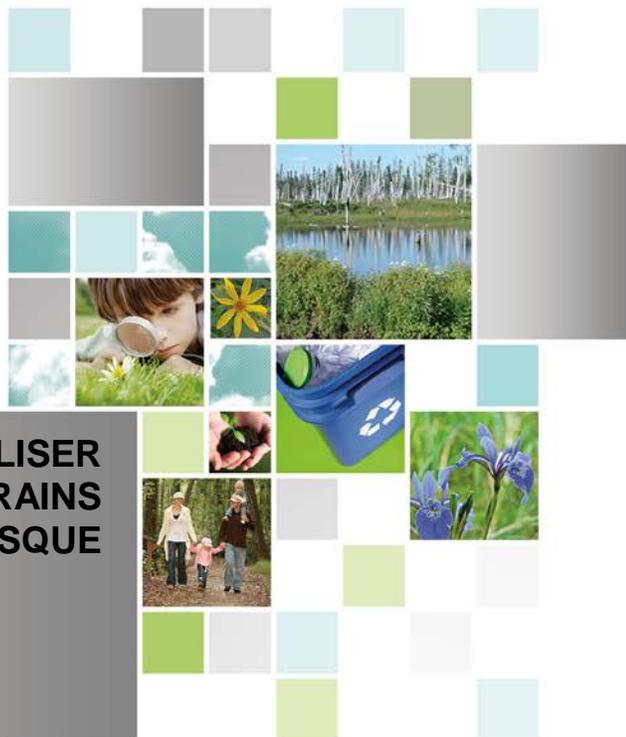


**ARBRES ET ARBUSTES À UTILISER
POUR LA VÉGÉTALISATION DES TERRAINS
RÉHABILITÉS PAR ANALYSE DE RISQUE**



Coordination et rédaction

Cette publication a été réalisée par le Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec (CEAEQ), Division écotoxicologie et évaluation du risque, du ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC), avec la collaboration de la Direction du Programme de réduction des rejets industriels et des lieux contaminés (DPRRILC) du MDDELCC.

Conception et rédaction

Nathalie Paquet, CEAEQ

Validation

Louis Martel, CEAEQ

Renée Gauthier, DPRRILC

Collaboration

Gaëlle Triffault-Bouchet, CEAEQ

Veronika Varfalvy, DPRRILC

Luc Bonneau, DPRRILC

Johanne Laberge, DPRRILC

Secrétariat et mise en page

Chantal Fortin, DPRRILC

Renseignements

Pour tout renseignement concernant les mesures de confinement, vous pouvez communiquer avec la DPRRILC :

Téléphone : 418 521-3950 poste 4900

Télécopieur : 418 644-3386

Internet : www.mddelcc.gouv.qc.ca

Pour tout renseignement concernant les arbres et les arbustes sélectionnés, vous pouvez communiquer avec le CEAEQ, Division écotoxicologie et évaluation du risque :

Téléphone : 418 643-1301

Télécopieur : 418 528-1091

Courriel : ceaeq@mddelcc.gouv.qc.ca

Internet : www.ceaeq.gouv.qc.ca

Référence à citer

MINISTÈRE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE, DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA LUTTE CONTRE LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES. Arbres et arbustes à utiliser pour la végétalisation des terrains réhabilités par analyse de risque. Août 2017. 34 pages. [En ligne]
[http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/sol/terrains/index.\(...\).pdf](http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/sol/terrains/index.(...).pdf)

Photo de la couverture : © Shutterstock.com

Dépôt légal – 2017

Bibliothèque et Archives nationales du Québec

ISBN-978-2-550-79371-7 (PDF)

Tous droits réservés pour tous les pays.

© Gouvernement du Québec - 2017

Table des matières

LISTE DES TABLEAUX	II
LISTE DES FIGURES	III
1. MISE EN CONTEXTE	1
2. DÉVELOPPEMENT DU SYSTÈME RACINAIRE	2
2.1 <i>SYSTÈME RACINAIRE</i>	2
2.2 <i>PROFONDEURS DES RACINES</i>	4
2.3 <i>ÉTUDE DE CAS</i>	10
3. ARBRES ET ARBUSTES SÉLECTIONNÉS POUR LA VÉGÉTALISATION D'UN TERRAIN RÉHABILITÉ PAR ANALYSE DE RISQUE	12
4. MESURES ADDITIONNELLES	30
5. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	31

Liste des tableaux

Tableau 1 : Profondeur maximale des racines d'arbres déracinés à la suite d'une tempête en Angleterre en 1987 (Gasson et Cutler, 1990)	6
Tableau 2 : Conifères indigènes du Québec à utiliser ou à proscrire pour la végétalisation de terrains réhabilités par analyse de risque où des contaminants ont été laissés en place sous un recouvrement de confinement	14
Tableau 3 : Feuillus indigènes du Québec à utiliser ou à proscrire pour la végétalisation de terrains réhabilités par analyse de risque où des contaminants ont été laissés en place sous un recouvrement de confinement	16
Tableau 4 : Arbres ornementaux ou introduits au Québec à utiliser ou à proscrire pour la végétalisation de terrains réhabilités par analyse de risque où des contaminants ont été laissés en place sous un recouvrement de confinement	20
Tableau 5 : Arbustes indigènes du Québec à utiliser ou à proscrire pour la végétalisation de terrains réhabilités par analyse de risque où des contaminants ont été laissés en place sous un recouvrement de confinement	22
Tableau 6 : Arbustes ornementaux du Québec à utiliser ou à proscrire pour la végétalisation de terrains réhabilités par analyse de risque où des contaminants ont été laissés en place sous un recouvrement de confinement	27

Liste des figures

Figure 1 : Exemples de systèmes racinaires : pivotant, fasciculé ou traçant	3
Figure 2 : Profondeur d'enracinement maximale chez différentes espèces végétales, en fonction de l'écosystème (Canadell et collab., 1996).....	5
Figure 3 : Distribution des racines du pin blanc (<i>Pinus strobus</i>) dans les horizons d'un sol limoneux naturel (chaque lettre désigne un horizon différent) (Dobson et Moffat, 1995, selon les données de Lutz et collab., 1937). Bande grise, racines > 1 mm de diamètre; bande blanche, racines < 1 mm de diamètre	6
Figure 4 : Schéma de l'effet de la densité apparente et de la texture de la barrière d'argile sur l'incursion racinaire (Leblanc et Cogliastro, 2013)	8
Figure 5 : Réponse des racines des plantules du pin noir d'Autriche (<i>Pinus nigra</i>) à une augmentation de la densité apparente ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) dans un sol sablo-limoneux (Zisa et collab., 1980)	8
Figure 6 : Réponse des racines des plantules du pin noir d'Autriche (<i>Pinus nigra</i>) à une augmentation de la densité apparente ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) dans un sol argilo-limoneux (Zisa et collab., 1980)	9
Figure 7 : Schéma a) longitudinal et b) transversal du dispositif expérimental de l'étude effectuée à Waterford, en Angleterre (DCLG, 2008).....	11
Figure 8 : Distribution racinaire en fonction de l'épaisseur du sol mesurée en 1997 et en 2002 (bi, horizon 0-1,3 m en 1997; bii, horizon 0-1,3 m en 2002) (DCLG, 2008).....	12

1. MISE EN CONTEXTE

Dans le traitement des dossiers de terrains contaminés ayant recours à l'analyse de risque¹, lorsque l'évaluation des risques démontre que les sols contaminés qui seront laissés en place présentent un risque potentiel pour les récepteurs écologiques ou pour la population, le ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC) requiert qu'un recouvrement de confinement constitué de sols propres, c'est-à-dire respectant les critères A du *Guide d'intervention – Protection des sols et réhabilitation des terrains contaminés* (Beaulieu, 2016), d'une épaisseur minimale d'un mètre soit mis en place au-dessus des sols contaminés dans les zones destinées à être ensuite végétalisées (MDDEP, 2008). Dans ce contexte, le Groupe technique d'évaluation (GTE)² recommande que ces sols propres soient végétalisés, à la condition toutefois que les racines des arbres et des arbustes qui y sont plantés ne dépassent pas un mètre à maturité. C'est à cette condition que les plans de réhabilitation des terrains prévoyant le maintien de contaminants sur place sont acceptés par le GTE. Cette mesure permet de limiter la pénétration des racines dans les sols contaminés situés sous le mètre de sols propres.

Plusieurs objectifs sont visés par la mise en place de cette mesure de confinement :

1. réduire le risque d'absorption potentielle des contaminants présents dans le sol contaminé, situé sous le mètre de sols propres, par les racines des végétaux;
2. limiter le transport des contaminants présents dans le sol contaminé, situé sous le mètre de sols propres, vers les parties aériennes des végétaux;
3. réduire le risque d'effets négatifs sur les végétaux par les contaminants présents dans le sol contaminé, situé sous le mètre de sols propres, tels que certains métaux qui sont phytotoxiques. À titre d'exemple, les métaux pris en charge par les racines peuvent inhiber leur croissance, en interférant avec le processus de division cellulaire (Hagemeyer et Breckle, 2002, cité dans Day et collab., 2010). Le plomb, par exemple, ralentit la formation des poils absorbants chez le hêtre commun (*Fagus sylvatica*) à une concentration de 44 mg/kg, alors que celle-ci est complètement inhibée à 283 mg/kg (Kahle, 1993). Bien qu'une réduction de la densité des poils absorbants soit une réponse adaptative pour diminuer l'absorption des métaux, cette modification physiologique nuit également à l'absorption des éléments nutritifs et de l'eau. Dans d'autres cas, l'absorption des nutriments peut être réduite en raison de la concurrence directe avec celle des métaux (Day et collab., 2010). Ces effets négatifs mèneront ultimement à des effets directs sur les parties supérieures des végétaux;
4. réduire le risque de transfert des contaminants présents dans le sol contaminé, situé sous le mètre de sols propres, vers les espèces herbivores, de même que leurs effets négatifs sur ces organismes;
5. réduire la remise en circulation des contaminants le long de la chaîne alimentaire.

¹ En vertu des articles 31.45, 31.55 et 31.57 de la Loi sur la qualité de l'environnement (LQE), un plan de réhabilitation soumis au MDDELCC par le responsable d'un terrain contaminé peut prévoir le maintien dans le terrain de contaminants excédant les valeurs limites réglementaires, à la condition d'être accompagné d'une évaluation des risques toxicologiques et écotoxicologiques ainsi que des impacts sur les eaux souterraines.

² Le GTE est un groupe d'experts spécialisés dans l'analyse de risque relevant à la fois du MDDELCC et du ministère de la Santé et des Services sociaux (MSSS) qui a pour mandat d'approuver les plans de réhabilitation de terrains contaminés se prévalant de la procédure d'évaluation du risque prévue par la LQE (articles 31.45, 31.55 et 31.57).

Pour permettre la végétalisation de ces sols de confinement, il convient de définir les espèces dont le système racinaire ne dépasse pas un mètre de profondeur à maturité, profondeur qui dépend non seulement de l'espèce, mais aussi de la nature du sol, de sa texture, de sa teneur en nutriments et de celle en matière organique. C'est l'objet du présent document. La section 2 décrit les modalités de développement d'un système racinaire et les facteurs environnementaux qui influent sur la profondeur atteinte par les racines. La section 3 présente les espèces d'arbres et d'arbustes à utiliser pour la végétalisation des terrains réhabilités par analyse de risque, tandis que la section 4 présente des mesures de confinement additionnelles qui pourraient être mises en place afin que, dans certains cas, la plantation de l'ensemble des espèces soit acceptée. Il convient de noter que la sélection de ces arbres et arbustes est basée sur les données actuellement disponibles quant au type de racine produite par ces végétaux et sur les profondeurs moyenne et maximale de leur enracinement.

2. DÉVELOPPEMENT DU SYSTÈME RACINAIRE

2.1 Système racinaire

Le système racinaire des végétaux est complexe et difficile à étudier, surtout chez des arbres matures, les racines étant difficiles d'accès et occupant inévitablement un grand volume sous la surface du sol. Les études sur le développement racinaire ont donc été réalisées, pour la majorité, soit à partir de fosses creusées à proximité d'arbres, pour avoir accès aux racines (Robinson et Handel, 1995; Hutchings et collab., 2001; DCLG, 2008), soit à partir du compte et de la mesure des racines d'arbres renversés à la suite de conditions climatiques particulières (Gasson et Cutler, 1990; Gibbs et Greig, 1990).

Les racines des arbres et des arbustes assurent leur ancrage dans le sol, l'absorption d'eau et de minéraux, le transport de la sève et le stockage de matière nutritive. Elles peuvent être grossièrement divisées en deux grandes catégories :

- les racines ligneuses qui forment la structure du système racinaire et assurent l'ancrage ainsi que le support de la plante;
- les racines non ligneuses, souvent appelées « racines nourricières », « racines fines » ou « racines absorbantes », qui ont pour principale fonction d'absorber l'eau et les éléments minéraux.

Les racines ligneuses descendantes croissent en profondeur jusqu'à ce qu'elles rencontrent un obstacle (couche indurée, horizon compacté, roche mère, etc.). Leur diamètre varie selon l'espèce et l'âge de l'arbre. Il peut atteindre 30 cm ou plus. Il existe également des racines ligneuses latérales qui se développent à partir des racines descendantes. C'est sur celles-ci que les racines non ligneuses prennent leur origine. Elles croissent à l'horizontale dans les 60 premiers cm de sol (Perry et collab., 1987; Perry, 1989) et leur diamètre peut atteindre 0,1 m (Drénou, 2016). Les racines ligneuses qui pénètrent les horizons profonds portent peu de racines fines (Drénou, 2016).

Il est courant de regrouper les espèces en fonction de leur système racinaire, qui est dit pivotant, fasciculé ou traçant (figure 1). Le système pivotant correspond au développement prédominant de la racine principale, autant en largeur qu'en profondeur. Il forme ainsi un pôle à partir duquel d'autres racines poussent latéralement. Ce système, fréquent chez les dicotylédones, a tendance à favoriser un enracinement en profondeur, le pivot s'enfonçant à la verticale pour permettre à la plante de s'ancrer fermement dans le sol. Le système racinaire

fasciculé, fréquent chez les monocotylédones, présente un faisceau de racines à la base de la tige ou des racines latérales de même dimension que la racine principale. Ces racines sont non ramifiées. Le système racinaire traçant présente une racine principale peu développée, avec des racines latérales à extension horizontale et à faible profondeur. Les peupliers et les résineux adoptent ce système dans des conditions édaphiques et climatiques difficiles. Cette classification statique est cependant réductrice, car un même arbre peut passer d'une classe à l'autre au cours de son développement. En effet, après la germination, il est courant que les espèces d'arbres des régions tempérées émettent d'abord un pivot vertical, qui produit ensuite un nombre important de racines latérales, en particulier dans les horizons de surface (Weber et Matteck, 2005, cité dans Danjon et Fourcaud, 2009). Pour certaines espèces, telles que les peupliers (*Populus* spp.), les saules (*Salix* spp.), le frêne commun (*Fraxinus excelsior*) et l'érable sycomore (*Acer pseudoplatanus*), le pivot est détectable seulement pendant quelques années, après la germination. Au fur et à mesure que les arbres vieillissent, le pivot devient alors méconnaissable ou très petit par rapport au reste du système racinaire. De ce fait, le pivot peut servir temporairement d'ancrage, le temps que les racines latérales se développent suffisamment. Chez d'autres espèces, comme les chênes (*Quercus* spp.), les pins (*Pinus* spp.) et le sapin commun (*Abies alba*), le pivot se développe seulement lorsque les conditions du sol le permettent. Notons également qu'en milieu urbain, seule une minorité d'arbres développe une racine pivotante (Sutton, 1980; Perry, 1989; Cutler et collab., 1990; Gilman, 1990).

Contrairement aux arbres issus d'ensemencement naturel, où le pivot est présent de façon quasi systématique, les arbres provenant des pépinières produisent très rarement un pivot, car celui-ci est généralement coupé directement sur place, avant d'être planté (Gilman, 1990). Après la transplantation dans un sol convenable, plusieurs petits « pivots » peuvent cependant, selon les conditions, se développer depuis les restes du pivot original. L'analyse de 4 511 arbres déracinés par le vent après une tempête survenue en octobre 1987 a montré que seulement 2,4 % d'entre eux possédaient des racines pivotantes (Cutler et collab., 1990).

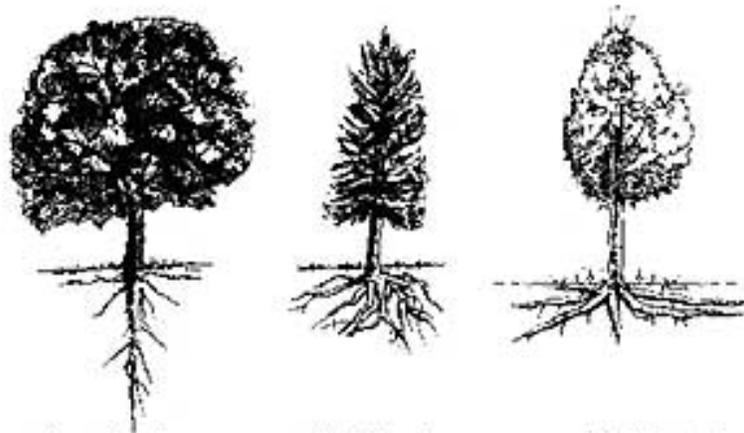


Figure 1 : Exemples de systèmes racinaires : pivotant, fasciculé ou traçant

2.2 Profondeurs des racines

La pénétration des racines d'arbres et d'arbustes dans les sols est très variable, l'architecture des systèmes racinaires étant d'abord déterminée par la génétique des différentes espèces (Atger et Edelin, 1994).

Pour que l'arbre soit en mesure de répondre aux différents stress environnementaux, il est important que ses racines pénètrent profondément le sol (Puhe, 2003). En l'absence de conditions qui restreignent leur progression, les espèces produisent d'ailleurs naturellement des racines profondes (Perry, 1982; Stone et Kalisz, 1991; Moffat, 1995; Handel et collab., 1997). Par exemple, chez les espèces implantées dans des sols non perturbés, la profondeur des racines peut atteindre 3 m chez une épinette blanche (*Picea glauca*) âgée de 180 ans, 4,8 m chez un chêne à gros fruits (*Quercus macrocarpa*) âgé de 80 ans, 2,7 m chez un frêne rouge (*Fraxinus pennsylvanica*) âgé de 45 ans et 1,5 m chez un peuplier faux-tremble (*Populus tremuloides*) âgé de 80 ans (Stone et Kalisz, 1991). Cannon (1960) rapporte que des racines d'une espèce de genévrier (*Juniperus monosperma*) poussant sur des sites miniers ont atteint une profondeur de 61 m ou plus.

Canadell et ses collaborateurs (1996), qui ont effectué une revue de littérature sur la profondeur d'enracinement maximale de 253 espèces ligneuses et herbacées, mentionnent que 194 espèces avaient des racines d'au moins 2 m de profondeur, 50 espèces avaient des racines d'une profondeur de 5 m ou plus et 22 espèces avaient des racines aussi profondes que 10 m ou plus. Les dix espèces dont l'enracinement était le plus profond étaient les suivantes, par ordre décroissant : *Boscia albitrunca* (68 m), *Acacia erioloba* (60 m), *Prosopis juliflora* (53 m), *Eucalyptus marginata* (40 m), *Retama raetam* (20 m), *Tamarix aphylla* (20 m), *Andira humilis* (18 m), *Alhagi maurorum* (15 m), *Prosopis farcta* (15 m) et *Prosopis glandulosa* (15 m). L'étude des différents écosystèmes a démontré que la profondeur d'enracinement maximale était de $2,0 \pm 0,3$ m pour la forêt boréale, de $2,1 \pm 0,2$ m pour les terres cultivées, de $9,5 \pm 2,4$ m pour le désert, de $3,9 \pm 0,4$ m pour la forêt de conifères tempérée, de $2,9 \pm 0,2$ m pour la forêt de feuillus tempérée, de $2,6 \pm 0,2$ m pour les prairies tempérées, de $3,7 \pm 0,5$ m pour la forêt tropicale à feuilles caduques, de $7,3 \pm 2,8$ m pour la forêt tropicale à feuilles persistantes, de $15,0 \pm 5,4$ m pour les prairies tropicales et la savane et de $0,5 \pm 0,1$ m pour la toundra (figure 2). Le regroupement de toutes les espèces en trois groupes fonctionnels de base (arbres, arbustes et herbacées) montre que la profondeur d'enracinement maximale était de $7,0 \pm 1,2$ m pour les arbres, de $5,1 \pm 0,8$ m pour les arbustes et de $2,6 \pm 0,1$ m pour les plantes herbacées.

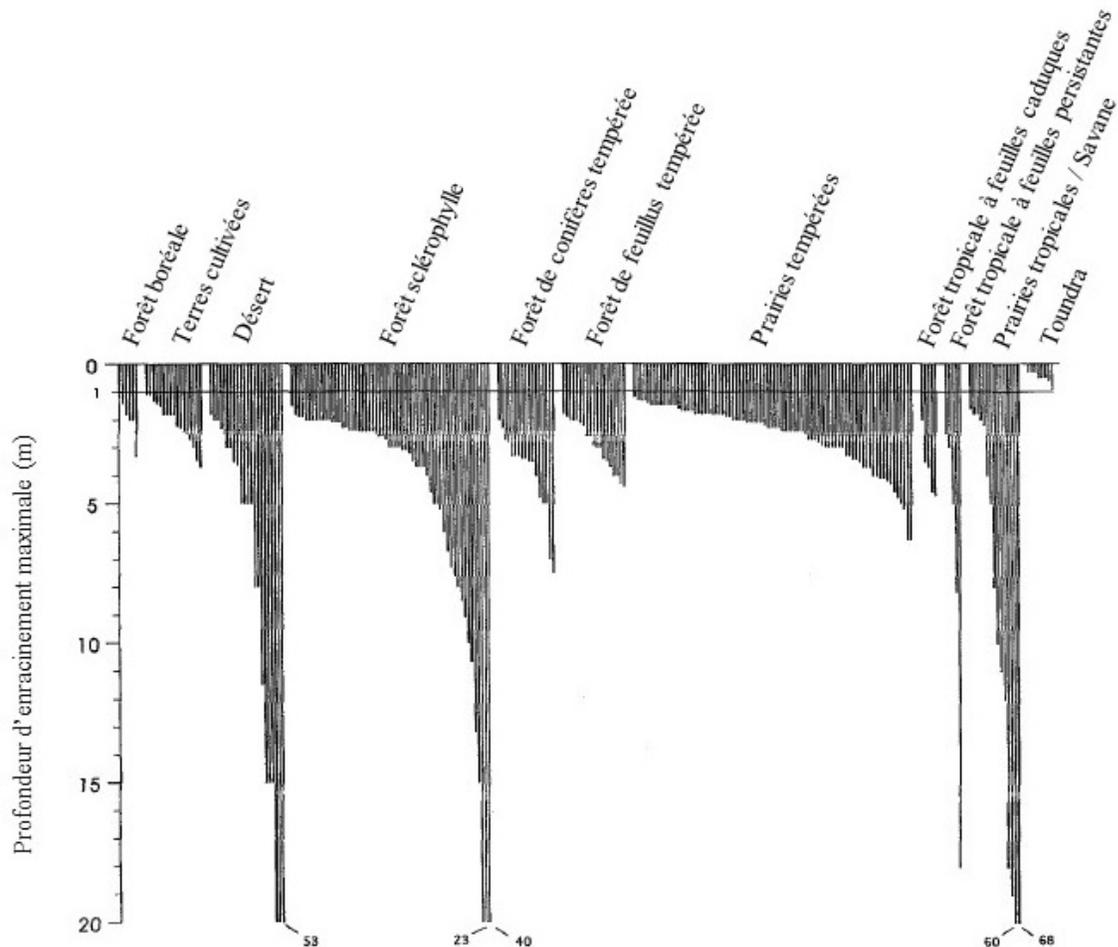


Figure 2 : Profondeur d'enracinement maximale chez différentes espèces végétales, en fonction de l'écosystème (Canadell et collab., 1996)

Toutes ces données montrent que la mise en place de racines profondes est très fréquente chez les espèces ligneuses et herbacées, et ce, dans la plupart des écosystèmes terrestres. Toutefois, la majorité des études s'accordent pour reconnaître que la plus grande proportion du système racinaire des arbres de climat tempéré est superficielle, ce qui correspond généralement aux deux premiers mètres de sol (Lyford, 1964; Atkinson, 1980; Perry, 1982; Perry, 1989; Schnelle, 1989; Dobson et Moffat, 1995; Canadell et collab., 1996). La limite d'enracinement des arbres de l'Europe, du nord des États-Unis et du Canada est d'environ 1 à 1,5 m (Stone et Kalisz, 1991). Les données tirées d'une enquête sur 3 500 arbres déracinés après une violente tempête survenue dans le sud de l'Angleterre en 1987 soutiennent cette affirmation (Gasson et Cutler, 1990). En effet, cette étude a montré que 44 % des racines des arbres avaient moins de 1 m de profondeur et que 95 % avaient moins de 2 m de profondeur (tableau 1). Enfin, à titre d'exemple, selon les résultats de Lucot et Bruckert (1992), 80 % de la densité racinaire du chêne pédonculé (*Quercus robur*) se trouve dans les 60 premiers cm de sol. De même, la grande majorité des racines de l'érable à sucre (*Acer saccharum*) se trouvent dans les 30 premiers cm de sol (Lajeunesse, 1990). De plus, le nombre et le diamètre des racines tendent à diminuer avec la profondeur (figure 3). Dans l'étude de Dobson et Moffat (1995), en dessous d'environ 1 m, le diamètre des racines a diminué à un tel point qu'il était rare de trouver des racines de plus de 1 à 3 mm de diamètre.

Tableau 1: Profondeur maximale des racines d'arbres déracinés à la suite d'une tempête en Angleterre en 1987 (Gasson et Cutler, 1990)

Nom latin	Nom commun	Nombre total d'arbres analysés	Profondeur maximale des racines (m)
<i>Fraxinus</i> spp.	Frênes	31	0,75 – 2,80
<i>Fagus</i> spp.	Hêtres	103	0,10 – 2,80
<i>Betula</i> spp.	Bouleaux	32	0,10 – 3,00
<i>Castanea</i> spp.	Châtaigniers	24	0,20 – 2,19
<i>Cupressus</i> spp.	Cyprès	14	0,65 – 1,81
<i>Abies</i> spp.	Sapins	14	0,25 – 2,17
<i>Carpinus</i> spp.	Charmes	20	0,50 – 2,10
<i>Larix</i> spp.	Mélèzes	24	0,30 – 2,20
<i>Tilia</i> spp.	Tilleuls	26	0,12 – 2,60
<i>Acer</i> spp.	Érables	31	0,50 – 1,82
<i>Quercus</i> spp.	Chênes	145	0,30 – 2,05
<i>Pinus</i> spp.	Pins	32	0,40 – 3,00
<i>Populus</i> spp.	Peupliers	13	0,80 – 2,43
<i>Sorbus</i> spp.	Sorbiers	10	0,40 – 1,35
<i>Picea</i> spp.	Épinettes	46	0,30 – 2,14

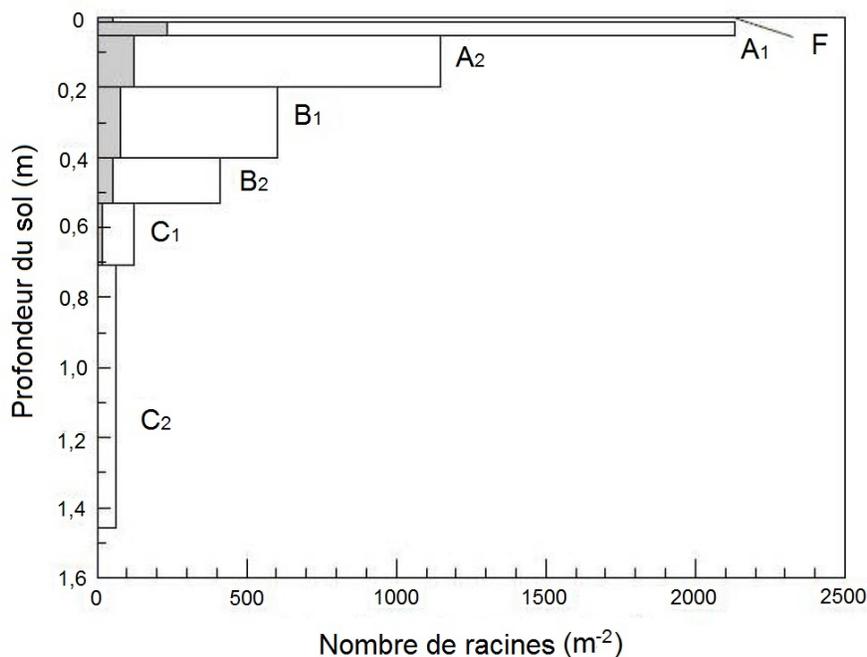


Figure 3 : Distribution des racines du pin blanc (*Pinus strobus*) dans les horizons d'un sol limoneux naturel (chaque lettre désigne un horizon différent) (Dobson et Moffat, 1995, selon les données de Lutz et collab., 1937). Bande grise, racines > 1 mm de diamètre; bande blanche, racines < 1 mm de diamètre

La profondeur d'enracinement maximale d'un arbre ou d'un arbuste dépend de plusieurs facteurs, les caractéristiques du sol jouant un rôle prépondérant dans la distribution des racines (Lutz et collab., 1937; Atkinson, 1980; Perry, 1982; Perry, 1989; Stone et Kalisz, 1991; Sutton, 1991; Zisa et collab., 1980; Canadell et collab., 1996). Parmi les caractéristiques du sol, celles qui sont considérées comme déterminantes dans la distribution racinaire sont la texture du sol (proportion d'argile, de sable et de limon), le degré de compaction (densité apparente), la teneur en eau ainsi que la disponibilité de l'oxygène et des éléments nutritifs (Zisa et collab., 1980; Stone et Kalisz, 1991). Ces aspects sont présentés dans les paragraphes suivants.

La compaction du sol est mesurée par la densité apparente, qui correspond au poids par unité de volume du sol sec (g cm^{-3}). Son effet sur la croissance racinaire d'un arbre ou d'un arbuste a largement été étudié; tous les résultats ont démontré que la croissance racinaire diminue avec l'augmentation de la densité apparente du sol (Atkinson, 1980; Zisa et collab., 1980; Gilman, 1990; Hutchings et collab., 2001). Par exemple, dans les sols argileux, où la densité du matériau est très élevée, les racines ne pénètrent que dans les fissures ou dans les traces d'anciennes racines en voie de décomposition (Atger, 1994). À l'inverse, en sol sableux et drainé, à faible densité apparente, le système racinaire est développé en surface avec des pivots profonds (Atger, 1994).

La densité apparente limitant la pénétration des racines varie selon les espèces, le taux d'humidité et la texture du sol (Gerard et collab., 1982; Jones, 1983; Sutton, 1991; Taylor et collab., 1966; Vepraskas, 1988). Les racines poussant dans des zones compactées peuvent être jusqu'à 70 % plus courtes que celles d'un sol non compacté, en plus d'être plus épaisses (Montagu et collab., 2001; Kirby et Bengough, 2002). La compaction peut même contraindre les pivots à pousser à l'horizontale (Atger, 1994). Grabosky et ses collaborateurs (1996) ont montré que la pénétration des racines du chêne pédonculé (*Quercus robur*) dans un sol argilo-limoneux était réduite lorsque la densité apparente passait de 1,24 à 1,55 g cm^{-3} . Une étude réalisée dans la plaine côtière du golfe du Mexique portant sur l'effet de la compaction du sol sur la croissance de la régénération du pin à l'encens (*Pinus taeda*) a démontré que lorsque la densité apparente passe de 1,41 à 1,51 g cm^{-3} , la croissance du pin, en hauteur et en diamètre, était réduite de façon significative (Carter et collab., 2006). De même, Heilman (1981) a démontré que la pénétration des racines du sapin de Douglas (*Pseudotsuga menziesii*) diminue de façon linéaire lorsque la densité apparente passe de 1,37 à 1,74 g cm^{-3} , alors qu'elle est complètement inhibée lorsque la densité apparente est de l'ordre de 1,74 à 1,83 g cm^{-3} . Faulkner et Malcolm (1972) ont pour leur part constaté que la pénétration des racines du pin sylvestre (*Pinus sylvestris*) était limitée lorsque la densité apparente du sol était de l'ordre de 1,40 à 1,67 g cm^{-3} .

D'après ces données, la densité apparente critique empêchant la pénétration des racines varie de 1,60 à 1,80 g cm^{-3} (Dobson et Moffat, 1995; Grabosky, 1996; Heilman, 1981; Tuttle et collab., 1988). Lorsque la densité apparente augmente et atteint une valeur égale ou supérieure à 1,8 g cm^{-3} , elle aurait pour effet de créer une barrière difficilement franchissable dans le sol (figure 4). Quand les racines rencontrent une telle barrière, elles ont tendance à plier ou à se ramifier abondamment et continuent à pousser à l'horizontale au-dessus de cette barrière (Coutts, 1989; Robinson et Handel, 1995; Montagu et collab., 2001; DCLG, 2008).

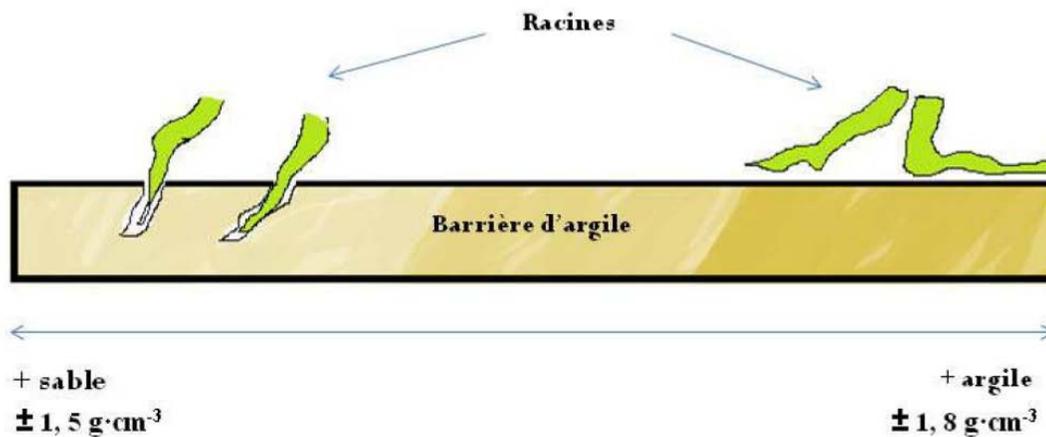


Figure 4 : Schéma de l'effet de la densité apparente et de la texture de la barrière d'argile sur l'incursion racinaire (Leblanc et Cogliastro, 2013)

Comme précisé précédemment, la densité apparente d'un sol dépend de la texture du sol. De façon générale, les sols sableux ont une densité apparente plus faible que ceux qui contiennent une grande proportion d'argile ou de limon (Munshower, 1994). Zisa et ses collaborateurs (1980) ont démontré qu'un sol sablo-limoneux d'une densité apparente de $1,8 \text{ g cm}^{-3}$ peut empêcher la pénétration racinaire d'arbres en régénération (figure 5), alors que cette valeur est de $1,4 \text{ g cm}^{-3}$ dans un sol argilo-limoneux (figure 6). Les sols sableux sont donc plus susceptibles de favoriser la croissance des racines en profondeur, puisqu'ils offrent moins de résistance.

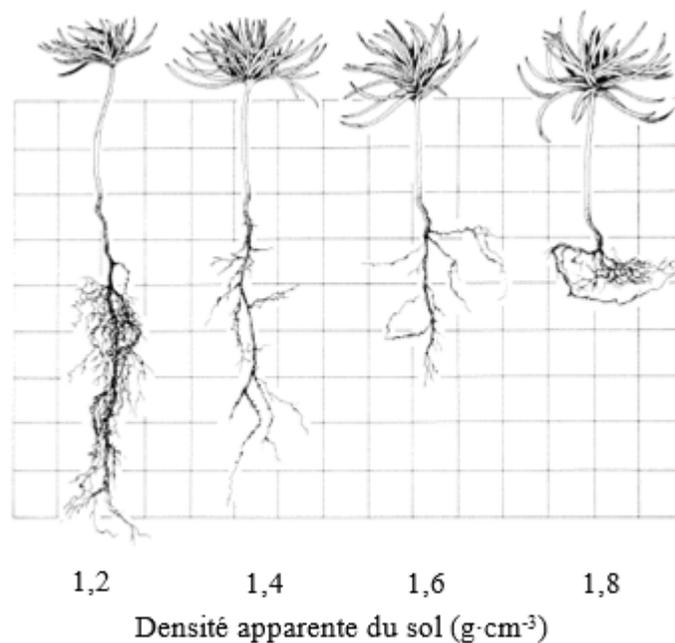


Figure 5 : Réponse des racines des plantules du pin noir d'Autriche (*Pinus nigra*) à une augmentation de la densité apparente (g cm^{-3}) dans un sol sablo-limoneux (Zisa et collab., 1980)

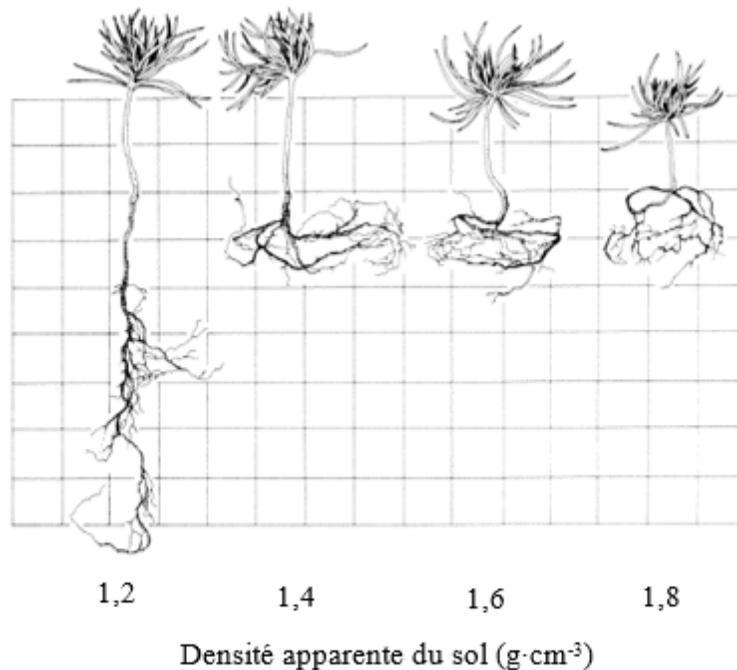


Figure 6 : Réponse des racines des plantules du pin noir d'Autriche (*Pinus nigra*) à une augmentation de la densité apparente (g cm^{-3}) dans un sol argilo-limoneux (Zisa et collab., 1980)

La porosité d'un sol est une caractéristique qui influence fortement le développement du système racinaire d'un arbre ou d'un arbuste. Elle correspond au volume de sol occupé par des pores remplis d'air, de gaz ou d'eau. Elle est souvent sujette à des modifications lorsque les sols sont compactés (De Paul et Bailly, 2005). Dans des sols compacts et à texture fine, comme ceux qui forment une barrière d'argile, la porosité effective (porosité de drainage) est faible, ce qui réduit le taux d'oxygène et la quantité d'eau disponibles pour les racines. De telles conditions ont pour conséquence de limiter la pénétration des racines dans le sol. Or, d'après Meyer et ses collaborateurs (1985), pour croître, les racines ont besoin d'un volume de sol offrant minimalement 10 % de porosité.

L'oxygénation du sol est également un facteur déterminant dans la croissance racinaire d'un arbre ou d'un arbuste. Les racines de la grande majorité des espèces ligneuses de climat tempéré sont incapables de croître dans un sol où l'apport d'oxygène est limité pour la respiration. Lorsque l'oxygène tombe en dessous de 10 à 15 % dans un sol, la capacité de croître et de pénétrer dans le sol de la plupart des racines diminue, alors qu'elle est complètement inhibée à un apport d'oxygène de 3 à 5 % (Crow, 2005). Ces conditions se produisent lorsque l'air dans la couche de sols est remplacé par des sols (phénomène de compaction), de l'eau ou certains gaz (dioxyde de carbone, sulfure d'hydrogène ou méthane). La mise en place d'un recouvrement, par exemple une couche d'asphalte, peut aussi réduire les concentrations d'oxygène dans le sol à des valeurs inférieures à 3 % (Crow, 2005). Les sols qui ne sont pas bien aérés contiennent des racines qui sont plus épaisses, plus courtes, déformées et qui produisent moins de poils absorbants. Notons que certaines espèces ont développé des stratégies pour faire face à des concentrations réduites en oxygène, ce qui les rend plus tolérantes aux conditions anaérobiques. C'est le cas notamment des saules (*Salix* spp.), des peupliers (*Populus* spp.), des aulnes (*Alnus* spp.), des frênes rouges et noirs (*Fraxinus pennsylvanica* et *F. nigra*) et de l'érable argenté (*Acer saccharinum*) (Hightshoe, 1987).

La disponibilité de l'eau est un autre facteur qui peut influencer la distribution racinaire d'un arbre ou d'un arbuste. Les racines se développent vers le bas jusqu'à ce qu'elles atteignent une zone où l'oxygène est limité (Gilman, 1990). S'il y a un excès d'eau dans un sol mal drainé (engorgement en eau), des conditions d'anaérobiose seront créées; cette situation peut mener à la mort des racines, ce qui compromet la survie et la croissance des arbres. L'exigence des arbres en ce qui a trait à la profondeur de la nappe phréatique varie selon les essences, mais aussi en fonction des conditions du milieu (Wouters, 1999). Par exemple, Laitakari (1935, cité dans Dobson et Moffat 1995) a montré que le bouleau verruqueux (*Betula pendula*) a le potentiel de produire des racines à une profondeur d'au moins 4 m dans des sols bien drainés, alors que dans des sols marécageux gorgés d'eau, le système racinaire se restreint à la partie supérieure des sols, c'est-à-dire aux 40 premiers cm. Autre exemple : les systèmes racinaires du peuplier noir (*Populus nigra*) et du saule blanc (*Salix alba*) sont pivotants en milieu bien drainé, alors qu'ils sont traçants si l'eau affleure en surface (Foussadier, 1998). Dans les sols inondés, mal drainés et mal oxygénés, les racines ont donc un développement superficiel et leur pénétration verticale est limitée (Kazarjan, 1969, cité dans Drouineau et collab., 2000). Certaines espèces privilégient l'extension de leur système racinaire latéral, tandis que d'autres, particulièrement les espèces de milieux arides, produisent des racines profondes pour maximiser l'interception de l'eau présente dans le sol (Canadell et collab., 1996). La biomasse des racines fines est d'ailleurs généralement beaucoup plus grande dans les sols qui sont très secs, car les racines prospectent un grand volume de sol pour obtenir l'eau nécessaire à la croissance (Persson, 1983). Il en est de même dans les sols peu fertiles. Les racines étant incapables de croître activement vers une source de nutriments, elles prolifèrent jusqu'à ce qu'elles entrent en contact avec des zones particulièrement riches en azote et en phosphore (Crow, 2005).

La compétition entre les racines de différentes espèces d'arbres représente également un facteur qui a un effet sur la distribution racinaire (Schenk, 2006). Cette situation peut entraîner la diminution de la disponibilité des ressources en eau et en nutriments du sol. Les systèmes racinaires des espèces plus compétitives ont tendance à se concentrer à la surface du sol. C'est le cas des espèces opportunistes qui colonisent rapidement les sites (ex. : peupliers, saules, frênes) et qui obligent les espèces voisines à produire des racines plus profondes. La coupe d'arbres voisins conduit dans ces cas à une nette amélioration de la croissance des racines (Kazarjan, 1969, cité dans Drouineau et collab., 2000).

2.3 Étude de cas

La présente section décrit une étude qui s'est échelonnée sur 16 ans (de 1986 à 2002) et qui a porté sur le développement racinaire de quatre espèces ligneuses arborescentes (frêne commun ou *Fraxinus excelsior*, aulnes ou *Alnus* spp., érable de Norvège ou *Acer plantanoides* et pin noir ou *Pinus nigra*) sur un site d'enfouissement situé à Waterford, en Angleterre (DCLG, 2008). Il s'agit ici de présenter un cas concret de croissance racinaire sur un site en cours de réhabilitation.

En vue d'avoir un volume de sol adéquat pour la plantation, des crêtes de sol de plantation d'environ 30 m de large, de 1,5 m de haut en leur centre, se réduisant graduellement en hauteur vers la marge de la crête, ont été formées au-dessus d'une barrière minérale en argile (figure 7). Les arbres ont été plantés tous les 2 m tout au long de la crête, à différentes épaisseurs de sol de plantation (profondeur d'environ 1,3 m au sommet de la crête, de 1,0 m à mi-pente de la crête et de 0,6 m au pied de la crête; figure 7b). Le suivi des arbres a ensuite permis de déterminer l'effet des racines sur l'intégrité de la barrière minérale.

Un nombre équivalent d'arbres a été sélectionné et étudié en 1997 et en 2002 pour analyser leur développement racinaire. L'architecture du système racinaire de chaque individu a été observée à l'aide de fosses creusées au-dessus de la barrière minérale, à une distance de 1,5 m de l'arbre. Seuls les résultats obtenus chez les arbres bénéficiant d'une profondeur maximale de 1,3 m sont présentés ici, et ce, pour démontrer le fait que la longueur des racines des arbres peut dépasser 1 m.

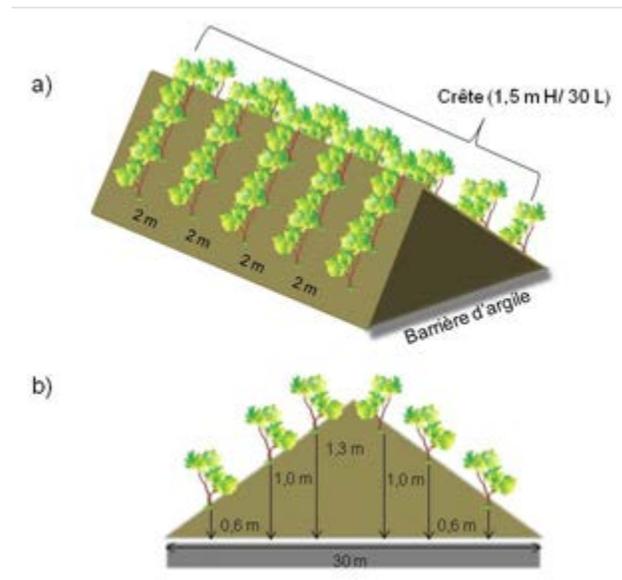


Figure 7 : Schéma a) longitudinal et b) transversal du dispositif expérimental de l'étude effectuée à Waterford, en Angleterre (DCLG, 2008)

L'étude montre qu'après 16 ans de suivi, les racines étaient encore en développement et continuaient de croître en profondeur. Le nombre de racines qui approchaient la couche d'argile augmentait au fil des ans. La majorité des racines (55 %) se trouvaient dans les 30 premiers cm en 1997, alors que la répartition des racines était plus uniforme entre les différentes strates de sol, c'est-à-dire entre 0 et 1,3 m de profondeur, en 2002 (figure 7). De plus, en 1997, moins de 5 % des racines se trouvaient à une profondeur supérieure à 1 m, alors que ce pourcentage était proche de 25 % en 2002. L'examen de la distribution racinaire dans le sol de plantation et la barrière d'argile a permis de démontrer qu'une épaisseur de sol de plantation de 1,5 m est suffisante pour que près de 98 % des racines d'arbres de 16 ans demeurent au-dessus de la barrière. Selon les résultats statistiques, l'espèce d'arbre et le nombre total de racines par arbre n'ont pas eu d'effet sur le nombre de racines dans la barrière. Notons que les racines ayant pénétré la barrière d'argile le faisaient sur de courtes distances, la profondeur moyenne de la racine dans la barrière étant de 3 cm. Cette pénétration était localisée dans les zones moins compactes de la barrière ou au niveau de fissures causées par une construction inadéquate de la barrière. La densité apparente de la barrière où les racines ont réussi à pénétrer était habituellement de l'ordre de 1,5 à 1,6 g cm⁻³.

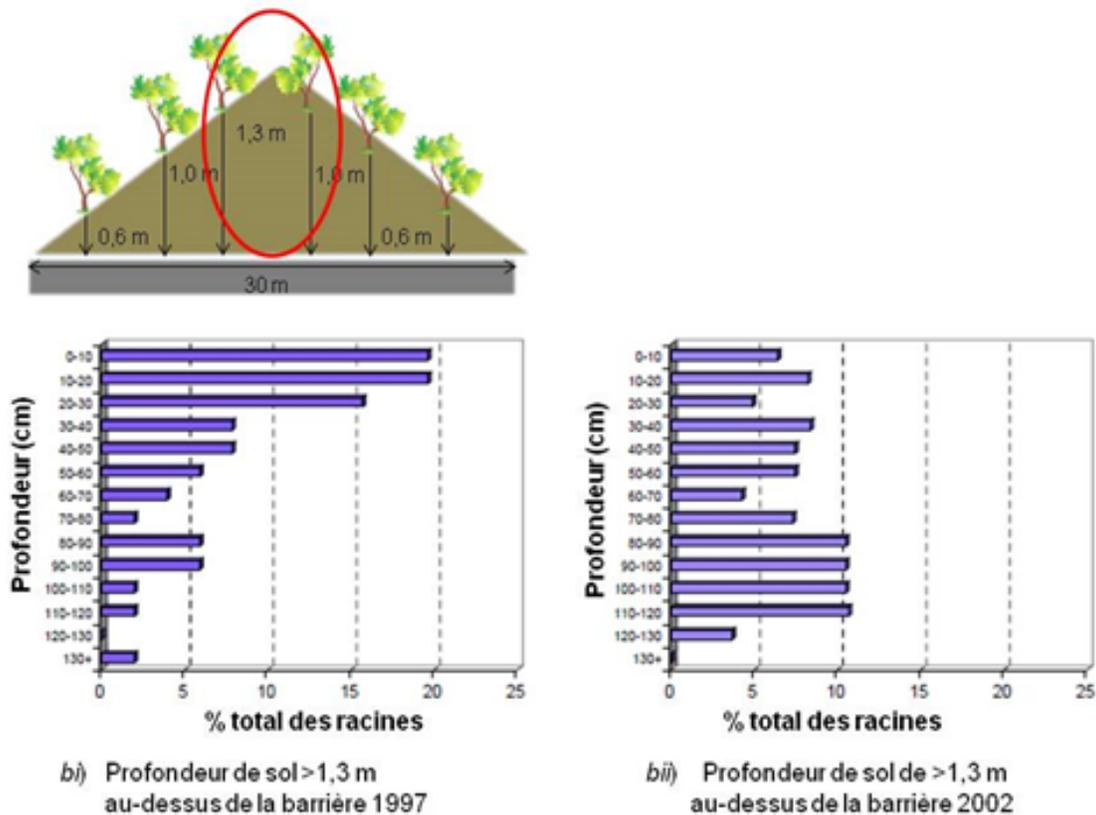


Figure 8 : Distribution racinaire en fonction de l'épaisseur du sol mesurée en 1997 et en 2002 (bi, horizon 0-1,3 m en 1997; bii, horizon 0-1,3 m en 2002) (DCLG, 2008)

Cette étude a mis en évidence qu'une barrière d'argile est une mesure efficace pour bloquer la croissance des racines en profondeur, pourvu que la densité apparente de cette couche soit supérieure à $1,8 \text{ g cm}^{-3}$. Par ailleurs, même si cette étude ne portait pas sur la capacité des racines à croître en profondeur, elle montre que les racines des arbres peuvent pénétrer à des profondeurs supérieures à 1 m. Dans les cas où les sols sous-jacents sont contaminés, la sélection des espèces et la mise en place de mesures de confinement sont donc importantes si l'on veut éviter la mobilisation des contaminants par les végétaux.

3. ARBRES ET ARBUSTES SÉLECTIONNÉS POUR LA VÉGÉTALISATION D'UN TERRAIN RÉHABILITÉ PAR ANALYSE DE RISQUE

Comme démontré dans la section précédente, la majeure partie des racines se situe dans les deux premiers mètres de sol. De plus, la plupart des espèces peuvent produire des racines pouvant aller jusqu'à plusieurs mètres de profondeur, en fonction de la nature du sol, de sa texture ainsi que de sa teneur en nutriments, en eau et en oxygène. Étant donné que la surface des sols des écosystèmes tempérés (les sols du sud du Québec par exemple) offre généralement une bonne disponibilité en eau et en nutriments ainsi qu'un milieu peu compact et généralement aéré, la plupart des espèces que l'on trouve au Québec ont vraisemblablement la capacité de développer un système racinaire à une profondeur supérieure à un mètre.

Les espèces d'arbres et d'arbustes dont les racines ne dépassent pas un mètre à maturité et qui peuvent donc être utilisées pour végétaliser un terrain réhabilité où des contaminants sont laissés en place sous une couche de sols propres (\leq critères A du *Guide d'intervention – Protection des sols et réhabilitation des terrains contaminés* (Beaulieu, 2016)) tout comme les espèces qui ne doivent pas être utilisées pour végétaliser ces types de terrains sont présentées dans les tableaux 2 à 6.

Tableau 2 : Conifères indigènes du Québec à utiliser ou à proscrire pour la végétalisation de terrains réhabilités par analyse de risque où des contaminants ont été laissés en place sous un recouvrement de confinement

Nom latin	Nom commun	Profondeur des racines (cm)		Commentaires
		Min.	Max.	
Espèces à utiliser lors de la réhabilitation de terrains contaminés par analyse de risque				
<i>Abies balsamea</i>	Sapin baumier	51	300	Enracinement superficiel. Les racines pénètrent rarement à plus de 75 cm sous la surface du sol, excepté dans les sols sableux.
<i>Larix laricina</i>	Mélèze laricin	30	120	Enracinement superficiel. Les racines pénètrent rarement à plus de 46 cm sous la surface du sol.
<i>Picea mariana</i>	Épinette noire	41	ND	Enracinement superficiel, notamment dans les sols organiques à nappe phréatique élevée. La majorité des racines se trouvent dans les 20 premiers cm de l'horizon de sol organique.
<i>Picea rubens</i>	Épinette rouge	33	56	Enracinement superficiel. La majorité des racines se trouvent dans la litière et les premiers centimètres de sol.
Espèces à proscrire lors de la réhabilitation de terrains contaminés par analyse de risque				
<i>Juniperus virginiana</i>	Genévrier de Virginie	51	760	Enracinement généralement superficiel, bien que des racines pouvant atteindre jusqu'à 7,6 m de profondeur aient été répertoriées chez des individus matures.
<i>Picea glauca</i>	Épinette blanche	76	300	Enracinement superficiel et ramifié, généralement à une profondeur de 90 à 120 cm. Les pivots peuvent cependant descendre jusqu'à 3 m de profondeur.
<i>Pinus banksiana</i>	Pin gris	51	290	Enracinement très étalé, assez profond. Dans les sols profonds et bien drainés, les racines des arbres matures peuvent atteindre une profondeur de 2,9 m.
<i>Pinus rigida</i>	Pin rigide	51	300	Racines profondes, atteignant jusqu'à 3 m de profondeur, capables de survivre et de se développer sous la nappe phréatique.
<i>Pinus resinosa</i>	Pin rouge	10	500	Enracinement plus ou moins profond et très étalé. Le pivot, lorsqu'il est présent, et les racines pivotantes secondaires peuvent atteindre de 2,7 à 5 m de profondeur.
<i>Pinus strobus</i>	Pin blanc	102	400	De 3 à 5 racines assez profondes, mais en général, elles sont dispersées et modérément profondes.

Nom latin	Nom commun	Profondeur des racines (cm)		Commentaires
		Min.	Max.	
<i>Thuja occidentalis</i>	Thuya occidental	76	ND	Enracinement très étalé, racines profondes lorsque le sol est bien drainé et peu profondes lorsque le sol est saturé.
<i>Tsuga canadensis</i>	Pruche du Canada	71	ND	Enracinement de très étalé et superficiel à modérément profond, en fonction du type de sol.

ND : donnée non disponible.

Tableau 3 : Feuillus indigènes du Québec à utiliser ou à proscrire pour la végétalisation de terrains réhabilités par analyse de risque où des contaminants ont été laissés en place sous un recouvrement de confinement

Nom latin	Nom commun	Profondeur des racines (cm)		Commentaires
		Min.	Max.	
Espèces à utiliser lors de la réhabilitation de terrains contaminés par analyse de risque				
<i>Acer pensylvanicum</i>	Érable de Pennsylvanie	71	ND	Enracinement superficiel et étalé.
<i>Amelanchier canadensis</i>	Amélanchier du Canada	51	ND	Enracinement superficiel, racines étendues et peu profondes.
<i>Amelanchier laevis</i>	Amélanchier glabre	76	ND	Enracinement superficiel, racines étendues et peu profondes, tendant à drageonner.
<i>Betula papyrifera</i>	Bouleau à papier	60	130	Enracinement superficiel, la majorité des racines se situant dans les 60 premiers cm de sol.
<i>Betula populifolia</i>	Bouleau gris	46	ND	Enracinement superficiel.
<i>Carpinus caroliniana</i>	Charme de Caroline	51	ND	Enracinement superficiel et étalé, système racinaire ligneux.
<i>Ostrya virginiana</i>	Ostryer de Virginie	41	ND	Enracinement superficiel. Par contre, si le dépôt est plus épais, les racines pénétreront plus en profondeur.
<i>Prunus pensylvanica</i>	Cerisier de Pennsylvanie	36	61	Système racinaire superficiel composé de plusieurs racines latérales, racines drageonnantes.
<i>Prunus serotina</i>	Cerisier tardif	60	120	Enracinement superficiel et très étalé. La majorité des racines sont concentrées dans les 60 premiers cm de sol. Quelques pivots secondaires se trouvent à une profondeur de 90 à 120 cm.
<i>Rhus typhina</i>	Sumac vinaigrier	51	ND	Enracinement superficiel et très étalé, racines drageonnantes.
<i>Salix arbusculoides</i>	Saule arbustif	30	ND	Enracinement superficiel.
<i>Salix bebbiana</i>	Saule de Bebb	41	ND	Enracinement superficiel, système racinaire dense et racines envahissantes.
<i>Salix discolor</i>	Saule discolore	51	ND	Enracinement superficiel et étalé.
<i>Salix eriocephala</i>	Saule à tête laineuse	51	ND	
<i>Salix exigua</i>	Saule de l'intérieur	51	ND	Enracinement superficiel, système racinaire étalé et drageonnant.
<i>Salix lucida ssp. lucida</i>	Saule brillant	25	ND	Enracinement superficiel et étalé.
<i>Salix nigra</i>	Saule noir	81	ND	Enracinement superficiel et étalé, système racinaire dense et envahissant.

Nom latin	Nom commun	Profondeur des racines (cm)		Commentaires
		Min.	Max.	
Espèces à proscrire lors de la réhabilitation de terrains contaminés par analyse de risque				
<i>Acer negundo</i>	Érable à feuilles composées	102	400	Enracinement superficiel, mais une racine pivotante apparaît parfois dans les sols profonds.
<i>Acer nigrum</i>	Érable noir	76	ND	Enracinement profond et étalé, système racinaire ligneux.
<i>Acer rubrum</i>	Érable rouge	25	300	Système racinaire généralement superficiel et étalé, constitué d'un pivot et de racines latérales. Le développement du système racinaire dépend du type de sol.
<i>Acer saccharinum</i>	Érable argenté	81	330	Système racinaire superficiel, fibreux et étalé, racines envahissantes.
<i>Acer saccharum</i>	Érable à sucre	102	370	Enracinement relativement profond et étalé.
<i>Betula alleghaniensis</i>	Bouleau jaune	76	150	Enracinement généralement superficiel et étalé, mais variable. Les racines latérales peuvent parfois pénétrer à plus de 1,5 m de profondeur, en fonction du type de sol.
<i>Carya cordiformis</i>	Caryer cordiforme	127	300	Système racinaire dense avec un pivot important et des racines latérales profondes.
<i>Carya ovata</i>	Caryer ovale	122	210	Système racinaire composé d'un pivot important, d'une profondeur allant de 60 à 90 cm dans les 3 premières années, et de quelques racines latérales étalées.
<i>Celtis occidentalis</i>	Micocoulier occidental	91	600	Système racinaire profond et étalé. Ultiment, l'enracinement atteint une profondeur de 3 à 6 m dans la plupart des types de sol.
<i>Fagus grandifolia</i>	Hêtre à grandes feuilles	81	>230	Système racinaire étalé et généralement superficiel, mais qui peut pénétrer jusqu'à 1,5 m ou plus dans les sols profonds.
<i>Fraxinus americana</i>	Frêne blanc	40	>180	Enracinement profond et étalé dans les sols qui le permettent, système racinaire formé d'un pivot et de racines latérales. La distribution des racines est très influencée par le type de sol. La profondeur de l'enracinement est souvent supérieure à 1 m.
<i>Fraxinus nigra</i>	Frêne noir	102	ND	Enracinement superficiel et étalé.
<i>Fraxinus pennsylvanica</i>	Frêne rouge	102	300	Enracinement superficiel et étalé. La profondeur du système racinaire peut aller jusqu'à 3 m.

Nom latin	Nom commun	Profondeur des racines (cm)		Commentaires
		Min.	Max.	
<i>Juglans cinerea</i>	Noyer cendré	102	ND	Système racinaire généralement composé d'un pivot duquel partent plusieurs racines latérales très étalées qui poussent à une profondeur considérable.
<i>Populus balsamifera</i>	Peuplier baumier	76	ND	Système racinaire très étalé, avec quelques grosses racines qui s'enfoncent obliquement dans le sol jusqu'à la nappe phréatique ou à une couche de sol durcie.
<i>Populus deltoides</i>	Peuplier deltoïde	61	500	Enracinement habituellement superficiel et très étalé, mais parfois profond. La profondeur moyenne du système racinaire est de 3,1 m. La profondeur des racines est fortement influencée par le type de sol.
<i>Populus grandidentata</i>	Peuplier à grandes dents	51	ND	Enracinement superficiel et très étalé, mais les racines principales et les racines pivotantes secondaires ont tendance à aller en profondeur.
<i>Populus tremuloides</i>	Peuplier faux-tremble	81	300	Système racinaire relativement superficiel, avec des racines latérales très étalées et des racines pivotantes secondaires. Les racines verticales peuvent atteindre une profondeur de 3 m.
<i>Quercus alba</i>	Chêne blanc	122	400	Enracinement profond et étalé, avec la présence d'un pivot profond.
<i>Quercus bicolor</i>	Chêne bicolore	102	ND	Enracinement superficiel à modérément profond et très étalé, système racinaire ligneux.
<i>Quercus macrocarpa</i>	Chêne à gros fruits	71	500	Système racinaire très étalé, composé de racines latérales et d'un pivot profond.
<i>Quercus rubra</i>	Chêne rouge	91	360	Système racinaire composé d'un pivot profond et de racines latérales étalées et profondes.
<i>Salix amygdaloides</i>	Saule à feuilles de pêcher	76	430	Enracinement superficiel et étalé. La profondeur des racines dépend de la profondeur de la nappe phréatique.
<i>Sorbus decora</i>	Sorbier décoratif	91	ND	Enracinement intermédiaire.
<i>Tilia americana</i>	Tilleul d'Amérique	76	210	Enracinement superficiel, système racinaire composé de racines latérales très étalées.

Nom latin	Nom commun	Profondeur des racines (cm)		Commentaires
		Min.	Max.	
<i>Ulmus americana</i>	Orme d'Amérique	90	610	L'enracinement dépend de la texture du sol. Généralement, le système racinaire est superficiel et très étalé et la profondeur varie de 1,0 à 1,2 m, mais dans les sols secs, un pivot se développe et peut atteindre une profondeur d'environ 3 à 6 m.
<i>Ulmus rubra</i>	Orme rouge	102	180	Système racinaire superficiel et étalé.
<i>Ulmus thomasi</i>	Orme liège	102	ND	Système racinaire profond et très étalé.

ND : donnée non disponible.

Tableau 4 : Arbres ornementaux ou introduits au Québec à utiliser ou à proscrire pour la végétalisation de terrains réhabilités par analyse de risque où des contaminants ont été laissés en place sous un recouvrement de confinement

Nom latin	Nom commun	Profondeur des racines (cm)		Commentaires
		Min.	Max.	
Espèces à utiliser lors de la réhabilitation de terrains contaminés par analyse de risque				
Conifères				
<i>Larix kaempferi</i>	Mélèze du Japon	51	ND	Enracinement superficiel.
<i>Picea abies</i>	Épinette de Norvège	71	600	Enracinement superficiel et étalé.
<i>Picea pungens</i>	Épinette du Colorado	46	ND	Enracinement superficiel.
Feuillus				
<i>Betula nigra</i>	Bouleau noir	51	ND	Enracinement superficiel, système racinaire ligneux et ramifié.
<i>Catalpa speciosa</i>	Catalpa remarquable	51	300	Enracinement relativement superficiel et étalé.
<i>Crataegus crus-galli</i>	Aubépine ergot-de-coq	61	ND	Enracinement moyennement profond.
<i>Platanus occidentalis</i>	Platane occidental	76	210	Enracinement superficiel, système racinaire ligneux et très étalé.
<i>Syringa villosa</i>	Lilas	36	ND	Enracinement superficiel.
Espèces à proscrire lors de la réhabilitation de terrains contaminés par analyse de risque				
Conifères				
<i>Larix decidua</i>	Mélèze d'Europe	102	450	Enracinement relativement profond.
<i>Pinus nigra</i>	Pin noir d'Autriche	102	ND	Système racinaire latéral et profond.
<i>Pinus sylvestris</i>	Pin sylvestre	20	800	Enracinement étalé et modérément profond, en fonction du type de sol. Par contre, la profondeur du pivot atteint habituellement de 1,5 à 3,0 m.
<i>Taxodium distichum</i>	Cyprès chauve	102	ND	Système racinaire composé d'un pivot et de racines latérales.
Feuillus				
<i>Acer platanoides</i>	Érable de Norvège	102	ND	Enracinement superficiel, système racinaire ligneux et très ramifié.

Nom latin	Nom commun	Profondeur des racines (cm)		Commentaires
		Min.	Max.	
<i>Aesculus glabra</i>	Marronnier glabre	91	ND	Système racinaire ligneux composé d'un pivot et de racines latérales.
<i>Carya glabra</i>	Caryer glabre	127	ND	Système racinaire habituellement composé d'un pivot prononcé et de quelques racines latérales.
<i>Carya laciniosa</i>	Caryer lacinié	152	ND	Système racinaire composé d'un pivot profond et solide et de petites racines latérales.
<i>Castanea dentata</i>	Châtaignier d'Amérique	51	ND	Système racinaire composé d'un pivot profond.
<i>Catalpa bignonioides</i>	Catalpa de Caroline	91	ND	Enracinement superficiel à l'aide de racines charnues.
<i>Eleagnus angustifolia</i>	Olivier de Bohême	51	120	Système racinaire étalé ou profond, en fonction du type de sol, avec plusieurs racines latérales bien développées.
<i>Gleditsia triacanthos</i>	Févier épineux	122	600	Enracinement profond, forte racine pivotante, système racinaire fibreux, très ramifié et étalé.
<i>Gymnocladus dioicus</i>	Chicot du Canada	91	ND	Système racinaire formé de profondes racines latérales.
<i>Juglan nigra</i>	Noyer noir	102	330	Système racinaire composé d'un pivot profond et de plusieurs racines latérales très étalées. La profondeur et l'étalement des racines dépendent du type de sol.
<i>Liriodendron tulipifera</i>	Tulipier de Virginie	81	290	Système racinaire composé d'un pivot juvénile profond et de racines latérales très développées et très étalées. Le mode d'enracinement s'adapte au type de sol.
<i>Magnolia acuminata</i>	Magnolia acuminé	76	ND	Enracinement profond et étalé, pivot rarement présent.
<i>Quercus muehlenbergii</i>	Chêne jaune	71	ND	Système racinaire composé d'un pivot et de racines latérales étalées.
<i>Quercus palustris</i>	Chêne des marais	76	ND	Système racinaire ligneux composé de nombreuses racines latérales superficielles et étalées.
<i>Quercus velutina</i>	Chêne noir	102	300	Système racinaire bien développé, composé d'un pivot profond et de racines latérales très étalées.
<i>Robinia pseudoacacia</i>	Robinier faux-acacia	91	790	Enracinement superficiel et étalé, mais capable de produire des racines verticales profondes en présence de sols secs.
<i>Sorbus aucuparia</i>	Sorbier des oiseaux	71	ND	Enracinement intermédiaire, système racinaire ligneux et ramifié.
<i>Tilia cordata</i>	Tilleul à petites feuilles	66	ND	Enracinement profond.

ND : donnée non disponible.

Tableau 5 : Arbustes indigènes du Québec à utiliser ou à proscrire pour la végétalisation de terrains réhabilités par analyse de risque où des contaminants ont été laissés en place sous un recouvrement de confinement

Nom latin	Nom commun	Profondeur des racines (cm)		Commentaires
		Min.	Max.	
Espèces à utiliser lors de la réhabilitation de terrains contaminés par analyse de risque				
<i>Acer ginnala</i>	Érable de l'Amour	61	ND	Enracinement superficiel, racines fines et nombreuses.
<i>Acer spicatum</i>	Érable à épis	81	ND	Enracinement superficiel, système racinaire étalé. La majorité des racines sont près de la surface du sol.
<i>Alnus crispa</i>	Aulne crispé	ND	ND	Enracinement superficiel.
<i>Alnus rugosa</i>	Aulne rugueux	61	ND	
<i>Amelanchier alnifolia</i>	Amélanchier à feuilles d'aulne	61	180	Enracinement superficiel et étalé, racines drageonnantes (rhizomes horizontaux et verticaux).
<i>Andromeda glaucophylla</i>	Andromède glauque	19	45	Enracinement superficiel. Le système racinaire se développe à faible profondeur et parallèlement à la surface du sol.
<i>Andromeda polifolia</i>	Andromède des marais	19	45	Racines drageonnantes (rhizomes horizontaux rampants). Le système racinaire représente de 75 à 98 % de la biomasse du plant.
<i>Aronia melanocarpa</i> (<i>Aronia negra</i>)	Aronia noir	61	ND	Enracinement superficiel, racines drageonnantes.
<i>Caragana arborescens</i>	Caraganier de Sibérie	41	ND	Enracinement superficiel, dense et étalé, présence de racines drageonnantes.
<i>Cephalanthus occidentalis</i>	Céphalante occidental	36	ND	Enracinement superficiel, présence d'un pivot.
<i>Comptonia peregrina</i>	Comptonie voyageuse	36	ND	Système racinaire superficiel, racines drageonnantes.
<i>Cornus alternifolia</i>	Cornouiller à feuilles alternes	51	ND	Enracinement superficiel, système racinaire ligneux et ramifié, présence de racines drageonnantes.
<i>Cornus canadensis</i>	Cornouiller du Canada	4	30	Enracinement superficiel, rhizomes se trouvant principalement dans la couche de sol minéral.
<i>Cornus racemosa</i>	Cornouiller à grappes	41	ND	Enracinement superficiel.
<i>Cornus rugosa</i>	Cornouiller rugueux	46	ND	Enracinement superficiel, nombreuses racines drageonnantes.
<i>Cornus stolonifera</i> (<i>Cornus sericea</i>)	Cornouiller stolonifère	51	ND	Enracinement superficiel, système racinaire ligneux et étalé, présence de racines drageonnantes.

Nom latin	Nom commun	Profondeur des racines (cm)		Commentaires
		Min.	Max.	
<i>Corylus americana</i>	Noisetier d'Amérique	15	350	Enracinement intermédiaire et étalé, racines drageonnantes. Les racines sont principalement dans les 15 premiers cm de sol.
<i>Corylus cornuta</i>	Noisetier à long bec	20	60	Système racinaire étalé; 90 % se trouvent dans les 20 premiers cm de sol. Pivot se trouvant généralement jusqu'à 60 cm de profondeur, racines drageonnantes.
<i>Diervilla lonicera</i> (<i>Diervilla canadensis</i>)	Diervillée chèvrefeuille	41	ND	Enracinement superficiel, racines drageonnantes.
<i>Elaeagnus commutata</i> (<i>Elaeagnus argentea</i>)	Chalef argenté	46	ND	
<i>Gaultheria procumbens</i>	Gaulthérie couchée (thé des bois)	3	30	Enracinement superficiel, nombreux rhizomes, racines se trouvant généralement à une profondeur de 2,5 cm ou moins.
<i>Hippophae rhamnoides</i>	Argousier	ND	ND	Enracinement superficiel.
<i>Hypericum kalmianum</i>	Millepertuis de Kalm	ND	ND	
<i>Ilex mucronata</i> (<i>Nemopanthes mucronatus</i>)	Némopanthé mucroné	ND	ND	
<i>Ilex verticillata</i>	Houx verticillé	41	ND	Enracinement superficiel, présence de racines drageonnantes.
<i>Kalmia angustifolia</i>	Kalmia à feuilles étroites	9	100	Enracinement superficiel (la profondeur des racines fines se situe entre 9 et 31 cm). Le pivot s'étend plus profondément (jusqu'à 1 m de profondeur).
<i>Lonicera canadensis</i>	Chèvrefeuille du Canada	ND	ND	Enracinement superficiel.
<i>Lonicera dioica</i>	Chèvrefeuille dioïque	ND	ND	
<i>Lonicera involucrata</i>	Chèvrefeuille involucre	30	ND	
<i>Myrica gale</i>	Myrique baumier	31	ND	Enracinement superficiel, racines drageonnantes.
<i>Myrica pensylvanica</i>	Myrique de Pennsylvanie	51	76	Enracinement superficiel, racines drageonnantes.
<i>Parthenocissus quinquefolia</i>	Vigne vierge	41	ND	Système racinaire constitué d'un pivot ligneux, racines drageonnantes.
<i>Physocarpus opulifolius</i>	Physocarpe à feuilles d'obier	36	ND	Enracinement superficiel.

Nom latin	Nom commun	Profondeur des racines (cm)		Commentaires
		Min.	Max.	
<i>Potentilla tridentata</i>	Potentille tridentée	ND	ND	Système racinaire ligneux, présence de racines drageonnantes.
<i>Rhamnus alnifolia</i>	Nerprun à feuilles d'aulne	30	ND	Enracinement superficiel, racines drageonnantes.
<i>Rhododendron canadense</i>	Rhododendron du Canada	41	ND	Racines drageonnantes.
<i>Rhododendron groenlandicum</i> (<i>Ledum groenlandicum</i>)	Thé du Labrador (lédon du Groenland)	15	50	Enracinement superficiel, présence de racines drageonnantes, rhizomes se situant généralement entre 15 et 50 cm.
<i>Rhus aromatica</i>	Sumac aromatique	ND	ND	Enracinement superficiel, système racinaire rhizomateux et étalé qui tend à drageonner.
<i>Rhus typhina</i>	Sumac vinaigrier	51	ND	Enracinement superficiel, racines drageonnantes, système racinaire très étalé (envahissant).
<i>Ribes aureum</i>	Groseiller doré (gadellier doré)	51	ND	Enracinement superficiel, système racinaire bien ramifié et rhizomateux.
<i>Ribes glandulosum</i>	Gadellier glanduleux	ND	ND	Enracinement superficiel.
<i>Rosa blanda</i>	Rosier inerme (rosier sauvage)	ND	ND	Enracinement étalé, racines drageonnantes.
<i>Rosa palustris</i>	Rosier palustre	46	ND	Système racinaire ligneux et ramifié produisant des racines drageonnantes.
<i>Rosa rugosa</i>	Rosier rugueux	36	ND	
<i>Rubus idaeus</i>	Framboisier sauvage	31	ND	Enracinement superficiel, racines drageonnantes.
<i>Rubus occidentalis</i>	Mûrier sauvage	31	ND	Enracinement superficiel, système racinaire constitué d'un pivot ligneux et ramifié, racines drageonnantes.
<i>Rubus odoratus</i>	Ronce odorante	41	ND	Enracinement superficiel, racines drageonnantes.
<i>Salix petiolaris</i>	Saule pétiolé	ND	ND	Système racinaire étalé et fibreux.
<i>Salix viminalis</i>	Saule des vanniers	ND	ND	Enracinement superficiel, racines drageonnantes.
<i>Sambucus canadensis</i>	Sureau du Canada (sureau blanc)	ND	ND	Enracinement superficiel.
<i>Sambucus pubens</i> (<i>Sambucus racemosa</i>)	Sureau rouge (sureau pubescent)	61	100	Enracinement superficiel, système racinaire très ramifié, présence de racines drageonnantes.
<i>Sorbaria sorbifolia</i>	Sorbaria à feuilles de sorbier	ND	ND	Enracinement superficiel, racines drageonnantes.

Nom latin	Nom commun	Profondeur des racines (cm)		Commentaires
		Min.	Max.	
<i>Spiraea alba</i>	Spirée blanche	30	ND	Enracinement superficiel, système racinaire ligneux, racines drageonnantes.
<i>Spiraea latifolia</i>	Spirée à larges feuilles	ND	13	Enracinement superficiel, racines drageonnantes.
<i>Staphylea trifolia</i>	Staphylier à trois folioles	ND	ND	Enracinement superficiel, multiplication végétative possible.
<i>Symphoricarpos albus</i>	Symphorine blanche	ND	ND	Enracinement superficiel, système racinaire rhizomateux.
<i>Syringa vulgaris</i>	Lilas commun	36	ND	Enracinement superficiel. Le système racinaire produit graduellement des clones.
<i>Taxus canadensis</i>	If du Canada	61	ND	Enracinement superficiel, système racinaire très bien développé, multiplication par marcottage possible.
<i>Vaccinium angustifolium</i>	Bleuet	6	100	Enracinement superficiel, racines drageonnantes, présence possible d'un pivot pouvant atteindre 1 m de profondeur.
<i>Vaccinium macrocarpon</i>	Canneberge	ND	ND	Enracinement superficiel.
<i>Vaccinium vitis-idaea</i>	Airelle rouge	5	30	Enracinement superficiel, système racinaire variable (présence possible d'un pivot), racines drageonnantes.
<i>Viburnum cassinoides</i>	Viorne cassinoïde	ND	ND	Enracinement superficiel.
<i>Viburnum lantana</i>	Viorne lantane	36	ND	
<i>Viburnum trilobum</i>	Viorne trilobée	36	ND	Enracinement superficiel, système racinaire ligneux et ramifié.
<i>Vitis riparia</i>	Vigne des marais	41	ND	Enracinement descendant, système racinaire composé d'un pivot qui se ramifie occasionnellement.
Espèces à proscrire lors de la réhabilitation de terrains contaminés par analyse de risque				
<i>Arctostaphylos uva-ursis</i>	Raisin d'ours commun	25	183	Enracinement superficiel, succès de plantation variable.
<i>Betula glandulosa</i>	Bouleau glanduleux	6	ND	Enracinement superficiel et étalé, racines drageonnantes, présence fréquente de racines profondes.
<i>Potentilla fruticosa</i>	Potentille frutescente	46	300	Enracinement superficiel à modérément profond, système racinaire étalé avec de minces racines ligneuses.

Nom latin	Nom commun	Profondeur des racines (cm)		Commentaires
		Min.	Max.	
<i>Prunus nigra</i>	Prunier noir	91	ND	Enracinement intermédiaire et étalé, présence de racines drageonnantes.
<i>Prunus tomentosa</i>	Cerisier tomenteux	51	ND	Système racinaire moyennement profond et étalé.
<i>Prunus virginiana</i>	Cerisier de Virginie	51	180	Enracinement intermédiaire à profond, présence de racines drageonnantes.
<i>Shepherdia canadensis</i>	Shepherdie du Canada	61	ND	Enracinement intermédiaire, système racinaire rhizomateux et étalé avec quelques parties relativement profondes.
<i>Sorbus americana</i>	Sorbier d'Amérique	71	ND	Enracinement intermédiaire, racines drageonnantes.
<i>Zanthoxylum americanum</i>	Frêne épineux	ND	ND	Multiplication végétative par clonage possible.

ND : donnée non disponible.

Tableau 6 : Arbustes ornementaux du Québec à utiliser ou à proscrire pour la végétalisation de terrains réhabilités par analyse de risque où des contaminants ont été laissés en place sous un recouvrement de confinement

Nom latin	Nom commun	Profondeur des racines (cm)		Commentaire
		Min.	Max.	
Espèces à utiliser lors de la réhabilitation de terrains contaminés par analyse de risque				
<i>Amelanchier laevis</i>	Amélanchier glabre	76	ND	Enracinement superficiel.
<i>Aronia arbutifolia</i>	Aronie rouge	ND	ND	Racines drageonnantes.
<i>Azalea</i> « Northen Lights »	Azalée « Northen Lights »	ND	30	Enracinement superficiel, absence de pivot.
<i>Berberis thunbergii</i>	Berberis	46	ND	Enracinement superficiel, étalé et rhizomateux.
<i>Chaenomeles japonica</i>	Cognassier du Japon	46	ND	Racines drageonnantes.
<i>Chamaecyparis nootkatensis</i>	Cyprès de Nootka	61	ND	Enracinement superficiel.
<i>Clethra alnifolia</i>	Clèthre à feuilles d'aulne	41	ND	Racines drageonnantes.
<i>Cornus alba</i>	Cornouiller blanc	ND	ND	Enracinement superficiel, racines drageonnantes.
<i>Cornus florida</i>	Cornouiller à fleurs	46	< 100	Enracinement superficiel, système racinaire composé d'un pivot ligneux et ramifié, racines drageonnantes. La profondeur des racines ne dépasse généralement pas 1 m.
<i>Cotinus coggygria</i>	Arbre à perruques	ND	ND	Enracinement superficiel, système racinaire fibreux.
<i>Cotoneaster adpressus praecox</i>	Contonéaster précoce rampant	ND	ND	Multiplication par marcottage.
<i>Cydonia oblonga</i>	Cognassier	76	ND	Enracinement superficiel, racines drageonnantes.
<i>Deutzia gracilis</i>	Deutzia	36	ND	Enracinement superficiel.
<i>Diervilla sessilifolia</i>	Diervillée	ND	ND	
<i>Forsythia intermedia</i>	Forsythie	ND	ND	Enracinement superficiel.
<i>Fothergilla gardenii</i>	Fothergilla	30	ND	
<i>Hamamelis virginiana</i>	Hamamélis de Virginie	51	ND	Enracinement superficiel, système racinaire composé d'un pivot ligneux et ramifié.

Nom latin	Nom commun	Profondeur des racines (cm)		Commentaire
		Min.	Max.	
<i>Hibiscus syriacus</i>	Hibiscus	ND	ND	Enracinement superficiel.
<i>Hippophae rhamnoides</i>	Argousier	46	ND	
<i>Hydrangea arborescens</i>	Hydrangée	ND	ND	Système racinaire rhizomateux.
<i>Hydrangea macrophylla</i>	Hydrangée	30	ND	Enracinement superficiel.
<i>Magnolia acuminata</i>	Magnolia à feuilles acuminées	76	ND	
<i>Philadelphus coronarius</i>	Seringat	61	ND	
<i>Robinia hispida</i>	Robinier acacia	51	ND	Système racinaire rhizomateux, multiplication végétative fréquente.
<i>Sambucus nigra</i>	Sureau noir	41	ND	Enracinement superficiel, racines drageonnantes.
<i>Spiraea japonica</i>	Spirée japonaise	36	ND	Enracinement superficiel.
<i>Stephanandra incisa</i>	Stéphanandre incisée	ND	ND	Enracinement superficiel, racines drageonnantes et possibilité de marcottage.
<i>Symphoricarpos albus</i>	Symphorine blanche	46	ND	Enracinement superficiel, racines drageonnantes.
<i>Syringa villosa</i>	Lilas villosa	36	ND	Enracinement superficiel.
<i>Viburnum dentatum</i>	Viorne à feuilles dentées	ND	ND	Enracinement superficiel, système racinaire ligneux, ramifié et rhizomateux.
<i>Viburnum opulus</i>	Viorne obier	36	ND	Système racinaire rhizomateux.
<i>Weigela florida</i>	Weigélie fleurie	ND	ND	Enracinement superficiel.
Espèces à proscrire lors de la réhabilitation de terrains contaminés par analyse de risque				
<i>Crataegus crus-galli</i>	Aubépine ergot-de-coq	61	ND	Enracinement profond.
<i>Elaeagnus angustifolia</i>	Olivier de Bohême	51	120	Système racinaire ligneux et étalé, racines drageonnantes. La profondeur des racines dépasse rarement 1,2 m, mais près de 20 % des racines peuvent se trouver à cette profondeur, en fonction du type de sol.

Nom latin	Nom commun	Profondeur des racines (cm)		Commentaire
		Min.	Max.	
<i>Euonymus alatus</i>	Fusain ailé	61	ND	Enracinement profond, système racinaire fibreux, racines drageonnantes.
<i>Pinus mugo</i> « Mops »	Pin	41	ND	Enracinement profond, excepté sur des sols peu profonds et mal drainés, absence de pivot.
<i>Rosa</i> sp.	Rosiers	15-41	140-180	Enracinement superficiel et rhizomateux. Beaucoup de petites racines dans les 20 premiers cm de sol. Les racines les plus profondes peuvent atteindre jusqu'à 140 cm de profondeur.
<i>Rubus</i> sp.	Rubus	15-36	180	Système racinaire rhizomateux. La plupart des rubus ont la capacité de drageonner vigoureusement. Les rhizomes sont habituellement situés dans les 31 premiers cm de sol, mais peuvent aller jusqu'à une profondeur de 1,8 m.
<i>Salix exigua</i>	Saule des coyotes	51	ND	Enracinement superficiel à profond, système racinaire ligneux et étalé, racines drageonnantes.
<i>Tamarix</i> sp.	Tamarix	75	244	Enracinement profond, système racinaire rhizomateux qui s'étale jusqu'à la nappe phréatique.

ND : donnée non disponible.

4. MESURES ADDITIONNELLES

Exceptionnellement, le GTE pourrait accepter l'utilisation d'autres espèces d'arbres et d'arbustes que ceux des listes précédentes et dont le système racinaire à maturité dépasserait 1 m de profondeur, à la condition toutefois que leur emploi soit justifié et que des mesures additionnelles de confinement soient ajoutées. Ces mesures additionnelles sont présentées dans les paragraphes suivants.

La première mesure additionnelle acceptable d'un point de vue écotoxicologique et privilégiée par le GTE consiste à planter les arbres ou les autres espèces végétales dont le système racinaire à maturité excéderait 1 m de profondeur dans des fosses de plantation assez profondes et larges pour contenir tout le système racinaire. Les dimensions de la fosse devront être justifiées en fonction des espèces végétales sélectionnées. À ce sujet, le promoteur pourrait se référer à la norme BNQ 0605 100/2001 partie IX « Calcul de la zone de protection optimale des arbres et des arbustes » pour établir le diamètre de la fosse. La profondeur devra être déterminée de manière à s'assurer que l'ensemble du système racinaire se développe entièrement dans des sols propres. La profondeur de la fosse pourrait varier de 1 à 2 m ou plus, selon l'espèce.

La deuxième mesure additionnelle acceptable consiste à mettre en place une géomembrane en polyéthylène haute densité (GPHD) ou tout autre géosynthétique équivalent sous le mètre de sols propres en s'assurant que la configuration des zones de plantation permette un drainage adéquat. La résistance des GPHD de 1 mm a été testée en laboratoire et les résultats ont démontré qu'il faut des pressions supérieures à 20 MPa pour qu'une racine d'arbre traverse celle-ci (Dobson et Moffat, 1995). La pression racinaire maximale peut varier d'une espèce ligneuse à une autre; à notre connaissance, cette donnée se trouve rarement dans la documentation. Les valeurs recueillies montrent qu'elle est systématiquement en deçà de la pression nécessaire pour pénétrer une géomembrane (pression de l'ordre de 0,9 à 2,5 MPa, selon l'espèce) (Dobson et Moffat, 1995). Notons que certains types de membranes avec biocide sont composés d'une couche de cuivre qui sert à repousser les racines. Cependant, une quantité substantielle de cuivre (Cu) peut être libérée dans l'eau de ruissellement du sol (Kosuta et Hamel, 2000) et, par conséquent, augmenter les concentrations de cuivre dans les eaux de ruissellement, tout comme la toxicité pour les organismes terrestres fréquentant le site. Les membranes avec biocide (cuivre) ne sont donc pas acceptées pour la végétalisation des terrains réhabilités dans lesquels des contaminants sont laissés en place.

La troisième mesure additionnelle acceptable consiste à mettre en place, au-dessus des sols contaminés et en dessous de la couche de 1 m de sols propres exigée en surface, une couche de protection d'une densité apparente sèche d'au moins $1,8 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, uniformément distribuée, qui aura pour effet de créer une barrière difficilement franchissable pour les racines. En raison des risques de fissuration associés à l'action des cycles de gel-dégel et à l'assèchement, l'utilisation de sols argileux est à proscrire. Un rapport sur les propriétés géotechniques des remblais en place sous les zones de plantation doit être soumis au GTE. Il doit inclure une discussion sur les différents aspects géotechniques qui peuvent influencer sur la pérennité de la couche compactée (gel, tassement, infiltration d'eau, assèchement, etc.). Des essais de contrôle de la densité de la couche compactée devront aussi être réalisés quand celle-ci aura été mise en place. Notons que le GTE limite d'ailleurs l'application de cette mesure dans les cas de constructions de voies ferroviaires et routières pour les zones végétalisées dans les emprises des voies ou immédiatement en bordure de celles-ci.

Précisons que la mise en place de l'une ou l'autre des mesures de confinement permettant de planter certaines espèces d'arbres ou d'arbustes proscrites dans le présent document devra être justifiée dans le plan de réhabilitation soumis au GTE pour un terrain donné. Le GTE acceptera donc l'ajout de ces mesures, selon les caractéristiques du terrain donné, au cas par cas.

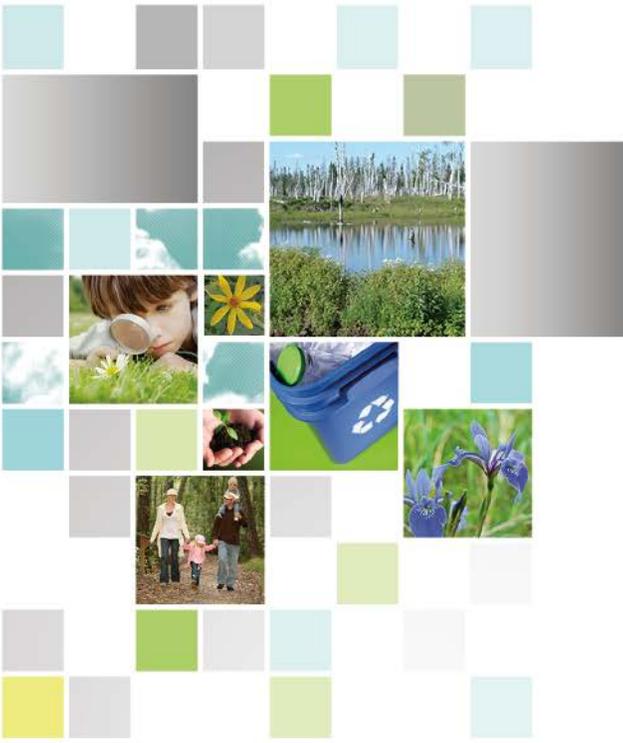
5. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ATGER, C. et C. Edelin, 1994. « Premières données sur l'architecture comparée des systèmes racinaires et caulinaires », *Canadian Journal of Botany*, 72, p. 963-975.
- ATGER, C., 1992. « Essai sur l'architecture des arbres ». Thèse de doctorat, Montpellier, Université de Montpellier II, 287 p.
- ATKINSON, D., 1980. « The Distribution and Effectiveness of the Roots of Tree Crops », dans *Horticultural Reviews*, Hoboken, New Jersey, U.S.A., John Wiley & Sons, p. 424-490.
- BEAULIEU, M. 2016. *Guide d'intervention – Protection des sols et réhabilitation des terrains contaminés*. Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC), 210 p.
- CANADELL, J., R. B. Jackson, J. B. Ehleringer, H. A. Mooney, O. E. Sala et E. D. Schulze, 1996. « Maximum Rooting Depth of Vegetation Types at the Global Scale », *Oecologia*, 108(4), p. 583-595.
- CANNON, H. L., 1960. « The Development of Botanical Methods of Prospecting for Uranium on the Colorado Plateau », *US Geological Survey Bulletin*, 1085-A, p. 1-50.
- CARTER, M. C., T. J. Dean, Z. Wang et R. A. Newbold, 2006. « Impacts of Harvesting and Postharvest Treatments on Soil Bulk Density, Soil Strength, and Early Growth of *Pinus taeda* in the Gulf Coastal Plain: A Long-Term Soil Productivity Affiliated Study », *Canadian Journal of Forest Research/Revue canadienne de recherche forestière*, 36(3), p. 601-614.
- COUTTS, M. P., 1989. « Factors Affecting the Direction of Growth of Tree Roots », *Annales des sciences forestières*, 46, p. S277-S287.
- CROW, P., 2005. *The Influence of Soils and Species on Tree Root Depth*, Édimbourg, Information Note FCINO78 Forestry Commission Edinburgh, 8 p.
- CUTLER, D. F., P. E. Gasson et M. C. Farmer, 1990. « The Wind Blown Tree Survey: Analysis of Results », *Arboricultural Journal*, 14(3), p. 265-286.
- DANJON, F. et T. Fourcaud, 2009. « L'arbre et son enracinement », *Innovations agronomiques*, 6, p. 17-37.
- DAY, S. D., P. E. Wiseman, S. B. Dickinson et J. R. Harris, 2010. « Tree Root Ecology in the Urban Environment and Implications for a Sustainable Rhizosphere », *Arboriculture & Urban Forestry*, 36(5), p. 193-205.
- DEPARTMENT FOR COMMUNITIES AND LOCAL GOVERNMENT (DCLG), 2008. *Woodland Establishment on Landfill Sites, Ten Years of Research*. London, UK, Department of Communities and Local Government, 64 p.

- DE PAUL, M. A. et M. Bailly, 2005. « Effets de la compaction des sols forestiers », *Forêt Wallonne ASBL*, 76, p. 47-57.
- DOBSON, M. C. et A. J. Moffat, 1995. « A Re-evaluation of Objections to Tree Planting on Containment Landfills », *Waste Management & Research*, 13(6), p. 579-600.
- DRÉNOU, C., 2006. *Les racines : face cachée des arbres*, Paris, Institut pour le développement forestier, 335 p.
- DROUINEAU, S., O. Laroussinie, Y. Birot, D. Terrasson, T. Formery et B. Roman-Amat, 2000. *Expertise collective sur les tempêtes, la sensibilité des forêts et sur leur reconstitution*, Paris, Dossier de l'environnement de l'INRA n° 20, INRA-ME&S, 336 p.
- FAULKNER, M. E. et D. C. Malcolm, 1972. « Soil Physical Factors Affecting Root Morphology and Stability of Scots Pine on Upland Heaths », *Forestry*, 43, p. 23-36.
- FOUSSADIER, R., 1998. « Initiation des Successions Végétales dans les Lits Endigués des Cours D'eau Alpains. Influence des Paramètres Abiotiques sur la Régénération des Salicacées ». Thèse de doctorat, Grenoble, Université J. Fourier, 236 p.
- GASSON, P. E. et D. F. Cutler, 1990. « Tree Root Plate Morphology », *Arboricultural Journal*, 14(3), p. 193-264.
- GERARD, C. J., P. Sexton et G. Shaw, 1982. « Physical Factors Influencing Soil Strength and Root Growth », *Agronomy Journal*, 74, p. 875-879.
- GIBBS, J. N. et B. J. W. Greig, 1990. « Survey of Parkland Trees After the Great Storm of October 16, 1987 », *Arboricultural Journal*, 14(4), p. 321-347.
- GILMAN, E. F., 1990. « Tree Root Growth and Development. II. Response to Culture, Management and Planting », *Journal of Environmental Horticulture*, 8, p. 220-227.
- GRABOSKY, J. et N. Bassuk, 1996. « Testing of Structural Urban Tree Soil Materials for Use Under Pavement to Increase Street Tree Rooting Volumes », *Journal of Arboriculture*, 22, p. 255-263.
- HANDEL, S. N., G. R. Robinson, W. F. J. Parsons et J. H. Mattei, 1997. « Restoration of Woody Plants to Capped Landfills: Root Dynamics in an Engineered Soil », *Restoration Ecology*, 5(2), p. 178-186.
- HEILMAN, P., 1981. « Root Penetration of Douglas-fir Seedlings into Compacted Soil », *Forest Science*, 27, p. 660-666.
- HIGHTSHOE, G. L., 1987. *Native Trees, Shrubs, and Vines for Urban and Rural America: A Planting Design Manual for Environmental Designers*, New York, John Wiley & Sons, 832 p.
- HUTCHINGS, T. R., A. J. Moffat et R. A. Kemp, 2001. « Effects of Rooting and Tree Growth of Selected Woodland Species on Cap Integrity in a Mineral Capped Landfill Site », *Waste Management and Research*, 19(3), p. 94-200.
- JONES, C. A., 1983. « Effect of Soil Texture on Critical Bulk Densities for Root Growth », *Soil Science Society of America Journal*, 47, p. 1208-1211.
- KAHLE, H., 1993. « Response of Roots of Trees to Heavy Metals », *Environmental and Experimental Botany*, 39, p. 99-119.

- KIRBY, J. M. et A. G. Bengough, 2002. « Influence of Soil Strength on Root Growth: Experiments and Analysis Using a Critical-state Model », *European Journal of Soil Science*, 53(1), p. 119-127.
- KOSUTA, S. et C. Hamel, 2000. « The Fate and Mobility of Copper from Chemical Root Control Barriers in Soil and Leachate », *Environmental Pollution*, 110(1), p. 165-170.
- LAJEUNESSE, D. et W. H. Hendershot, 1990. « La répartition du système racinaire de l'érable à sucre dans quelques érablières du Québec », *Naturaliste canadien*, 117, p. 207-214.
- LEBLANC, M. L. et A. Cogliastro, 2013. *Guide à l'élaboration d'un devis technique de plantation en vue de l'aménagement du parc du Complexe environnemental de Saint-Michel (CESM)*, pour la Direction des grands parcs et du verdissement de la Ville de Montréal, Montréal, Institut de recherche en biologie végétale, 87 p.
- LUCOT, E. et S. Bruckert, 1992. « Common Oak (*Quercus-robur*) Root-system Organization Developed without Restricting Edaphic Conditions (Colluvial Leached Brown Soil) », *Annales des sciences forestières*, 49(5), p. 465-479.
- LUTZ, H. J., J. B. Ely et S. Little, 1937. *The Influence of Soil Profile Horizons on Root Distribution of White Pine (*Pinus strobus L.*)*, New Haven, Yale University.
- LYFORD, W. H. et B. F. Wilson, 1964. *Development of the Root System of *Acer Rubrum L.**, Petersham, Massachusetts, U.S.A. Harvard Forest.
- MINISTÈRE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE, DE L'ENVIRONNEMENT ET DES PARCS (MDDEP), 2008. *Lignes de conduite pour le traitement des dossiers de terrains contaminés ayant recours à l'analyse de risque*, Québec, Groupe technique d'évaluation (GTE), 29 p.
- MEYER, W. S., H. D. Barrs, R. C. G. Smith, N. S. White, A. D. Heritage et D. L. Short, 1985. « Effect of Irrigation on Soil Oxygen Status and Root and Shoot Growth of Wheat in a Clay Soil », *Australian Journal of Agricultural Research*, 36(2), p. 171-185.
- MOFFAT, A. J., 1995. « Minimum Soil Depths for the Establishment of Woodland on Disturbed Ground », *Arboricultural Journal*, 19(1), p. 19-27.
- MONTAGU, K. D., J. P. Conroy et B. J. Atwell, 2001. « The Position of Localized Soil Compaction Determines Root and Subsequent Shoot Growth Responses », *Journal of Experimental Botany*, 52(364), p. 2127-2133.
- MUNSHOWER, F. F., 1994. *Practical Handbook of Disturbed Land Revegetation*, Boca Raton, Floride, U.S.A., Lewis Publishers, 265 p.
- PERRY, D. A., C. Choquette et P. Schroeder, 1987. « Nitrogen Dynamics in Conifer-dominated Forests with and without Hardwoods », *Canadian Journal of Forest Research/Revue canadienne de recherche forestière*, 17(11), p. 1434-1441.
- PERRY, T. O., 1982. « The Ecology of Tree Roots and the Practical Significance Thereof », *Journal of Arboriculture*, 8, p. 197-211.
- PERRY, T. O., 1989. « Tree Roots: Facts and Fallacies », *Arnoldia*, 49, p. 1-21.
- PERSSON, H., 1983. « The Distribution and Productivity of Fine Roots in Boreal Forests », *Plant Soil*, 71, p. 87-101.

- PUHE, J., 2003. « Growth and Development of the Root System of Norway Spruce (*Picea abies*) in Forest Stands – A Review », *Forest Ecology and Management*, 175(1-3), p. 253-273.
- ROBINSON, G. R. et S. N. Handel, 1995. « Woody Plant-roots Fail to Penetrate a Clay-lined Landfill – Management Implications », *Environmental Management*, 19(1), p. 57-64.
- SCHENK, H. J., 2006. « Root Competition: Beyond Resource Depletion », *Journal of Ecology*, 94(4), p. 725-739.
- SCHNELLE, A. S., J. R. Feucht et J. E. Klett, 1989. « Root Systems of Trees – Facts and Fallacies », *Journal of Arboriculture*, 15, p. 201-205.
- STONE, E. L. et P. J. Kalisz, 1991. « On the Maximum Extent of Tree Roots », *Forest Ecology and Management*, 46(1-2), p. 59-102.
- SUTTON, R. F., 1980. « Root-system Morphogenesis », *New Zealand Journal of Forestry Science*, 10(1), p. 264-292.
- SUTTON, R. F., 1991. *Soil Properties and Root Development in Forest Trees: A Review*, Sault Ste. Marie, Ontario. Forestry Canada, Information Report O-X-413, 42 p.
- TAYLOR, H. M., G. M. Robertson et J. J. Parker, 1966. « Soil Strength-Root Penetration Relations for Medium-To Coarse-Textured Soil Materials », *Soil Science*, 102, p. 18-22.
- TUTTLE, C. L., M. S. Golden et R. S. Meldahl, 1988. « Soil Compaction Effects on *Pinus taeda* Establishment from Seed and Early Growth », *Canadian Journal of Forest Research*, 18, p. 628-632.
- VEPRASKAS, M. J., 1988. « Bulk Density Values Diagnostic of Restricted Root Growth in Coarse-Textured Soils », *Soil Science Society of America Journal*, 52, p. 1117-1121.
- WOUTERS, P. de, 1999. « L'eau et les arbres », *Silva Belgica*, 106(5), fiche n° 2, 8 p.
- ZISA, R. P., H. G. Halverson et B. B. Stout, 1980. *Establishment and Early Growth of Conifers on Compact Soils in Urban Areas*, Broomall, Pennsylvanie, U.S.A., Department of Agriculture, Forest Service, Northeastern Forest Experiment Station.



***Développement durable,
Environnement et Lutte
contre les changements
climatiques***

Québec 