., Leone, I.A. et Flower, F.B. 1987. Effect of soil compaction and oxygen content on vertical and horizontal root distribution. *Journal of Environmental Horticulture*. 5:33-36.
- Gilman, E.F. 1990a. Tree root growth and development. 1. Form, spread, depth and periodicity. *Journal of Environmental Horticulture*. 8:215-220
- Gilman, E.F. 1990b. Tree root growth and development. 2. Response to culture, management and planting. *Journal of Environmental Horticulture*. 8:220-227.
- Gray, G.R.A. 2000. Root distribution of hybrid poplar in a temperate agroforestry intercropping system. 116 p. Mémoire (Ms.c.), Faculty of Graduate Studies, Université de Guelph, Ontario.
- Helliwell, D.R. 1989. Tree roots and the stability of trees. *Arboricultural Journal*. 13 :24-248
- Hruska, J., Cermak, J. et Sustek, S. 1999. Mapping tree root system with ground-penetrating radar. *Tree physiology*. 19 : 125-130.
- Hutchings, M.J. et John, E.A. 2003. Distribution of Roots in Soil, and Root Foraging Activity. pp. 33-60. *In: Root Ecology, Ecological Studies*, Vol. 168. Edited by H. de Kroon et E.J.W. Visser. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Jackson, M.B. et Attwood, P.A. 1996. Roots of willow (*Salix viminalis* L.) show marked tolerance to oxygen shortage in flooded soils and in solution culture. *Plant and Soil*. 187:37-45.

- Keller, C., Hammer, D., Kayser, A., Richner, W., Brodbeck, M. et Sennhauser, M. 2003. Root development and heavy metal phytoextraction efficiency: comparison of different plant species in the field. *Plant and Soil*. 1:67-81.
- Kelly, J.M., Kovar, J.L., Sokolowsky, R. et Moorman, T.B. 2007. Phosphorus uptake during four years by different vegetative cover types in a riparian buffer. *Nutr Cycl Agroecosyst* 78:239-251.
- Kort, J. 1988. Benefits of windbreaks to field and forage crops. *Agric.Ecosyst.Environ.* 22/23 :165-190.
- Kuzovkina, Y.A. et Quigley, M.F. 2005. Willows beyond wetlands :uses of *Salix* L. species for environmental projects. *Water, Air, and Soil Pollution*. 162:183-204.
- Lacombe, S., Bradley, R.L., Hamel, C., Rivest, D., Cogliastro, A. et Olivier, A. 2007. Tree-based intercropping systems increase spatial heterogeneity of soil microbial communities. Dans *Acte du 10^e Congrès nord-américain d'agroforesterie*. Ed. Alain Olivier et Suzanne Campeau. Québec, Québec, Canada. p.147-154.
- Leakey, R. 1996. Definition of agroforestry revisited. *Agroforestry Today*. 8 (1) : 5-7.
- Lebourgeois, F. et Jabiol, B. 2002. Enracinements comparés du chêne sessile, du chêne pédonculé et de hêtre. *Réflexions sur l'autoécologie des essences*. *Revue Forestière Française (LIV)*. 1 :17-42.
- Lebourgeois, F., Archeveque, G., Bruciamacchie, M., Colin, F., Drexhage, M. et Jabiol, B. 2002. Analyse des systèmes racinaires d'essences feuillues et résineuses dans différentes situations sylvicoles et stationnelles. *Rapport Scientifique Final, Projet FORBOIS 1420 A*. -Nancy : ENGREF-LERFOB, juin 2002, 72 pages
- Lucot, E. et Bruckert, S. 1992. Organisation du système racinaire du chêne pédonculé (*Quercus robur*) développé en conditions édaphiques non contraignantes (sol brun lessivé colluvial). *Annales des Sciences Forestières*. 4 :465-479.
- Lucot, E. 1994. Influence des caractéristiques de la pierrosité des sols sur la prospection racinaire et l'alimentation hydrique des arbres. Application à l'estimation de la valeur des sols forestiers. 97 p. Thèse (Ph.d.), L'U.F.R. des sciences et techniques de l'Université de Franche-Comté, France.
- Ludovici, K.H. 2004. Tree roots and their interaction with soil. Dans *Encyclopedia of forest sciences*. Ed Jeffery Burley, Julian Evans et John A. Youngquist. Oxford, UK. p. 1195-1201
- Lyford, W.H et Wilson, B.F. 1964. Development of the root system of *Acer rubrum* L. *Harvard Forest Paper*. 10:1-17.

- Lyford, W.H. 1980. Development of the root system of northern red oak (*Quercus rubra* L.). Harvard Forest Paper. 21:2-31.
- Lyr, H. et Hoffmann, G. 1967. Growth rates and growth periodicity of tree roots. Int. Rev. For. Res. 2 :181-236.
- Mackie-Dawson, L.A. et Atkinson, D. 1991. Methodology for the study of roots in field experiments and the interpretation of results. Dans *Plant root growth: An ecological perspective*. D. Atkinson (éd.). Blackwell Scientific Publications. p.25-47.
- Marchand, P.P. et Masse, S. 2008. Enjeux reliés au développement et à l'application de technologies de boisement et d'agroforesterie pour la production de biomasse énergétique résultats des groupes de consultation rencontrés au Québec et dans les Prairies. Ressources Naturelles Canada. Québec, Canada, 110p. Rapport d'information LAU-X-135
- McClaugherty, C.A., Aber, J.D. et Melilo, J.M. 1982. The role of fine roots in the organic matter and nitrogen budgets of two forested ecosystems. Ecology. 63 :1481-1490.
- McIvor, I.P., Douglas, G.B., Hurst, S.E., Hussain, Z. et Foote, A.G. 2008. Structural root growth of young Veronese poplars on erodible slopes in the southern North Island, New-Zealand. Agroforestry System. 72 :75-86.
- McMichael, B.L. et Quisenberry, J.E. 1993. The impact of the soil environment on the growth of root systems. Environmental and Experimental Botany. 1:53-61.
- Millspaugh, J.J., Shulz, J.H., Mong, T.W., Burhans, D., Walter, W.D., Bredesen, R., Pritchert Jr, R.D. et Dey, D.C. 2009. Agroforestry Wildlife Benefits. Dans *North American Agroforestry : An integrated science and practice*. H.E. Garrett (éd.). America Society of Agronomy, Inc. p.257-286.
- Montagnini, F. et Nair, P.K.R. 2004. Carbon sequestration : An underexploited environmental benefit of agroforestry. Agroforestry Systems. 61:281-295.
- Mou, P., Jones, R.H., Mitchell, R.J et Zutter, B. 1995. Spatial distribution of roots in sweetgum and loblolly pine monocultures and relations with above-ground biomass and soil nutrients. Functional Ecology. 4:689-699.
- Mou, P., Mitchell, R.J. et Jones, R.H. 1997. Root distribution of two tree species under a heterogeneous environment. Journal of Applied Ecology. 34:645-656.
- Mulia, R. et Dupraz, C. 2006. Unusual fine root distributions of two deciduous tree species in southern France :What consequences for modelling of tree root dynamics. Plant and Soil. 281:71-85.

- Nadeau, L.B. et Pluth, D.J. 1997. Spatial distribution of lodgepole pine and white spruce seedlings roots 10 years after deep tillage of a gray luvisol. *Canadian Journal of Forestry Research*. 27: 1606-1613.
- Nicoll, B.C. et Ray, D. 1996. Adaptive growth of tree roots in response to wind action and site conditions. *Tree Physiology*. 16:891-898.
- Puhe, J. 2003. Growth and development of the root system of Norway spruce (*Picea abies*) in a forest stands-a review. *Forest Ecology and Management*. 175:253-273.
- Puri, S., Singh, V., Bhustan, B. et Singh, S. 1994. Biomass production and distribution of roots in three stands of *Populus deltoides*. *Forest Ecology and Management*. 65:135-147.
- Raimbault, P. 1991. Quelques observations sur les systems racinaires des arbres de parcs et d'alignement. Diversité architectural et convergence dans le développement. Dans *L'arbre. Biologie et développement*. Ed. C. Edelin. Montpellier, France. p. 85-96.
- Rao, M.R., Muraya, P. Et Huxley, P.A. 1993. Observations of some tree roots systems in agroforestry ntercrop situations, and their graphical representation. *Exp. Agric*. 29:183-194.
- Rivest, D et Olivier, A. 2007. Cultures en intercalaires avec feuillus : quel potentiel pour le Québec ? *The Forestry Chronicle*. 4:526-538.
- Rivest, D., Cogliastro, A., Vanasse, A. et Olivier, A. 2009. Production of soybean associated with different hybrid poplar clones in a tree-based intercropping system in southwestern Québec, Canada. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 131: 51-60.
- Rytter, R.M. et Hansson, A.C. 1996.. Seasonal amount, growth and depth distribution of fines roots in an irrigated and fertilized *Salix viminalis* L. Plantation. *Biomass and Bionergy*. 2/3: 129-137.
- Safford, L.O. et Bell, S. 1972. Biomass of fine roots in a white spruce plantation. *Canadian Journal of Forest Research*. 3:169-172.
- Sainju, U.M. et Good, R.E. 1993. Vertical root distribution in relation to soil properties in New-Jersey Pinelands forests. *Plant and Soil*. 150:87-97.
- Saucier, J-P., Grondin, P., Robitaille, A. et Bergeron, J-F. 2003. Zones de végétation et domaines bioclimatiques du Québec. Gouvernement du Québec. Ministère des Ressources naturelles, de la Faune et des Parcs.
- Schmid, I. et Kazda, M. 2002. Root distribution of Norway spruce in monospecific and mixed stands on different soils. *Forest Ecology and Management*. 159: 37-47.

- Schroeder, W.R. et Kort, J. 2007. An overview of shelterbelts in modern agriculture. Dans *Acte du 10^e Congrès nord-américain d'agroforesterie*. Ed. Alain Olivier et Suzanne Campeau. Québec, Québec, Canada. p.3-14.
- Schroeder, W., Kort, J., Silim, S., Pharo, C., Simpson, J., Stefner, C., Murray, B., Wright, T., Thevathasan, N., Vezina, A., Wisman, M. et Johnston, M. 2007. Agroforestry systems for energy production. Agriculture et Agroalimentaire Canada, Workshop.
- Schroth, G. 1995. Tree root characteristics as criteria for species selection and system design in agroforestry. *Agroforestry Systems*. 30:125-143.
- Schultz, R.C., Colletti, J.P., Isenhardt, T.M., Simpkins, W.W., Mize, C.W. et Thompson M.L. 1995. Design and placement of a multi-species riparian buffer strip system. *Agroforest Syst.* 31:117-132.
- Schultz, R.C., Isenhardt, T.M., Colletti, J.P., Simpkins, W.W., Udawatta, R.P. et Shultz, P.L. 2009. Riparian and upland buffer practices. Dans *North American Agroforestry : An integrated science and practice*. H.E. Garrett (éd.). America Society of Agronomy, Inc. p.163-218.
- Silva, J.S. et Rego, F.C. 2003. Root distribution of a Mediterranean shrubland in Portugal. *Plant and Soil*. 255:529-540.
- Stokes, A., Fitter, H. et Coutts, M.P. 1995. Responses of young trees to wind :effects on root growth. Dans *Wind and Trees*. M.P. Coutts et J. Grace (éd.). Cambridge University Press. p.264-275.
- Stone, E.L. et Kalisz, P.J. 1991. On the maximum extent of trees roots. *Forest ecology and management*. 46:59-102.
- Strong, W.L. et La Roi, G.H. 1983a. Rooting depths and successional developement of selected boreal forest communities. *Canadian Journal of Forest Research*. 13:577-588.
- Strong, W.L. et La Roi, G.H. 1983b. Root system morphology of common boreal forest trees in Alberta, Canada. *Canadian Journal of Forest Research*. 13. 1164-1173.
- Strong, W.L. et La Roi, G.H. 1985. Root density-soil relationship in selected boreal forests of central Alberta, Canada. *Forest Ecology and Management*. 12: 233-251.
- Sudmeyer, R.A., Adams, M., Eastham, J., Scott, P.R., Hawkins, W. et Rowland, I. 2002. Broad-acre crop yield in the lee of windbreaks in the medium and low rainfall areas of south-western Australia. *Australian Journal of Experimental Agriculture*. 42: 739-750.
- Sudmeyer, R.A., Speijers, J., et Nicholas, B.D. 2004. Root distribution of *Pinus pinaster*, *P. radiata*, *Eucalyptus globulus* and *E. kochii* and associated soil chemistry in agricultural land adjacent to tree lines. *Tree physiology*. 24: 1333-1346.

- Sutton, R.F. (1980). Root system morphogenesis. *New Zealand Journal of Forest Science* 10: 265-292.
- Sylva, J.S. et Rego, F.C. 2003. Root distribution of a Mediterranean shrubland in Portugal. *Plant and Soil*. 255:529-540.
- Tamassi, 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*. 4:374-384.
- Telewski, F.W. 1995. Wind-induced physiological and development responses in trees. Dans *Wind and Trees*. M.P. Coutts et J. Grace (éd.). Cambridge University Press. p.237-263.
- Thomas, F.M. 2000. Vertical rooting patterns of mature *Quercus* trees growing on different soil types in northern Germany. *Plant Ecology*. 147:95-103.
- Turrel, M. 1967. Il est important de savoir comment se développent les racines de peuplier. *Bulletin de la vulgarisation forestière*. Association technique pour la vulgarisation forestière. 67 :1-8.
- Van Rees, K. 1997. Rooting patterns of boreal tree species. The Prince Albert model forest association. Saskatchewan, Canada. 55 p.
- Vandenbelt, R.J., Brenner, A.J. et Sinclair, F.L. 1990. Tree/Crop interactions in agroforestry systems. Dans *Proceedings of the 19th International Union of Forestry Research Organizations World Congress*. Montréal, Canada, p. 292-303.
- Vézina, A. 1991. Les Haies brise-vent. *L'Aubelle* 83 : 1-13.
- Vézina, A., Rivest, C. et Lebel, F. 2007a. Analyse économique de six modèles de haies brise-vent utilisés pour la protection des bâtiments d'élevage porcin dans l'est du Canada. Dans *Acte du 10^e Congrès nord-américain d'agroforesterie*. Ed. Alain Olivier et Suzanne Campeau. Québec, Québec, Canada. p. 41-48.
- Vézina, A., Desbiens, P. et Nadeau, N. 2007b. Choix et arrangement des végétaux en haies brise-vent et en bandes riveraines. Institut de technologie et agroalimentaire de La Pocatière. 113 p.
- Volk, T.A., Abrahamson, L.P., Nowak, C.A., Smart, L.B., Tharakan, P.J. et White, E.H. 2006. The development of short-rotation willow in the northeastern United States for bioenergy and bioproducts, agroforestry and phytoremediation. *Biomass and Bioenergy*. 30:715-727.
- Watson, A. et O'Loughlin, C. 1990. Structural root morphology and biomass of three age-classes of *Pinus radiata*. *New Zealand Journal of Forestry Science*. 20(1):97-110.

- Wiseman, G.S., Kort, J., Walker, D.J., Powers, J.S. et Stefnier, C.N. 2007. Quantification of shelterbelt characteristics using high resolution imagery. Dans *Acte du 10^e Congrès nord-américain d'agroforesterie*. Ed. Alain Olivier et Suzanne Campeau. Québec, Québec, Canada. p.49-57.
- Wood, P.J. et Burley, J. 1993. Les arbres à usages multiples : introduction et évaluation pour l'agroforesterie. Centre technique de coopération agricole et rurale (C.T.A), Wageningen, Pays-Bas.
- Young, A. 1995. L'agroforesterie pour la conservation des sols. Centre technique de coopération agricole et rurale (C.T.A), Wageninge, Pays-bas. 194 p.

ANNEXE 1 : Présentation des moyennes descriptives des racines comptabilisées à 6 m des haies brise-vent

Tableau 1. Nombre total de racines observées à 6m des épinettes, peupliers et saules à chacun des sites pour le sol léger et le sol lourd.

		Site		
		1	2	3
		Nombre total de racines		
Sol	Espèce			
léger	Épinette	0	179	0
	Peuplier	173	430	256
	Saule	0	97	0
Lourd	Épinette	0	0	112
	Peuplier	70	0	104

N.B. Le site 3 en peuplier en sol lourd présentait un vieux système de drainage composé de tuyaux de «céramique» alignés les uns après les autres à une profondeur de 40-50 cm. De sorte que le système de drainage présentait des interstices et avait été envahi par des racines de diamètre variables.

Tableau 2. Système racinaire de l'épinette en sol léger; nombre total moyen de racines observées à 6 m de l'arbre jusqu'à une profondeur de un mètre.

couche	classe 1	classe 2	classe 3	classe 4	nb total racine par couche
0-10	47	0	0	0	47
10-20	67	0.3	0	0	67.3
20-30	51.3	2.7	0	0	54
30-40	9	0	0	0	9
40-50	0.3	0	0	0	0.3
50-60	0.3	0	0	0	0.3
60-70	0	0	0	0	0
70-80	0.6	0	0	0	0.6
80-90	0	0	0	0	0
90-100	0	0	0	0	0
Total	175.6	3	0	0	178.6

Tableau 3. Système racinaire de l'épinette en sol lourd; nombre total moyen de racines observées à 6 m de l'arbre jusqu'à une profondeur de un mètre.

couche	classe 1	classe 2	classe 3	classe 4	nb total racine par couche
--------	----------	----------	----------	----------	----------------------------

0-10	19.7	4.3	1	0.3	25.3
10-20	16.7	5.7	1	0	23.3
20-30	18.3	5.7	1	0.7	25.7
30-40	11.7	4.0	0	0	15.7
40-50	9.3	1.0	0	0	10.3
50-60	6.0	0.7	0	0	6.7
60-70	2.0	1.0	0	0	3.0
70-80	2.3	0	0	0	2.3
80-90	0	0	0	0	0
90-100	0	0	0	0	0
Total	86	22.4	3	1	112.3

Tableau 4. Système racinaire du **peuplier** en **sol léger**; nombre total moyen de racines observées à 6 m de l'arbre jusqu'à une profondeur de un mètre.

couche	classe 1	classe 2	classe 3	classe 4	nb total racine par couche
0-10	64	5.2	0.7	0	69.9
10-20	55.1	2.3	0.1	0	57.6
20-30	52.9	1.0	0	0	53.9
30-40	38.3	0.7	0	0	39
40-50	20.0	0.6	0.1	0	20.7
50-60	14.8	0.8	0	0	15.6
60-70	11.6	0.9	0.2	0	12.7
70-80	9.6	0.6	0	0	10.1
80-90	3.7	0.2	0	0	3.9
90-100	2.8	0.1	0	0	2.9
Total	272.8	12.4	1.1	0	286.3

Tableau 5. Système racinaire du **peuplier** en **sol lourd**; nombre total moyen de racines observées à 6 m de l'arbre jusqu'à une profondeur de un mètre.

couche	classe 1	classe 2	classe 3	classe 4	nb total racine par couche
0-10	16.2	2.3	0.7	0	19.2
10-20	16.8	2.8	0.5	0	20.2
20-30	10.3	1.7	0.3	0.2	12.5
30-40	8.8	0.7	0.5	0.2	10.2
40-50	7.0	1.2	0.2	1.0	9.3
50-60	6.0	0.2	0	0	6.2
60-70	4.0	0	0.2	0	4.2
70-80	3.2	0.2	0	0	3.3
80-90	0.8	0	0	0	0.8

90-100	0.8	0.3	0	0	1.2
Total	73.9	9.4	2.4	1.4	87.1

Tableau 6. Système racinaire du **saule en sol léger**; nombre total moyen de racines observées à 6 m de l'arbre jusqu'à une profondeur de un mètre.

couche	classe 1	classe 2	classe 3	classe 4	nb total racine par couche
0-10	4.0	0	0	0	4.0
10-20	17.0	4.0	0	0	21.0
20-30	10.0	9.0	0	0	19.0
30-40	2.0	0	0	0	2.0
40-50	4.0	0	0	0	4.0
50-60	9.0	0	0	0	9.0
60-70	17.0	0	0	0	17.0
70-80	9.0	0	0	0	9.0
80-90	12.0	0	0	0	12.0
90-100	0	0	0	0	0
Total	84	13	0	0	97.0

ANNEXE 2 : Présentation des moyennes descriptives des racines comptabilisées à 9 m des haies brise-vent

Tableau 7. Nombre total de racines observées à 9 m des épinettes, peupliers pour le sol lourd.

		Site
		3
		Nombre total de racines
Sol	Espèce	104
Lourd	Épinette	
	Peuplier	

Tableau 8. Système racinaire de l'épinette en sol lourd; nombre total moyen de racines observées à 9 m de l'arbre jusqu'à une profondeur de un mètre.

couche	classe 1	classe 2	classe 3	classe 4	nb total racine par couche
0-10	51.7	2.0	0.3	0	54
10-20	20.3	2.0	0	0	22.3
20-30	10.7	1.0	0.3	0.3	12.3
30-40	5.7	2.0	0.3	0.3	8.3
40-50	4.3	1.0	0	0.3	5.7
50-60	0.7	0	0	0.3	1.0
60-70	0	0.7	0	0	0.7
70-80	0	0	0	0	0
80-90	0	0	0	0	0
90-100	0	0	0	0	0
Total	93.4	8.7	0.9	1.2	104.2

Tableau 9. Système racinaire du peuplier en sol lourd; nombre total moyen de racines observées à 9 m de l'arbre jusqu'à une profondeur de un mètre.

couche	classe 1	classe 2	classe 3	classe 4	nb total racine par couche
0-10	18.7	3.0	0	0	21.7
10-20	23.3	0.7	0.7	0	24.7
20-30	24.3	0.7	0.7	0.7	26.4
30-40	17.0	1.7	0	0	18.7
40-50	8.3	3.0	0	0.7	12.0
50-60	10.0	1.7	0	0	11.7
60-70	4.3	2.3	0	0	6.6
70-80	3.7	0.3	0	0	4.0

80-90	6.0	0.3	0	0	6.3
90-100	7.0	0	0	0	7.0
Total	122.6	13.7	1.4	1.4	139.1

ANNEXE 3 : Résultats du test du LSD (plus petite différence significative)

Classe 2

	Valeur de P
épinette vs peuplier	0.061
peuplier vs saule	0.006

Classe 3

		Valeur de P
10-20 cm	épinette vs peuplier	0.002
	saule vs peuplier	0.015
40-50 cm	peuplier vs saule	0.022
60-70 cm	peuplier vs saule	<0.001
	épinette vs peuplier	<0.001

ANNEXE 4 : Résultats des analyses physico-chimiques de chacun des sites



Accrédité pour pH, pH tampon, K, Ca, Mg, Al, Mn, Cu, Zn, par CEAQ

Date de réception: 28-oct-08 *Provenance*
 Date du rapport: 07-nov-08 CEPAF
 Numéro du certificat: 9934 1642, route de la Ferme
 Numéro d'accréditation: 459 La Pocatière
 Méthode: Extraction Mehlich 3 GOR 120
 Résultats en base sèche Michel Larose
 Échantillonné le:

Échantillons
 Pierre-Manue Plante
 482, Ave. Royale #23
 Québec, Québec, Québec
 G1E 1Y1
 Par:

Résultats d'analyses					
Numéro laboratoire		SO-0157240	SO-0157241	SO-0157242	SO-0157243
Identification champ		1er haie peup	2 e haie peup	3e haie peup	1er haie peup
Culture prévue					
	pH	6,9 ^B	6,2 ^M	6,7 ^B	7,2 ^B
	pH tampon	7,0 ^B	6,3 ^M	7,0 ^B	7,2 ^B
<i>Incinération</i>	Mat. Org. %	4,5 ^B	5,0 ^B	5,8 ^B	5,5 ^B
<i>kg/ha</i>	P	466 ^{ER}	243 ^A	171 ^B	57 ^P
	K	558 ^{ER}	657 ^{ER}	535 ^{ER}	446 ^B
	Ca	4 288 ^B	3 290 ^M	4 730 ^B	7 142 ^{TR}
	Mg	197 ^B	265 ^B	366 ^{ER}	1 050 ^{ER}
<i>ppm</i>	Al	873 ^M	1 082 ^B	945 ^M	967 ^M
<i>‰</i>	P/Al*	23,8 ^{ER}	10,0 ^B	8,1 ^B	2,6 ^M
<i>ppm</i>	Mn				
	Cu				
	Zn				
	B				
	S				
<i>%</i>	N total				
	C / N				
<i>ppm</i>	N-NH ₄				
<i>ppm</i>	N-NO ₃				

*P/Al = Valeur environnementale critique = limite entre bon et riche. Valeurs agronomiques critiques = limite entre pauvre et moyen, et, entre riche et très riche.

Physique du sol

Granulométrie		1er haie peup	2 e haie peup	3e haie peup	1er haie peup
Sable	%				
Limon	%				
Argile	%				
Classe texturale					
Type de sol		Léger	Léger	Léger	Lourd

Besoins en chaux IVA 75%					
No laboratoire		O-0157240	O-0157241	O-0157242	O-0157243
No champ		1er haie peup	2 e haie peup	3e haie peup	1er haie peup
Culture prévue					
Quantité t/ha			8,8		
Type de chaux			Calcaire		

CEC et saturations en bases					
No champ		1er haie peup	2 e haie peup	3e haie peup	1er haie peup
CEC (meq/100g)		15,4 ^M	20,2 ^B	17,0 ^M	23,5 ^B
Base	Marge moy	Saturations en bases			
K	0,3 - 2,0	4,1 ^{TR}	3,7 ^B	3,6 ^B	2,2 ^B
Ca	25 - 60	62,0 ^B	36,3 ^B	62,0 ^B	67,8 ^B
Mg	1 - 10	4,7 ^B	4,9 ^B	8,0 ^B	16,6 ^{TR}
Total	10 - 90	70,9 ^B	44,9 ^B	73,6 ^B	86,6 ^B
Rapport	Marge moy	Rapports entre les éléments			
K/Mg	0,1 - 0,5	0,87 ^{TR}	0,76 ^{TR}	0,45 ^B	0,13 ^M
K/Ca	,01 - ,06	0,07 ^B	0,10 ^{TR}	0,06 ^B	0,03 ^B
Mg/Ca	,03 - 0,26	0,08 ^M	0,13 ^B	0,13 ^B	0,24 ^B
Autres résultats					
Na / RAS	ppm	<5			
Conductivité électrique	m/mhos/cm				

*P/Al = Valeur environnementale critique = limite entre bon et riche. Valeurs agronomiques critiques = limite entre pauvre et moyen, et, entre riche et très riche.

Estimé		1er haie peup	2 e haie peup	3e haie peup	1er haie peup
Densité estimée	g/cm ³	1,08 ^E	1,08 ^E	1,09 ^E	1,03 ^M
Porosité estimée	%	57,9 ^B	58,1 ^B	57,4 ^B	59,8 ^B
Perméabilité estimée					
Conductivité hydrique	cm/h				
Cont. de réserve eau utile (CRU)	g eau / 100 g sol sec				

B= Basse, M= Moyenne, E=Elevée

Remarques

Résultats applicables aux échantillons soumis à l'analyse seulement. Ce document est à l'usage exclusif du client et est confidentiel, si vous n'êtes pas le destinataire visé, soyez avisé que tout usage, reproduction, ou distribution de ce document est strictement interdit. Ce certificat ne doit pas être reproduit, ni en entier, sans l'autorisation écrite du laboratoire.

1er haie peup	Le sol a un pH élevé, le B, le Mn, le Zn et le Cu sont peu disponibles pour les plantes, attention aux déficiences.

Contrôle qualité		Valeurs attendues: 85 à 115 %					Résultats des échantillons contrôlés passés avec vos échantillons, résultats en % des valeurs attendues pour chacun des paramètres									
pH	MO	P	K	Ca	Mg	Al	Mn	Cu	Zn	B	S	Na	Fe	N total	C.E.	
101,9	103,4	100,6	103,6	101,7	100,3											

Michel Champagne, B.Sc. agronome

Karin Arseneault, M.Sc. chimiste



Accrédité pour pH, pH tampon, K, Ca, Mg, Al, Mn, Cu, Zn, par CEAEQ

Date de réception: 28-oct-08 *Provenance*
 Date du rapport: 07-nov-08 CEPAF
 Numéro du certificat: 9934 1642, route de la Ferme
 Numéro d'accréditation: 459 La Pocatière
 Méthode: Extraction Mehlich 3 GOR 120
 Résultats en base sèche Michel Larose
 Échantillonné le:

Échantillons
 Pierre-Manue Plante
 482, Ave. Royale #23
 Québec, Québec
 G1E 1Y1 Québec
 Par:

Résultats d'analyses					
Numéro laboratoire		SO-0157244	SO-0157245	SO-0157246	SO-0157247
Identification champ		2 ^e Haie peup	3 ^e Haie peup	1 ^{er} Haie Ep	2 ^e Haie Ep
Culture prévue					
	pH	6,5 ^B	6,6 ^B	5,7 ^M	5,9 ^{MB}
	pH tampon	7,0 ^B	7,0 ^B	6,1 ^M	6,4 ^M
Incineration	Mat. Org. %	3,0 ^M	5,4 ^R	3,2 ^{MB}	2,8 ^M
kg/ha	P	69 ^M	113 ^{MB}	381 ^{ER}	382 ^{ER}
	K	387 ^R	750 ^{ER}	318 ^R	454 ^R
	Ca	4 289 ^B	4 959 ^B	635 ^{TR}	1 157 ^P
	Mg	629 ^{ER}	909 ^{ER}	72 ^M	153 ^B
	Al	1 160 ^B	1 138 ^B	1 178 ^B	1 104 ^B
ppm	P/Al*	2,7 ^M	4,4 ^{MB}	14,4 ^R	15,4 ^R
	Mn				
	Cu				
	Zn				
	B				
	S				
	Fe				
%	N total				
	C / N				
ppm	N-NH ₄				
ppm	N-NO ₃				

*P/Al Valeur environnementale critique = limite entre bon et riche. Valeurs agronomiques critiques = limite entre pauvre et moyen, et, entre riche et très riche.

Physique du sol

Granulométrie	2 ^e Haie peup	3 ^e Haie peup	1 ^{er} Haie Ep	2 ^e Haie Ep
Sable %				
Limon %				
Argile %				
Classe texturale				
Type de sol	Light	Light	Light	Light

Remarques

Résultats applicables aux échantillons soumis à l'analyse seulement. Ce document est à l'usage exclusif du client et est confidentiel, et vous n'êtes pas le destinataire visé, soyez avisé que tout usage, reproduction, ou distribution de ce document est strictement interdit. Ce certificat ne doit pas être reproduit, sinon en entier, sans l'autorisation écrite du laboratoire.

Contrôle qualité		Valeurs attendues: 85 à 115 %					Résultats des échantillons contrôlés passés avec vos échantillons, résultats en % des valeurs attendues pour chacun des paramètres								
pH	MO	P	K	Ca	Mg	Al	Mn	Cu	Zn	B	S	Na	Fe	N total	C.E.
101,9	103,4	100,6	103,6	101,7	100,3	103,7									

Michel Champagne, B.Sc. agronome

Karin Arseneault, M.Sc. chimiste

Besoins en chaux IVA 75%				
No laboratoire	O-0157244	O-0157245	O-0157246	O-0157247
No champ	2 ^e Haie peup	3 ^e Haie peup	1 ^{er} Haie Ep	2 ^e Haie Ep
Culture prévue				
Quantité t/ha			10,8	7,3
Type de chaux			Dolomitique	Magnésienne

CEC et saturations en bases					
No champ		2 ^e Haie peup	3 ^e Haie peup	1 ^{er} Haie Ep	2 ^e Haie Ep
CEC (meq/100g)		16,9 ^{MB}	19,8 ^{MB}	14,7 ^M	13,9 ^M
Base	Marge moy	Saturation en bases			
K	0,3 - 2,0	2,6 ^R	4,3 ^{TR}	2,5 ^R	3,7 ^R
Ca	25 - 60	56,8 ^B	55,9 ^B	9,7 ^P	18,5 ^P
Mg	1 - 10	13,9 ^R	17,1 ^{TR}	1,8 ^M	4,1 ^B
Total	10 - 90	73,3 ^B	77,3 ^R	14,0 ^P	26,3 ^M
Rapport	Marge moy	Rapports entre les éléments			
K/Mg	0,1 - 0,5	0,19 ^M	0,25 ^B	1,36 ^{TR}	0,91 ^{TR}
K/Ca	.01 - .06	0,05 ^B	0,08 ^R	0,26 ^{TR}	0,20 ^{TR}
Mg/Ca	.03 - 0,25	0,24 ^B	0,31 ^R	0,19 ^B	0,22 ^B
Autres résultats					
Na / RAS	ppm	<5			
Conductivité électrique	mmhos/cm				

*P/Al Valeur environnementale critique = limite entre bon et riche. Valeurs agronomiques critiques = limite entre pauvre et moyen, et, entre riche et très riche.

Estimé	2 ^e Haie peup	3 ^e Haie peup	1 ^{er} Haie Ep	2 ^e Haie Ep
Densité estimée g/cm ³	1,20 ^E	1,03 ^M	1,20 ^E	1,31 ^E
Porosité estimée %	53,8 ^B	59,7 ^B	53,6 ^B	49,8 ^B
Perméabilité estimée				
Conductivité hydraulique	cm/h			
Coef. de réserve eau utile (CRU)	g eau / 100 g sol sec			

B = Basse, M = Moyenne, E = Élevée

Accrédité pour pH, pH tampon, K, Ca, Mg, Al, Mn, Cu, Zn, par CEAEQ

Date de réception: 28-oct-08
 Date du rapport: 07-nov-08
 Numéro du certificat: 9934
 Numéro d'accréditation: 459
 Méthode: Extraction Mehlich 3
 Résultats en base sèche

Provenance
 CEPAF
 1642, route de la Ferme
 La Pocatière
 G0R 1Z0
 Michel Larose
 Échantillonné le:

Échantillons
 Pierre-Manue Plante
 482, Ave. Royale #23
 Québec, Québec
 G1E 1Y1

Québec Québec Québec

Par:

Résultats d'analyses					
Numéro laboratoire	SO-0157248	SO-0157249	SO-0157250	SO-0157251	
Identification champ	3e Haie Ep	1er Haie Ep	2e Haie Ep	1ere Haie Sv	
Culture prévue					
pH	6,6 #	7,8 TR	6,2 MB	6,5 #	
pH tampon	7,0 #	7,8 #	6,4 M	7,0 #	
Incandescence	Mat. Org. %	5,8 #	3,0 MB	5,0 #	7,1 TR
kg/ha	P	25 TR	52 P	54 P	16 TR
	K	169 MB	543 MB	288 #	237 #
	Ca	5 130 #	7 892 TR	4 479 #	5 363 #
	Mg	360 #	941 MB	613 MB	845 MB
ppm	Al	744 M	694 M	903 MB	840 MB
	P/Al*	1,5 P	3,4 M	2,7 M	0,8 TR
ppm	Mn				
	Cu				
	Zn				
	B				
	S				
	Fe				
%	N total				
	C / N				
ppm	N-NH ₄				
ppm	N-NO ₃				

*P/Al: Valeur environnementale critique # limite entre bon et riche, B/Bon, R/Riche, TR/Très riche

Physique du sol

Granulométrie	3e Haie Ep	1er Haie Ep	2e Haie Ep	1ere Haie Sv
Sable %				
Limon %				
Argile %				
Classe texturale				
Type de sol	Léger	Lourd	Lourd	Lourd

Remarques

Résultats appliqués aux échantillons soumis à l'analyse seulement. Ce document est à l'usage exclusif du client et est confidentiel, si vous n'êtes pas le destinataire visé, soyez avisé que tout usage, reproduction, ou distribution de ce document est strictement interdit. Ce certificat ne doit pas être reproduit, en son entier, sans l'autorisation écrite du laboratoire.

1er Haie Ep	Le sol a un pH élevé, le B, le Mn, le Zn et le Cu sont peu disponibles pour les plantes, attention aux déficiences.

Contrôle qualité	Valeurs attendues: 85 à 115 %						Résultats des échantillons contrôlés passés avec vos échantillons, résultats en % des valeurs attendues pour chacun des paramètres										
	pH	MO	P	K	Ca	Mg	Al	Mn	Cu	Zn	B	S	Na	Fe	N total	C.E.	
	101,9	103,4	100,8	103,8	101,7	100,3	103,7										

Besoins en chaux IVA 75%				
No laboratoire	O-0157248	O-0157249	O-0157250	O-0157251
No champ	3e Haie Ep	1er Haie Ep	2e Haie Ep	1ere Haie Sv
Culture prévue				
Quantité t/ha			6,3	
Type de chaux			Coloique	

CEC et saturations en bases					
No champ	3e Haie Ep	1er Haie Ep	2e Haie Ep	1ere Haie Sv	
CEC (meq/100g)	17,5 MB	21,7 #	22,1 #	19,9 MB	
Base	Marge moy	Saturation en bases			
K	0,3 - 2,0	1,1 #	2,9 #	1,5 #	1,4 #
Ca	25 - 90	65,5 #	81,0 TR	45,1 #	60,2 #
Mg	1 - 10	7,7 #	16,1 TR	10,3 #	15,8 TR
Total	10 - 90	74,3 #	100,0 TR	56,9 #	77,4 #
Rapport	Marge moy	Rapports entre les éléments			
K/Mg	0,1 - 0,5	0,14 #	0,18 M	0,14 M	0,09 P
K/Ca	,01 - ,06	0,02 #	0,04 #	0,03 #	0,02 #
Mg/Ca	,03 - 0,25	0,12 #	0,20 #	0,23 #	0,26 #
Autres résultats					
Na / RAS	ppm <5				
Conductivité électrique	mmho/cm				

*P/Al: Valeur environnementale critique # limite entre bon et riche, B/Bon, R/Riche, TR/Très riche

Estimé	3e Haie Ep	1er Haie Ep	2e Haie Ep	1ere Haie Sv
Densité estimée g/cm ³	1,06 E	1,15 E	1,05 E	0,95 M
Porosité estimée %	58,7 B	55,8 B	59,2 B	62,4 M
Perméabilité estimée				
Conductivité hydrique	cm/h			
Coeff. de réserve eau utile (CRU)	g eau / 100 g sol sec			

B=Basse, M=Moyenne, E=Elevée

Michel Champagne, B.Sc. agronome

Karin Arseneault, M.Sc. chimiste



Date de réception: 28-oct-08
 Date du rapport: 07-nov-08
 Numéro du certificat: 9934
 Numéro d'accréditation: 459
 Méthode: Extraction Mehlich 3
 Résultats en base sèche

Provenance
 CEPAF
 1642, route de la Ferme
 La Pocatière
 G0R 1Z0
 Michel Larose
 Échantillonné le:

Accrédité pour pH, pH tampon, K, Ca, Mg, Al, Mn, Cu, Zn, par CEAQ

Échantillons
 Pierre-Manue Plante
 482, Ave. Royale #23
 Québec, Québec, Québec
 G1E 1Y1
 Par:

Résultats d'analyses				
Numéro laboratoire		SO-0157252	SO-0157253	SO-0157254
Identification champ		2e Haie SV	3e Haie SV	1ere Haie SV
Culture prévue				
	pH	7,1 ^B	7,2 ^B	5,5 ^M
	pH tampon	7,1 ^B	7,2 ^B	6,0 ^M
Incroûtement	Mat. Org. %	5,6 ^B	7,3 ^{TR}	3,9 ^{MB}
kg/ha	P	100 ^{MB}	20 ^{TR}	721 ^{ER}
	K	663 ^{ER}	172 ^{MB}	841 ^{ER}
	Ca	6 686 ^{ER}	7 580 ^{TR}	1 977 ^B
	Mg	907 ^{TR}	537 ^{ER}	160 ^B
ppm	Al	890 ^{MB}	915 ^{MB}	1 133 ^B
%	P/Al*	5,0 ^{MB}	1,0 ^{TR}	28,4 ^{ER}
ppm	Mn			
	Cu			
	Zn			
	B			
	S			
	Fe			
%	N total			
	C / N			
ppm	N-NH ₄			
ppm	N-NO ₃			

*P/Al = Très pauvre, P = Pauvre, M = Moyen, M^B = Moyen bon, B = Bon, B^B = Très riche, TR = Très riche

Physique du sol

Granulométrie		2e Haie SV	3e Haie SV	1ere Haie SV
Sable	%			
Limon	%			
Argile	%			
Classe texturale				
Type de sol		Lourd	Lourd	Léger

Remarques

Résultats applicables aux échantillons soumis à l'analyse seulement. Ce document est à usage exclusif du client et est confidentiel. Si vous n'êtes pas le destinataire visé, s'il vous plaît ne pas le divulguer, sinon en entier, sans l'autorisation écrite du laboratoire.

2e Haie SV	Le sol a un pH élevé, le B, le Mn, le Zn et le Cu sont peu disponibles pour les plantes, attention aux déficiences.
3e Haie SV	Le sol a un pH élevé, le B, le Mn, le Zn et le Cu sont peu disponibles pour les plantes, attention aux déficiences.

Contrôle qualité	Valeurs attendues: 85 à 115 %				Résultats des échantillons contrôlés passés avec vos échantillons, résultats en % des valeurs attendues pour chacun des paramètres										
pH	MO	P	K	Ca	Mg	Al	Mn	Cu	Zn	B	S	Na	Fe	N total	C.E.
101,7	103,4	100,8	103,8	101,7	100,3	103,7									

Michel Champagne, B.Sc. agronome

Karin Arseneault, M.Sc. chimiste

Besoins en chaux IVA 75%			
No laboratoire	O-0157252	O-0157253	O-0157254
No champ	2e Haie SV	3e Haie SV	1ere Haie SV
Culture prévue			
Quantité t/ha			12,0
Type de chaux			Magnésienne

CEC et saturations en bases				
No champ		2e Haie SV	3e Haie SV	1ere Haie SV
CEC (meq/100g)		22,8 ^B	21,8 ^B	19,3 ^{MB}
Base	Marge moy	Saturation en bases		
K	0,3 - 2,0	3,3 ^B	0,9 ^M	5,0 ^{TR}
Ca	25 - 60	65,4 ^B	77,6 ^{TR}	22,9 ^B
Mg	1 - 10	14,8 ^B	9,1 ^B	3,1 ^B
Total	10 - 90	83,4 ^B	87,6 ^B	31,0 ^M
Rapport	Marge moy	Rapports entre les éléments		
K/Mg	0,1 - 0,5	0,22 ^B	0,10 ^B	1,61 ^{TR}
K/Ca	,01 - ,06	0,05 ^B	0,01 ^M	0,22 ^{TR}
Mg/Ca	,03 - 0,25	0,23 ^B	0,12 ^B	0,14 ^B
Autres résultats				
Na / RAS	ppm <5			
Conductivité électrique	mmhos/cm			

*P/Al = Valeur environnementale critique = limite entre bon et riche. Valeurs agronomiques critiques = limite entre pauvre et moyen, et, entre riche et très riche.

Estimé		2e Haie SV	3e Haie SV	1ere Haie SV
Densité estimée	g/cm ³	1,09 ^E	1,01 ^M	1,16 ^E
Porosité estimée	%	57,3 ^B	60,1 ^M	55,1 ^B
Perméabilité estimée				
Conductivité hydraulique	cm/h			
Coef. de réserve eau utile (CRU)	g eau / 100 g sol sec			

B = Basse, M = Moyenne, E = Élevée