

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC EN ABITIBI-TÉMISCAMINGUE

INFLUENCE DE DIFFÉRENTS AGENCEMENTS DE PLANTATION SUR LE
DÉVELOPPEMENT RACINAIRE POUR ASSURER L'ANCRAGE ET
L'ALIMENTATION HYDRIQUE DE PEUPLIERS PLANTÉS DANS DU SOL
RECOUVRANT DES PENTES DE STÉRILES MINIERS

THÈSE

PRÉSENTÉE

COMME EXIGENCE PARTIELLE

DU DOCTORAT EN SCIENCES DE L'ENVIRONNEMENT

PAR
KHADIJA BABI

DECEMBRE 2021



Mise en garde

La bibliothèque du Cégep de l'Abitibi-Témiscamingue et de l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT) a obtenu l'autorisation de l'auteur de ce document afin de diffuser, dans un but non lucratif, une copie de son œuvre dans [Depositum](#), site d'archives numériques, gratuit et accessible à tous. L'auteur conserve néanmoins ses droits de propriété intellectuelle, dont son droit d'auteur, sur cette œuvre.

Warning

The library of the Cégep de l'Abitibi-Témiscamingue and the Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT) obtained the permission of the author to use a copy of this document for nonprofit purposes in order to put it in the open archives [Depositum](#), which is free and accessible to all. The author retains ownership of the copyright on this document.

DÉDICACE

À la mémoire de ma très chère Maman Saida Oubida! Tu as quitté ce monde très tôt, mais tu ne quitteras jamais mes pensées et mon cœur. Je ne te serais jamais assez reconnaissante pour tout ce que tu as fait pour moi. Tu as été la meilleure mère au monde.

Je t'aime...

REMERCIEMENTS

Je souhaite tout d'abord exprimer ma gratitude et mes sincères remerciements à ma directrice Marie Guittonny pour me donner la chance de me lancer dans cette belle aventure. Merci pour son encadrement et accompagnement sérieux tout en me laissant une grande liberté et autonomie. J'apprécie énormément le partage de son savoir et son expérience, son aide et son soutien qui m'a accordé durant toutes ces années de doctorat. C'est grâce à sa grande disponibilité, son implication et aux échanges très enrichissants que j'ai pu finir ce projet de doctorat.

Je remercie mon codirecteur Bruno Bussière pour son aide indispensable, la confiance qui m'a accordé, et le regard critique qui a apporté à mon travail.

Je remercie également mon codirecteur Guy R. LaRocque pour sa disponibilité, son aide précieuse et ses conseils éclairants et constructifs. Je suis très reconnaissante pour ton implication et contribution dans les différentes étapes de ma thèse.

Je vous remercie tous les trois parce que vous avez cru en moi, pour vos encouragements et motivations. Merci pour les connaissances et les compétences que vous m'avez transmises. C'était un grand plaisir et honneur de travailler avec vos trois.

Mes remerciements vont également aux personnels et aux autres professeurs de l'IRME UQAT pour leur contribution à ma formation. J'adresse mes remerciements également à Danièle Laporte pour son aide précieuse.

Un grand merci est dédié à la mine Canadian Malartic pour leur importante collaboration dans ce projet de recherche et leur aide logistique pour les travaux de terrain. Je tiens à remercier également les stagiaires pour la précieuse aide dans le terrain et le laboratoire.

Un grand merci à mes sœurs Hanane, Khawla et Nisrine, mes tantes Leila et Ilham, ainsi que toute ma famille pour le soutien et l'encouragement jusqu'à la dernière minute.

Je salue mes amis et collègues que j'ai côtoyés à l'UQAT qui m'ont motivé et encouragé.

Un merci très spécial à mes deux trésors Amira et Mohamed-Amine qui attendaient avec impatience que maman finit son doctorat et qui m'ont donné tout l'amour et le bonheur dont j'en ai besoin pour garder la motivation et la persévérance jusqu'à la fin.

Merci aux membres de jury, Tikou Belem, Nelson Thiffault et Sylvie Renault, qui ont accepté d'évaluer ce travail.

AVANT-PROPOS

Cette thèse a été rédigée sous forme d'articles et elle est composée de huit parties. La première partie est une introduction générale pour introduire le contexte et la problématique ainsi que l'originalité du projet. Ensuite une revue de littérature qui précise les connaissances scientifiques disponibles en lien avec les différentes thématiques de la recherche, et qui a amené à formuler les objectifs spécifiques de la recherche réalisée. Le chapitre 3 présente le protocole expérimental adopté pour répondre aux objectifs de l'étude.

Les chapitres 4 à 6 constituent le corps du document. Ils sont rédigés en anglais sous forme d'articles scientifiques à publier dans des revues avec comité de lecture :

Le Chapitre 4 traite des principaux résultats de l'effet de l'espacement entre les arbres et la compétition herbacée sur l'exposition et la réponse au stress hydrique des peupliers hybrides plantés sur des pentes de stériles recouvert de sol superficiel. Ce chapitre est sous forme d'un article scientifique publié dans la revue *Ecoscience*.

Le Chapitre 5 présente les résultats des suivis relatifs à l'évaluation de l'effet de la compétition herbacée et de la densité de plantation sur le développement racinaire et la stabilité des peupliers hybrides plantés. Ces résultats ont été rédigés en anglais sous forme d'un article scientifique qui sera resoumis à la revue *Plant and Soil*.

Le Chapitre 6 présente les résultats portant sur l'évaluation de l'effet du type de matériel de plantation et de la qualité du sol sur la stabilité et le développement racinaire des peupliers hybrides plantés sur des pentes de stériles. Les résultats de ce chapitre ont été rédigés sous forme d'un article soumis à *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*.

Le chapitre 7 présente une discussion générale qui revient sur les principaux éléments discutés dans cette recherche et qui fait le lien entre les résultats des trois chapitres.

Enfin, les principales recommandations issues de ce projet de doctorat sont présentées et mises en perspective dans le dernier chapitre (8).

La conception générale de l'étude a été faite par ma directrice et mes deux co-directeurs. J'ai contribué à l'élaboration des protocoles expérimentaux, réalisé le travail sur le terrain et au laboratoire, l'interprétation des résultats et la rédaction sous la supervision et l'aide de ma directrice Marie Guittonny et de mes co-directeurs Bruno Bussière et Guy Larocque.

RÉSUMÉ

La revégétalisation des sites miniers doit contrôler l'érosion et redonner au site un aspect naturel. Toutefois, dans les régions forestières canadiennes, les conditions favorisant la reconstruction d'un couvert avec des espèces arborescentes sur rejets miniers sont encore mal connues. Bien que les racines assurent plusieurs rôles cruciaux pour les arbres, peu d'études ont été réalisées sur le développement racinaire des arbres sur des stériles miniers. Notamment, les racines jouent un rôle essentiel dans l'alimentation hydrique et minérale ainsi que pour assurer l'ancrage des arbres.

Ce projet de doctorat consiste à étudier l'influence de différents agencements de plantation sur la survie et le développement racinaire pour assurer l'ancrage et l'alimentation hydrique des peupliers hybrides plantés sur des pentes de stériles miniers recouvertes de sol superficiel. On a étudié les modifications et les changements importants au niveau du système racinaire, en réponse à différents facteurs. Les principaux facteurs considérés sont : l'espacement entre les arbres, l'hydroensemencement herbacé, la qualité de la couverture de sol, et le matériel de plantation.

Cette étude s'est déroulée dans une mine d'or à ciel ouvert située dans la forêt boréale canadienne à Malartic, Québec, Canada. Dans le cadre de cette étude deux plantations de peupliers hybrides ont été installées en 2013 sur des pentes de stériles miniers (33 %) recouvertes de sol.

La première plantation de peuplier hybride (*P. maximowiczii* A. Henry × *P. balsamifera* L. [M × B] – clone 915 319), visait à étudier l'effet de la compétition inter et intra-spécifique sur l'exposition au stress hydrique, le développement racinaire ainsi que sur l'ancrage des arbres plantés. Quatre traitements répartis aléatoirement dans trois blocs de répétition (total de 12 parcelles expérimentales) ont été évalués : 1 × 1m (10 000 tiges/ha) ; 4 × 4 m (625 tiges/ha) ; 2 × 2 m sans hydroensemencement (2 500 tiges/ha) ; 2×2 m avec hydroensemencement herbacé.

La deuxième plantation de peuplier hybride (*Populus maximowiczii* × *Populus balsamifera* (M × B) - clone 915318) a été établie pour évaluer l'effet de différents matériaux de plantation (boutures, plançons et plants à racines nues) ainsi que de la qualité du sol (50 cm de sol superficiel versus 40 cm de sol minéral + 10 cm de sol superficiel) sur le développement des racines grossières et l'ancrage des arbres. Le dispositif en blocs aléatoires comporte 18 parcelles expérimentales, soit 3 blocs (répliquats) × 3 matériaux de plantation × 2 qualités du sol.

Les résultats de cette étude confirment la possibilité d'utiliser le peuplier hybride pour revégétaliser les sites miniers, notamment les pentes de roches stériles. Ainsi, quatre ans après plantation, les deux clones de peupliers hybrides testés dans cette étude ont montré un taux élevé de survie (>95 %).

Les peupliers hybrides ont répondu à l'intensification de la compétition pour les ressources, résultant de la diminution de l'espacement entre les arbres et de l'ensemencement herbacé, par une diminution de potentiel hydrique la 3^e année après plantation. La réaction des peupliers vis-à-vis de la contrainte hydrique engendrée par la compétition a été caractérisée par une réduction de la croissance aérienne (hauteur maximale, diamètre basal) ainsi que par la diminution de la surface foliaire des arbres. Au niveau des racines, les peupliers hybrides ont investi plus d'énergie pour un contact plus élevé avec les nutriments et l'eau diffus dans le sol, en augmentant leur longueur de racines fines (<2 mm) par volume de sol et leur longueur par unité de masse racinaire. Ces modifications au niveau aérien et souterrain constituent une acclimatation du clone utilisé aux conditions de stress hydrique.

Les résultats montrent qu'un niveau de compétition plus élevé peut réduire l'ancrage des arbres. En effet, les résultats des tests d'arrachement latéraux réalisés à la quatrième saison de croissance montrent que la résistance maximale à la force d'arrachement observée dans les deux traitements avec un niveau plus élevé de compétition a été plus faible que les deux autres traitements. L'analyse de l'architecture racinaire a révélé un système racinaire plus ramifié des arbres des traitements 2 × 2 m et 4 × 4 m. Les peupliers hybrides dans ces parcelles ont été également caractérisés par des diamètres racinaires moyens plus élevés et un nombre total de racines plus élevé. Les deux traitements 2 × 2 m et 4 × 4 m pourraient donc être recommandés comme espacement entre les arbres, pour revégétaliser les pentes de stériles miniers.

Après quatre saisons de croissance, la résistance maximale à l'arrachement n'a pas été affectée par le matériel de plantation (boutures, plançons et plants à racines nues) ou la qualité de sol de couverture (50 cm de sol superficiel versus 40 cm de sol minéral + 10 cm de sol superficiel). Il n'y a pas de différence significative pour l'architecture racinaire et la stabilité des arbres plantés en fonction des trois types de plants utilisés ou de la qualité de sol. Notamment, le nombre de racines latérales, le diamètre moyen des racines, la biomasse racinaire, la biomasse aérienne et le rapport aérien/souterrain n'ont pas été affectés par les deux facteurs étudiés. La survie et la croissance des arbres (hauteur maximale, diamètre basal) n'ont également pas été affectées par le matériel de plantation ou la qualité de sol.

En examinant certains facteurs de l'agencement de plantation qui influencent le développement du système racinaire des arbres, ce projet de doctorat a permis de préciser des conditions permettant de pérenniser la reconstitution d'un couvert végétal avec les arbres, dans les sites miniers. L'étude a fourni une compréhension quantitative et qualitative de l'effet des facteurs étudiés sur l'architecture racinaire du peuplier hybride sur des pentes de stériles miniers, ce qui pourrait permettre de servir de base pour des recommandations sur l'agencement de plantation à adopter pour le reboisement des pentes de stériles.

Mots clés : réhabilitation de sites miniers; végétalisation de sites miniers; stériles miniers; arbre à croissance rapide; développement racinaire; architecture racinaire; pente; compétition; ancrage des arbres, tests d'arrachement, sol superficiel, mort-terrain.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	vii
LISTE DES FIGURES	xiv
LISTE DES TABLEAUX	xix
ACRONYMES	xxi
Chapitre 1 INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
1.1 Contexte et problématique.....	1
1.2 Originalité du projet	3
1.3 Contribution scientifique de la thèse	4
Chapitre 2 REVUE DE LITTÉRATURE.....	6
2.1 Industrie minière	6
2.1.1 Industrie minière au Canada et au Québec	6
2.1.2 Types de rejets miniers	7
2.2 Revégétalisation des sites miniers.....	8
2.3 Développement racinaire des arbres	10
2.3.1 Les racines	10
2.3.2 Architecture du système racinaire.....	15
2.3.3 Méthodes d'étude des racines	18
2.4 Espèce utilisée dans l'étude : peuplier hybride	25
2.5 Stress hydrique	30
2.5.1 Définition	30
2.5.2 Compétition intra- et interspécifique et exposition des arbres au stress hydrique.....	33
2.5.3 Acclimatation des peupliers hybrides au déficit hydrique.....	34
2.6 Ancre des arbres	34
2.6.1 Stabilité et ancrage des arbres.....	34

2.6.2 Caractéristique du substrat et ancrage des arbres	36
2.6.3 Le choix du matériel de plantation	37
2.6.4 Effet de la compétition sur la stabilité des arbres	40
2.7 Objectifs de la thèse	40
2.7.1 Objectif général.....	40
2.7.2 Objectifs spécifiques	41
Chapitre 3 MÉTHODOLOGIE	42
3.1 Site d'étude.....	42
3.2 Dispositif expérimental	43
3.3 Protocole expérimental.....	45
3.3.1 Suivi lié au déficit hydrique dans les arbres	45
3.3.2 Suivis reliés à la stabilité des arbres	47
Chapitre 4 ARTICLE 1	51
4.1 Abstract	51
4.2 Introduction	53
4.3 Materials and method	56
4.3.1 Site description	56
4.3.2 Plant material and substrate	57
4.3.3 Experimental design	60
4.3.4 Measurements	62
4.3.5 Statistical tests.....	65
4.4 Results	66
4.4.1 Growth and survival.....	66
4.4.2 Exposure to water stress	68
4.4.3 Water stress indicators	70
4.4.4 Nutrient and metal concentrations	72
4.4.5 Root development	73
4.5 Discussion	76
4.5.1 Water and nutritional stress exposure and tolerance of poplars planted on a waste rock slope	76
4.5.2 Variation in water stress exposure based on competition and response of poplars in terms of stress indicators	77

4.5.3 Poplar acclimatization to water stress explaining tolerance below and aboveground	79
4.6 Conclusion.....	81
4.7 Acknowledgements	81
4.8 Disclosure statement	82
4.9 Funding.....	82
Chapitre 5 ARTICLE 2	83
5.1 Abstract	83
5.2 Introduction	87
5.3 Materials and methods	91
5.3.1 Site description	91
5.3.2 Experimental design	91
5.3.3 Substrate.....	92
5.3.4 Plant material	93
5.3.5 Measurement and analysis	93
5.3.6 Statistical analysis.....	102
5.4 Results	103
5.4.1 Lateral uprooting tests	103
5.4.2 Hybrid poplars biomass	106
5.4.3 Root architecture.....	108
5.5 Discussion	115
5.5.1 Mechanical resistance of hybrid poplars	115
5.5.2 Roots architecture	116
5.5.3 Growth and biomass	119
5.6 Conclusions	120
5.7 Acknowledgements	121
Chapitre 6 ARTICLE 3	122
6.1 Abstract	122
6.2 Introduction	126
6.3 Materials and methods	130
6.3.1 Site description	130

6.3.2 Experimental design	130
6.3.3 Planting material and growing conditions	132
6.3.4 Measurements, sampling, and analysis.....	136
6.3.5 Statistical tests.....	140
6.4 Results	140
6.4.1 Growth, survival, and poplar biomass	140
6.4.2 Root architecture.....	145
6.4.3 Lateral uprooting tests	148
6.5 Discussion	150
6.6 Conclusion.....	154
6.7 Acknowledgements	155
6.8 Funding.....	155
Chapitre 7 DISCUSSION GÉNÉRALE.....	156
7.1 Développement racinaire des peupliers hybrides plantés sur des pentes de stériles miniers	156
7.2 Effet de la compétition sur l'exposition au stress hydrique des peupliers hybrides	164
7.3 Effet des facteurs étudiés sur l'ancrage des arbres.....	169
Chapitre 8 CONCLUSIONS RECOMMANDATIONS ET PERSPECTIVES	173
8.1 Principaux résultats et contributions de l'étude	173
8.2 Limites de l'étude et recommandations	178
BIBLIOGRAPHIE.....	182

LISTE DES FIGURES

Figure	Page
2.1 Trois types d'architecture racinaire a) traçant, b) mixte c) pivotant (Kölster et al., 1968).....	16
2.2 Architecture racinaire des arbres en l'absence de contraintes hydriques, nutritionnelles et pédologiques (a- 2 dessins du haut), et en présence de forte contraintes (b- 2 dessins du bas). (Foussadier, 2003).....	17
3.1 Vue du parc à résidus de la Mine Canadian Malartic (Crédit : Mine Canadian Malartic)	43
3.2 Schéma de la démarche méthodologique adoptée.....	50
4.1 Plantation and experimental design. 4 × 4 m: Plots without hydroseeding and 4 × 4 m tree spacing; 2 × 2 m: Plots without hydroseeding and 2 × 2 m tree spacing; 1 × 1 m: Plots without hydroseeding and 1 × 1 m tree spacing; 2×2h m: Plots with hydroseeding and 2 × 2 m tree spacing; T: Plots without hydroseeding and without trees	61
4.2 Sampling method of soil cores and roots	64
4.3 Effect of treatment (4 × 4 m, 2 × 2 m, 1 × 1 m tree spacing, and 2×2h m 2×2h m combined with herbaceous seeding) on maximum height (cm) (a) and basal diameter (mm) (b) of hybrid poplar stems at planting (spring 2013) and at the end of each growing season from 2013 to 2016. Mean (SE). N ≥ 36. For each year, mean values that differ significantly (p <0.05) are marked with different letters (a> b).....	67

4.4 (a) Effect of treatment (4×4 m, 2×2 m, 1×1 m tree spacing, and 2×2 h m combined with herbaceous seeding) on soil volumetric water content from July to August 2015. For each year, mean values that differ significantly ($p < 0.05$) are noted with different letters (a>b>c). (b). Monthly precipitation in 2015 and normal precipitation calculated for 1981–2010	69
4.5 Effect of treatment (4×4 m, 2×2 m, 1×1 m tree spacing, and 2×2 h m combined with herbaceous seeding) on foliar water potential (a), specific leaf area (b), and ratio of total leaf area to total fine root length cm/cm (c). Mean values that differ significantly ($p < 0.05$) are noted with different letters (a>b>c)	71
4.5 Effect of treatment (4×4 m, 2×2 m, 1×1 m tree spacing, and 2×2 h m combined with herbaceous seeding) on foliar water potential (a), specific leaf area (b), and ratio of total leaf area to total fine root length cm/cm (c). Mean values that differ significantly ($p < 0.05$) are noted with different letters (a>b>c)	72
4.6 Effect of treatment 4×4 m, 2×2 m, 1×1 m tree spacing, and 2×2 h m combined with herbaceous seeding) and soil depth (0–10, 10–20, 20–30, 30–40 cm) on SRL (a) RLD (b) RTD (c) and dry matter (d) ($N = 18$) for poplar fine roots. For the same depth, parameters that differ significantly ($p < 0.05$) are noted with different letters (a>b>c).....	74
4.6 Effect of treatment 4×4 m, 2×2 m, 1×1 m tree spacing, and 2×2 h m combined with herbaceous seeding) and soil depth (0–10, 10–20, 20–30, 30–40 cm) on SRL (a) RLD (b) RTD (c) and dry matter (d) ($N = 18$) for poplar fine roots. For the same depth, parameters that differ significantly ($p < 0.05$) are noted with different letters (a>b>c)	75
5.1 Schematic illustration of lateral uprooting tests	95

5.2	Trenches made with a mechanical shovel to observe the vertical profile of roots	97
5.3	Root count grid applied to the vertical walls of the trenches	98
5.4	Photograph of root excavation	100
5.5	Equation used for calculating the root anchorage index. An is the angle between the lateral roots of the upper side of the slope and the line separating upper and lower slope; dn is the diameter of the corresponding structural roots (cm); L1 is the length of the root; and P is the maximum root depth (cm)	101
5.6	Effect of the 4×4 m, 2 × 2 m, 1 × 1 m, and 2×2h m treatments combined with herbaceous seeding (2 × 2hm) on the maximum resistance to the uprooting force after four growing seasons (2016). Mean ± SE, N = 3. Mean values that differ significantly ($P < 0.05$) are marked with different letters a>b	104
5.7	Effect of the 4×4 m, 2 × 2 m, 1 × 1 m, and 2×2h m treatments combined with herbaceous seeding (2×2h m) on the uprooting force according to displacement after four growing seasons (2016). Mean ± SE, N = 3	105
5.8	Poplar root (a) density (roots/dm ²), (b) occurrence (%), along a 5-cm layer in a 1 × 1 m observation trench for all tested treatments (4×4 m , 2 × 2 m, 1 × 1 m, and 2 × 2 m spacing combined with herbaceous seeding (*2 × 2hm) after four growing seasons (2016). N = 3. Mean values that differ significantly at $P < 0.05$ are marked with different letters a>b	109
5.9	Pictures showing typical root systems of a tree in each of the four treatments (4×4m and 2 × 2m, 1 × 1m and 2 × 2m combined with herbaceous seeding. 2 × 2hm)	110

5.10 Root anchorage indexes I1(a) and I2 (b) among the four tested treatments (4×4 m, 2 × 2 m, 1 × 1 m, and 2 × 2m combined with herbaceous seeding: 2 × 2hm). Mean (SE), N=3. Mean values that differ significantly at 0.05 are marked with different letters a> b	112
5.11 Variation of root anchorage indexes I1 (a) and I2 (b) in the area under the curve. N = 12	114
6.1 Plantation and experimental design.....	131
6.2 Illustration of the three planting material types	135
6.3 Trenches made with a mechanical shovel to determine the maximum rooting depth	136
6.4 Equations used to calculate the root anchorage indexes, A _n : angle between the main lateral roots of the upslope side and the line separating upper and lower slope, d _n : diameter of the corresponding structural roots (cm), L: length of the root, P: maximum rooting depth (cm)	138
6.5 Maximum height (cm) of whips, cuttings, and bareroots on topsoil and mineral soil at planting (spring 2013) and at the end of each growing season from 2013 to 2016. Mean ± SE, N=75. Mean values that differed significantly at P <0.05 are marked with different letters at each date, a> b	143
6.6 Comparison of root anchorage indexes I1(a) and I2 (b) for the three types of planting material (whips, cuttings, and bareroots) on topsoil and mineral soil, after four growing seasons (2016). Mean ± SE, N =3. Mean values that differed significantly at P <0.05 are marked with different letters, a> b	147
6.7 Comparison of the maximum resistance force for the three types of planting material (whips, cuttings, and bareroots) on topsoil and mineral soil, after four growing seasons (2016).	

Mean \pm SE, N = 3. Mean values that differed significantly at P < 0.05 are marked with different letters, a>b	148
6.8 Effect of treatments (Topsoil: whips, cuttings, and bareroots; Mineral soil: whips, cuttings, and bareroots) on the uprooting force according to displacement after four growing seasons (2016). Mean \pm SE, N = 3	149
7.1 Effet des facteurs étudiés sur le développement racinaire des peupliers hybrides plantés sur des pentes de stériles miniers.....	162
7.2 Réponse du peuplier au stress hydrique engendré par la compétition inter- et intra-spécifique	165
8.1 Sommaire des résultats de l'étude.....	177

LISTE DES TABLEAUX

Tableau	Page
2.1 Quelques exemples pour montrer la diversité des limites de diamètre entre les racines fines et grossières dans la littérature.....	13
2.2 Principales techniques d'étude du système racinaire.....	19
2.3 Distribution et architecture racinaire des peupliers dans la littérature.....	28
2.4 Caractéristiques de trois types de matériel de plantation de peuplier hybride utilisés au Québec (DesRochers et Tremblay, 2009; Drénou, 2006; Ménétrier, 2008).....	39
4.1 Initial soil and waste rock characteristics. All values are expressed on a dry matter basis. EC is electrical conductivity and OM is organic matter content. *Mean ± SE; N = 15. **Québec Government (2019)	59
5.1 Area under curve according to treatments (4×4, 2 × 2, 1 × 1, and 2 × 2 m spacings combined with herbaceous seeding, 2×2h m). Mean±SE, N =3. Mean values that differed significantly at P <0.05 are marked with different letters, a> b	106
5.2 Effect of the 4×4 m, 2 × 2 m, 1 × 1 m, and 2 × 2 m spacings combined with herbaceous seeding, 2×2h m) on poplar biomass, diameter and maximum height after four growing seasons (2016). Mean±SE, N =3. Mean values that differed significantly at P <0.05 are marked with different letters, a> b	107
5.3 Effect of the treatments (4×4 m, 2 × 2 m, 1 × 1 m, and 2 × 2 m combined with herbaceous seeding (2×2h m) on architectural root (diameter> 4 mm) variables after four growing seasons (2016). N = 3. Mean values that differ significantly at 0.05 are marked with different latters a> b.....	111
6.1 Initial soil and waste rock characterizations. All values are expressed on a dry matter basis. Where applicable, values represent mean ±	

standard error; N = 18 except for the waste rocks. EC = electrical conductivity; OM = organic matter.....	134
6.2 Effect of treatment on poplar survival rate (%) at each growing season (2013: first growing season; 2014: second growing season; 2015: third growing season; 2016: fourth growing season). Mean \pm SE, N = 75. Mean values that differed significantly at P <0.05 are marked with different letters, a> b	142
6.3 Effect of treatments (Topsoil: whips, cuttings, and bareroots; Mineral soil: whips, cuttings, and bareroots) on hybrid poplar biomass, diameter, and maximum height after four growing seasons (2016). Mean \pm SE, N =3. Mean values within a column that differed significantly at P <0.05 are marked with different letters, a> b. Ba = aboveground biomass; Bb = belowground biomass; Ba/Bb =above/belowground biomass.....	144
6.4 Effect of treatments (Topsoil: whip, cutting, bareroot; Mineral soil: whip, cutting and bareroot) on architectural root (diameter> 4 mm) variables after four growing seasons (2016). N = 3. Mean values that differed significantly at P <0.05 are marked with different letters, a> b ...	146
7.1 Comparaison de l'effet de la compétition inter et intra-spécifique sur l'architecture racinaire et la stabilité des peupliers hybrides	163

ACRONYMES

A _n	Angle entre les racines latérales
d	Diamètre des racines structurales
DMA	Drainage minier acide
EC	Conductivité électrique
	1er Indice d'ancrage racinaire calculé normalisé par la somme
I ₁	des diamètres
	2e Indice d'ancrage racinaire calculé multiplié par la profondeur
I ₂	maximale des racines et divisé par la profondeur du sol
L	Longueur des racines
LA/ RL	Surface foliaire/Longueur racinaire
OM	Matière organique
P	Enracinement maximal
	Densité de longueur des racines Longueur des racines/volume
RLD	de sol cm/cm ³)
	Densité des tissus racinaire = masse sèche racinaire/volume
RTD	racinaire g/cm ³)
SLA	Surface foliaire totale/masse sèche totale en cm ² /g
	Surface spécifique racinaire = surface/masse sèche racinaire
SRA	cm ²
	Longueur spécifique racinaire = Longueur des racines /masse
SRL	sèche racinaire cm/g
VWC	Teneurs en eau volumique

CHAPITRE 1

INTRODUCTION GÉNÉRALE

1.1 Contexte et problématique

Les industries minières jouent un rôle important dans le développement économique de plusieurs communautés dans le monde (Worlanyo et Jiangfeng, 2020; Widana, 2019). Les retombées économiques de l'industrie minière au Québec sont importantes. En effet, le secteur minier a créé environ 40 000 emplois directs et indirects dans l'année 2018, et un produit intérieur brut (PIB) de l'ordre de 9 G\$ a été engendré dans la province par le secteur minier, pour la même année (Association minière du Canada, 2020). Toutefois, l'activité minière a des impacts environnementaux considérables. La destruction de la végétation et la perturbation du paysage naturel sont parmi les effets négatifs les plus marquants (Festin et al., 2019 ; Mensah et al., 2015). Au Canada et au Québec, il y a plusieurs lois et règlements qui encadrent le secteur minier et qui visent à diminuer l'empreinte écologique de cette activité. Notamment, l'entreprise minière doit faire approuver son plan de réaménagement et de restauration par le ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (MERN) avant le démarrage des opérations minières (MDDELCC, 2016). Ce plan doit garantir entre autres la mise en végétation de tous les lieux affectés par les opérations minières et l'intégration du site restauré dans le paysage naturel une fois la mine fermée.

Des quantités importantes de rejets miniers solides sont générées durant les différentes phases du cycle minier. Parmi ces rejets, les stériles miniers plus particulièrement sont problématiques (Aubertin et al., 2002) et la revégétalisation des aires d'accumulation de ces rejets (haldes à stériles) présente des enjeux majeurs pour les compagnies minières. À cause de leurs caractéristiques physico-chimiques, les stériles miniers ne sont pas un milieu propice pour le rétablissement d'un couvert végétal (Mench et al., 2003). En effet, la pente naturelle abrupte des empilements d'entreposage (37° ou 1,2 h : 1 v) ainsi que la granulométrie très hétérogène des roches stériles peuvent influencer les mouvements et donc la disponibilité d'eau dans les pentes de stériles (Peregoedova, 2012). Le drainage rapide sur les pentes de stériles miniers peut exposer les plantes au stress hydrique. La revégétalisation des sites miniers est généralement effectuée avec des plantes herbacées (Burger et Zipper, 2002), toutefois elles peuvent être très compétitives vis-à-vis des semis d'espèces arborescentes des écosystèmes forestiers et gêner leur établissement (Skousen et al., 2006; Bouchard et al., 2019). Les plantations d'arbres peuvent favoriser la colonisation par des espèces locales de la forêt adjacente (Nichols et al., 2010 ; Strong, 2000). Toutefois, il y a peu d'études sur l'utilisation des arbres pour la revégétalisation des mines de minerais métallifères. De plus, c'est surtout la partie aérienne des arbres qui est généralement prise en considération dans les recherches sur la revégétalisation avec des arbres. Le développement racinaire joue un rôle crucial dans l'alimentation hydrique et minérale ainsi que dans l'ancrage des arbres. Mais, ce paramètre a été rarement considéré dans les recherches portant sur l'utilisation des arbres dans la revégétalisation des sites miniers, en particulier sur les pentes de stériles miniers dans les régions boréales.

Pour assurer une revégétalisation responsable et pérenne des pentes de stériles miniers avec les arbres, il est primordial de comprendre les conditions qui vont contrôler le développement racinaire, la croissance et la survie des arbres et d'évaluer les différents scénarios de plantation en conséquence. Ainsi, ce projet vise

à déterminer des agencements de plantation permettant d'assurer la pérennité des arbres et leur ancrage sur les pentes de stériles, en examinant particulièrement certains facteurs qui influencent le développement du système racinaire (l'espacement des arbres, la compétition herbacée, la qualité du sol, et le matériel de plantation).

1.2 Originalité du projet

Ce projet de doctorat est original et novateur. La nouveauté de l'étude se justifie par les éléments suivants :

- i. Les arbres sont rarement utilisés pour végétaliser les pentes de stériles. Peu d'études se sont penchées sur les conditions qui favorisent le rétablissement d'un couvert arboré sur les pentes de stériles miniers, en particulier dans les régions forestières du Canada.
- ii. Le développement des racines a reçu une attention limitée dans les études de revégétalisation des mines malgré le rôle crucial qu'il joue dans l'approvisionnement en eau des plantes et leur survie dans des conditions de stress hydrique. Dans le contexte des pentes de stériles, un drainage rapide peut exposer les arbres plantés au stress hydrique.
- iii. Les systèmes racinaires jouent un rôle important dans l'ancrage et la stabilité des arbres, mais sont rarement pris en compte.
- iv. C'est une étude qui a examiné l'architecture racinaire et la stabilité des arbres plantés dans les pentes de stériles en utilisant différents types de matériel de plantation et en faisant varier la qualité du sol.

- v. Cette étude intègre les propriétés du système racinaire et l'ancrage des arbres plantés, et évalue et compare les effets de la compétition intra et interspécifique.

1.3 Contribution scientifique de la thèse

Les connaissances acquises durant cette étude sont valorisées par la production des articles scientifiques publiés, soumis ou destinés à la publication dans des revues avec comité de lecture, et par une communication orale dans une conférence internationale. Je suis l'auteure principale des articles rédigés dans le cadre de cette thèse. J'ai moi-même effectué la collecte et l'analyse des données ainsi que la rédaction des articles avec la supervision et le soutien de ma directrice Marie Guittonny et mes co-directeurs Bruno Bussière et Guy Larocque.

Article publiés ou soumis :

Chapitre 4. Effects of spacing and herbaceous hydroseeding on water stress exposure and root development of poplars planted in soil-covered waste rock slopes. 2019. *Ecoscience*, 26(2), 149-163.

Babi, K., Guittonny, M., Larocque, G. R., & Bussière, B.

Chapitre 5. Influence of competition on root architecture and root anchorage of hybrid poplar plantations in waste rock slopes. (*Plant and Soil*- resubmitted)

Babi, K., Guittonny, M., Bussière, B., & Larocque, G. R.

Chapitre 6. Effect of soil quality and planting material on root architecture and root anchorage of hybrid poplar plantations in waste rock slopes. (*International Journal of Mining, Reclamation and Environment* -under review)

Babi, K., Guittonny, M., Bussière, B., & Larocque, G. R.

Communication orale:

Tree spacing and herbaceous hydroseeding effects on root development in plantations on mine waste rock slopes. Communication orale présenté à la conférence internationale sur les phytotechnologies.

Babi, K., Guittonny, M., Larocque, G. R., & Bussière, B.

CHAPITRE 2

REVUE DE LITTÉRATURE

2.1 Industrie minière

2.1.1 Industrie minière au Canada et au Québec

L’exploitation minière constitue un important vecteur de développement économique et social au Canada et au Québec. En effet, le secteur minier a constitué 3,6 % du PIB canadien en 2017 (RNCAN, 2019). Le contexte géologique est favorable à une activité minière très variée. Le pays fait partie des cinq premiers producteurs internationaux pour 17 métaux et substances minérales (Association minière du Canada, 2010). Cependant, cette industrie génère des impacts environnementaux non négligeables.

Pour faire face aux répercussions des activités minières, la législation canadienne fait référence à des lois, règlements et directives. Plusieurs règlements existent au niveau provincial, entre autres, la Loi sur les mines qui encadre les activités minières, notamment qui exige la production d’un plan de restauration couvrant la remise dans un état satisfaisant des lieux, le rétablissement de la végétation, et la réduction de l’érosion afin de faciliter l’intégration du site restauré dans le milieu environnant. Au niveau fédéral également les règlements imposent la remise en état des zones perturbées, d’assurer la protection contre l’érosion, et de rétablir la végétation.

2.1.2 Types de rejets miniers

Les mines génèrent divers types de rejets solides et liquides qui peuvent avoir des impacts environnementaux importants (Bussière, 2010). Les principaux rejets miniers solides sont :

- ✓ Mort-terrain : il est défini dans la directive 019 comme un « *Matériaux non consolidés recouvrant un gisement ou le socle rocheux* ». Il est issu de travaux de décapage et d'excavation, dans le cas des mines à ciel ouvert, afin d'installer les opérations minières. Le mort-terrain non contaminé est généralement utilisé pour la construction des routes, et le remblai. L'excédent du mort-terrain doit être stocké et conservé pour être utilisé lors de la phase de restauration du site. Il faut procéder à la séparation de la partie organique (sol superficiel ou végétal) et le conserver pour la revégétalisation (Gouvernement du Québec, 2012). Dans les zones où le sol superficiel est absent, le choix de matériaux de substitution constitue une étape primordiale pour la remise en état du site miner, en particulier dans le cas des mines à ciel ouvert. La gestion du terrain contaminé doit se faire selon les règles du « *Guide de caractérisation des terrains et de la Politique de protection des sols et de réhabilitation des terrains contaminés* » (MENV, 2003). Les piles de morts terrain et de terre végétale stockés séparément doivent être revégétalisées pour prévenir l'érosion.
- ✓ Stériles : sont les roches sans valeurs commerciales qui doivent être enlevées pour accéder au gisement. Ils ne contiennent pas de minéraux ayant une valeur économique. Ils sont généralement entreposés dans des haldes à stériles (Benzaazoua et al., 2013). Ces dernières sont des structures complexes en raison de la variabilité des propriétés in situ des stériles (Herasymuk, 1996 ; Aubertin et al., 2002) ainsi que de la méthode de construction des haldes. Le principal défi relié aux stériles est la stabilité physique et chimique (Drainage minier acide, DMA, Plante et al., 2021).

- ✓ Résidus de concentrateur : roches finement broyées provenant du traitement du minerai dans l'usine de concentration, envoyés par pompage vers le parc à résidus.
- ✓ Boues de traitement des eaux : issues du traitement chimique des eaux minières.

2.2 Revégétalisation des sites miniers

La revégétalisation consiste à rétablir et reconstituer un couvert végétal avec des plantes herbacées, arbustives ou arborescentes. La revégétalisation a comme principaux objectifs le contrôle de l'érosion, le rétablissement du paysage et la restauration écologique. Cette dernière est définie par la Society for Ecological Restoration International (S.E.R., 2002) comme « *le processus d'assister l'autorégénération des écosystèmes qui ont été dégradés, endommagés ou détruits* ».

Depuis des années les entreprises minières ont mené des programmes de revégétalisation, afin de redonner une meilleure image à l'industrie minière, diminuer les impacts sociaux et environnementaux des aires d'entreposage et répondre aux exigences règlementaires.

Les premières recherches ont commencé en Nouvelle-Calédonie (mines de nickel) où des espèces commerciales herbacées ont été utilisées (Jaffré et Latham, 1977). Par la suite plusieurs recherches ont été réalisées pour développer des stratégies qui répondent le mieux aux objectifs de la revégétalisation (Macdonald et al., 2015 ; Larchevêque et al., 2013 ; Mendez et al., 2007 ; Rey et al., 2004 ; Cooke et Johnson, 2002 ; Tordoff et al., 2000 ; Bradshaw et Johnson, 1992).

La revégétalisation des sites miniers est une technique qui présente de multiples avantages. En effet, l'établissement d'un couvert végétal diminue le ruissellement des eaux tout en favorisant l'infiltration. Il en résulte une régulation du débit

hydrique et une diminution du déplacement des sédiments. La revégétalisation protège également le sol contre l'érosion en diminuant l'effet des agents érosifs (vents, précipitations, etc.). De plus, le système racinaire améliore les propriétés du sol et assure une meilleure cohésion. La végétation produit une litière végétale qui augmente la capacité de rétention en eau du sol et diminue davantage le ruissellement. Le couvert végétal constitue un réservoir d'éléments minéraux, et il diminue l'échauffement du sol (Rey et al., 2004)). Les plantations servent également d'habitat pour la faune, qui à son tour favorise leur développement par le transport des semences et la pollinisation (L'Huillier et al., 2010). La plantation d'arbres présente des avantages évidents pour la végétalisation des mines qui visent à réaliser la remise en état rapide des paysages forestiers. En effet, l'installation des arbres permet d'avoir une plus grande biodiversité de l'écosystème et facilite la relocalisation des espèces végétales locales (Macdonald et al., 2015). Inversement, les espèces herbacées sont généralement compétitives pour l'eau, les éléments nutritifs et pour la lumière (Skousen et al., 2006), ce qui peut empêcher la mise en place des espèces locales.

Cependant, l'établissement d'un couvert végétal sur des sols miniers se heurte à plusieurs contraintes, notamment, les caractéristiques physico-chimiques inappropriées des rejets miniers (Mench et al., 2003). En effet, les stériles se caractérisent généralement par une carence en nutriments essentiels, de faibles teneurs en matière organique et en microorganismes (Burger et Zipper, 2002), de fortes concentrations en métaux lourds et un pH acide (DMA) ou trop alcalin. Les stériles miniers retiennent peu l'eau ce qui peut exposer les plantes au déficit hydrique (Tordoff et al., 2000). De plus, sur ces déchets miniers, le risque d'instabilité des arbres plantés à cause d'un développement racinaire inadéquat peut être élevé. Il y a d'autres éléments pouvant influencer le reverdissement, tels que la pente, le vent, les précipitations, et la chaleur. Donc, il est nécessaire d'étudier les possibilités de végétalisation par rapport à l'ensemble de ces éléments afin de

garantir le maintien et la durabilité de la végétation introduite. La couche superficielle de sol habituellement mise en place sur les stériles miniers constitue un substrat plus fertile et le type de sol est un déterminant important de la croissance des arbres sur les sites à restaurer (Zipper et al., 2011). Son utilisation pour recouvrir les stériles permet d'améliorer la productivité et les fonctionnalités biologiques du sol (Tordoff et al., 2000). Le mort terrain, issu du décapage et de l'excavation des mines à ciel ouvert avant l'installation des opérations minières, peut constituer également une partie des substrats (Sena, 2014).

Le succès de la revégétalisation dépend de l'adoption de meilleures pratiques qui permettront d'améliorer la survie et la croissance des plantes (Hobbs et al., 1992). Le choix de l'espèce, du type de sol et des différentes conditions de plantation, en fonction du contexte est une étape importante à prendre en compte pour établir un couvert végétal sur les stériles miniers.

2.3 Développement racinaire des arbres

2.3.1 Les racines

Les racines sont considérées généralement comme un organe souterrain de la plante. Chez certaines espèces telles que les épiphytes, les racines peuvent pousser au-dessus du sol (Fan et al, 2020; Jura-Morawiec et al., 2020; Yim et Kim, 2002). Les racines se forment très tôt dès la germination.

Le système racinaire est essentiel pour le fonctionnement, le développement et la pérennité des végétaux (Nunes et al., 2019). Les racines assurent plusieurs rôles fondamentaux :

- Alimentation en eau et en sels minéraux

Le système racinaire assure l'approvisionnement en eau et sels minéraux nécessaires pour le développement et la survie de la plante (Calvaruso et al., 2017; Sands et Mulligan, 1990; George et Marschner, 1996). L'absorption s'effectue au niveau des poils absorbants qui augmentent la surface de contact entre le sol et les racines (Gilroy et Jones, 2000). Plus les racines sont ramifiées plus cette surface est grande ce qui facilite les échanges. Le transport d'eau et des nutriments absorbés par les racines se fait par le xylème vers les autres parties de la plante (feuilles et tiges).

➤ Ancrage au sol

Les racines permettent de fixer et ancrer la plante dans le sol (Gyssels et al. 2005). En particulier chez les arbres où les racines grossières ont comme principal rôle d'assurer l'ancrage. Un problème au niveau de l'ancrage engendre un grand risque pour la survie de la plante. En effet, une défaillance au niveau de la stabilité expose la plante aux risques de déracinement avec un entraînement par le vent et/ou le ruissellement.

➤ Interactions avec des micro-organismes

Les racines peuvent servir de support pour les micro-organismes symbiotiques. De plus, elles peuvent contribuer à créer un habitat propice pour les micro-organismes du sol. Le carbone minéral fixé par la photosynthèse est transformé en carbone organique (glucides). Une partie importante est utilisée pour la croissance de la plante, le reste va être stocké sous forme de réserves (Aubrey et Teskey, 2018; Liu et al., 2009). Mais une partie de ces produits synthétisés va servir de source énergétique pour les micro-organismes symbiotiques dans le sol. Si ces produits sont libérés dans le sol (exsudats racinaires), ils peuvent être utilisés par les micro-organismes libres dans le sol (Nguyen, 2003). La perte des produits de photosynthèse par les racines est récompensée par la communauté rhizosphérique qui à son tour va assurer plusieurs fonctions vis-à-vis de la plante. Notamment la solubilisation des

nutriments (Vogelsang et al., 2006), la fixation d'azote atmosphérique (Daft et al., 1985), la protection contre les pathogènes (Whipps 2004).

➤ Stockage

Chez certaines espèces, les racines servent d'organes de réserves (carbone et azote) (Aubrey et Teskey, 2018; Drénou, 2006; Nguyen et al., 1990).

Le système racinaire des arbres est constitué de deux groupes de racines : fines (non ligneuses) et grossières de structure (ligneuses) (McClugherty et al., 1982 ; Drénou, 2006). Dans la littérature, les auteurs font la distinction des racines sur la base de leur diamètre, âge, ordre et fonctions (Liu et al., 2018 ; McCormack et al., 2015). La variabilité du diamètre des racines reflète une différence également de morphologie, anatomie et rôles (Berhongaray et al., 2013). Le tableau 2.1 présente la classification des racines en fonction de leurs diamètres dans la littérature.

La classification des racines en fonction de diamètre est la méthode la plus utilisée parce qu'elle est la plus pratique et la plus facile à mettre en œuvre (Baddeley et Watson, 2005; Thomas et al., 1996). La limite de diamètre entre les racines grossières et fines est généralement fixée à 2 mm (Böhm, 1979). Toutefois, cette définition est arbitraire et varie selon les études (tableau 2.1). Des auteurs reconnaissent que le diamètre des racines fines est inférieur à 1-2 mm et que celui des racines grossières peut aller de 2 mm à plusieurs décimètres (Wang, G., & Zhou, 2009 ; Cheng et al., 2006 ; Fahey et Hughes 1994 ; Hendrick et Pregitzer 1992). D'autres études considèrent toutes les racines avec un diamètre inférieur à 5 mm comme racines fines (Joslin et Henderson, 1987).

Tableau 2.1 Quelques exemples pour montrer la diversité des limites de diamètre entre les racines fines et grossières dans la littérature

Racines fines	Racines grossières	Espèce	Références
<2 mm	>2 mm	Peuplier allemand (<i>Populus tremula hybrids</i>)	Hilman et al., 2020
<1 mm	>5 mm	<i>Ostrya carpinifolia</i> Scop. (hop hornbeam)	Vidal-Beaudet et al., 2018
<2 mm	>2 mm	Peuplier hybride (<i>Populus × spp</i>)	Fortier et al., 2013
<2 mm	>5 mm	Hêtre (<i>Fagus sylvatica</i>)	Bakker et al., 2008
< 2 mm	>2 mm	Épinette de Norvège (<i>Picea abies</i>)	Schmid et Kazda, 2002
<5 mm	>5 mm	Sapin de Douglas (<i>Pseudotsuga menziesii</i>)	Curt et al., 2001
<1 mm		Peuplier hybride (<i>Populus × spp</i>)	Souch et William, 1997
<2 mm		Saule vannier (<i>Salix viminalis</i>)	Rytter et Hansson, 1996
<1 mm	>1 mm	Olivier (<i>Olea europaea</i>)	Fernandez et al., 1991
<5 mm		Chêne blanc (<i>Quercus alba</i>)	Joslin et Henderson, 1987

Principales caractéristiques des racines fines et grossières :

➤ Les racines fines (non ligneuses) :

- ✓ Petit diamètre (0.5-5mm)
- ✓ Allongement lent et limité dans le temps
- ✓ Courte durée de vie (inférieure à 1 an)
- ✓ Sens de croissance aléatoire
- ✓ Elles sont généralement mycorhizées
- ✓ Absorption d'eau et de nutriments comme principale fonction (Gilman, 1990; Gray, 2000)
- ✓ Fixation du sol (Gyssels et al. 2005)
- ✓ Cohésion du sol en constituant une armature

➤ Les racines grossières de structure (ligneuses) :

- ✓ Ancrage de la plante dans le sol comme principale fonction
- ✓ Elles sont ramifiées
- ✓ Elles portent les racines fines
- ✓ Sens de croissance vertical (géotropisme positif) ou horizontal
- ✓ Exploration de sol (croissance en longueur et en diamètre)
- ✓ Formées à partir du collet
- ✓ Production du xylème secondaire et bois
- ✓ Durée de vie longue (pérenne)
- ✓ Croissance en longueur importante

2.3.2 Architecture du système racinaire

L'architecture racinaire est la configuration spatiale des racines (Gregory, 2006), c'est-à-dire la taille et l'emplacement des racines grossières. La distribution en trois dimensions du système racinaire dans le sol est déterminée par la morphologie et la dimension des différentes parties du système racinaire ainsi que par la manière dont ces différentes parties sont reliées entre elles (Reubens et al., 2007). Plusieurs variables caractéristiques des racines principales peuvent être utilisées pour la description de l'architecture racinaire, notamment : la longueur des racines, le diamètre des racines, le nombre de ramifications, et les angles entre les racines (Garrett et al, 2009; Gregory 2006; Nicoll et al., 2006; Godin 2000; Fitter 1991; Godin et al. 1999; Harper et al.1991).

On peut distinguer trois types de structure racinaire chez les arbres (figure 2.1) : traçant (a), mixte (b) et pivotant (c) (Kölster et al., 1968) :

❖ Traçant

Dans un système racinaire traçant ou superficiel, la racine principale laisse la place rapidement à des racines traçantes latérales qui se développent horizontalement à partir du collet. Pour ce type d'enracinement, la surface du sol explorée par les racines latérales est grande, mais la profondeur est faible. C'est le cas par exemple du peuplier (*Populus sp.*), du robinier (*Robinia pseudoacacia*), et du frêne (*Fraxinus sp.*).

❖ Système mixte

Le système racinaire mixte est caractérisé par un pivot peu développé avec des racines horizontales émises à la base du collet de l'arbre. On le trouve par exemple chez les charmes (*Carpinus sp.*).

❖ Pivotant

Le système racinaire pivotant est caractérisé par une racine principale (pivot) sur laquelle des racines latérales (horizontales) se développent. Cette racine principale est plus large et plus longue, et elle a un taux de croissance plus rapide que les autres racines. Le pivot s'enfonce dans le sol verticalement et permet à l'arbre de s'ancrer en profondeur. C'est par exemple le type de système racinaire du pin (*Pinus sp.*), du chêne (*Quercus sp.*), et du noyer (*Juglans sp.*).

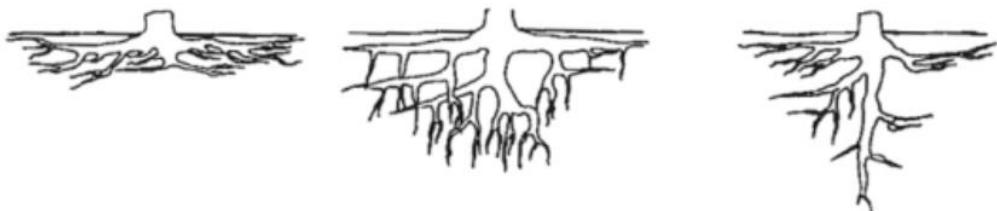


Figure 2.1 Trois types d'architecture racinaire a) traçant, b) mixte c) pivotant (Kölster et al., 1968)

Cette classification est toutefois assez simple et théorique. Ainsi, on peut trouver plus qu'un type de système racinaire, voir même des types intermédiaires, chez la même espèce d'arbres. De plus, un même arbre peut adopter plus d'une architecture durant son développement et transiter d'une distribution à une autre en fonction des facteurs environnementaux. En effet, l'établissement de l'architecture racinaire durant le développement des plantes est un processus complexe (Pagès et Pellerin, 1996). La structure racinaire est premièrement prédefinie génétiquement, mais plusieurs facteurs externes l'influencent par la suite, notamment, la distribution des

ressources (eau et nutriments), la compétition pour l'eau et les éléments minéraux, la structure ainsi que la texture du sol (Kano-Nakata et al., 2019 ; Morris et al., 2017).

Selon Foussadier (2003), les systèmes racinaires des arbres sont de type pivotant en absence de contraintes au niveau du substrat ou de la disponibilité de l'eau et des éléments minéraux (figure 2.2). Ces systèmes racinaires peuvent évoluer vers un système traçant lorsque les conditions locales sont contraignantes pour le développement en profondeur des racines. Après la germination, le pivot est généralement présent (Danjon et Fourcaud, 2009), toutefois il disparaît rapidement pour plusieurs espèces (Rimbault, 1991). Notamment pour certains genres comme le peuplier, le pivot devient très petit avec le vieillissement de l'arbre. Chez d'autres genres comme le pin, il peut se développer lorsque les conditions du milieu sont adéquates.

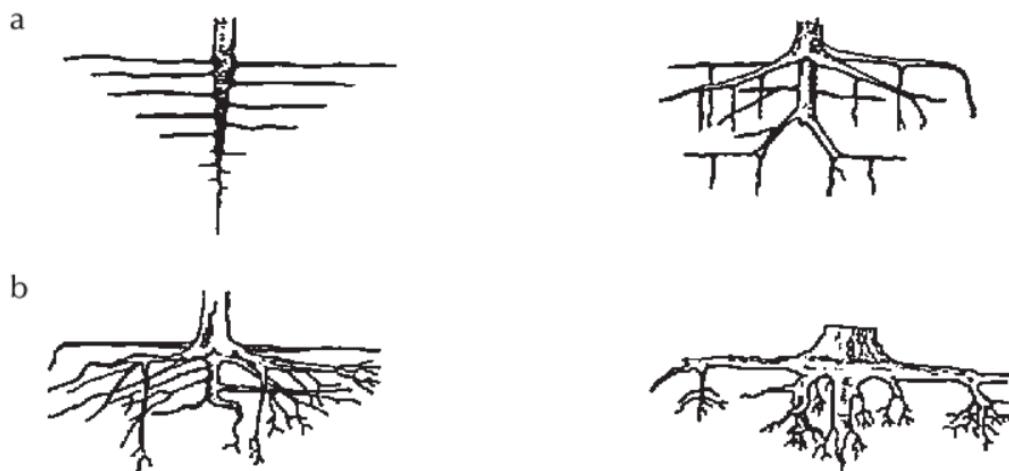


Figure 2.2 Architecture racinaire des arbres en l'absence de contraintes hydriques, nutritionnelles et pédologiques (a- 2 dessins du haut), et en présence de forte contrainte (b- 2 dessins du bas). (Foussadier, 2003)

Les fonctions principales du système racinaire sont l'acquisition des ressources en eau et des nutriments et l'ancre des plantes dans le sol. La réalisation de ces

fonctions peut orienter le développement des racines (Giehl et al., 2014 ; Kellermeier et al., 2014 ; Gruber et al., 2013 ; Miller et al., 2003 ; Fitter, 1991). Notamment les végétaux peuvent s'adapter à la disponibilité de l'eau et des éléments minéraux en changeant leur architecture racinaire (Cochavi et al., 2020 ; Peret et al., 2011 ; Miller et al., 2003). Par exemple, des études ont souligné que la carence de certains éléments comme le phosphore favorise la croissance des racines latérales (Cochavi et al., 2020 ; York et al., 2013).

Le système racinaire des plantes a la capacité de s'adapter et de s'ajuster en fonction des conditions environnementales, c'est ce qu'on appelle la plasticité développementale (Kano-Nakata et al., 2019 ; McCleery et al., 2017). La profondeur et l'intensité (nombre et densité des racines) de l'enracinement dépendent également des contraintes physiques du sol (Curt et al., 2001) qui peuvent limiter l'elongation des racines et donc modifier l'architecture de la plante (Ludovici, 2004).

2.3.3 Méthodes d'étude des racines

L'étude des systèmes racinaires est relativement difficile. En effet, il est difficile d'accéder et d'observer les racines qui sont une partie invisible de l'arbre (Gyssels et Poesen, 2003). De plus, les systèmes racinaires sont complexes, il y a une grande variété d'architectures racinaires au sein de la même espèce, le nombre des racines n'étant pas fixe. Il existe plusieurs techniques pour étudier et décrire le système racinaire. Toutefois, il n'y a pas une méthode parfaite qui permet d'avoir tous les paramètres liés à la description du système racinaire (Harper et al., 1991). Ainsi, la combinaison de plusieurs méthodes est généralement nécessaire pour fournir une information complète sur le système racinaire.

Le tableau 2.2 présente une synthèse des principales méthodes d'analyse du système racinaire trouvées dans la littérature.

Tableau 2.2 Principales techniques d'étude du système racinaire

Méthode	Principe	Avantages	Inconvénients	Références
Méthode destructive				
Carottage	<p>Prélever le sol à des emplacements prédefinis de l'arbre.</p> <p>Séparer le sol et les racines.</p> <p>Scanner les racines fines sélectionnées et les images sont traitées par logiciel (WinRhizo).</p>	<p>Cause peu de dégâts à l'arbre.</p> <p>Facile à mettre en œuvre.</p> <p>Plusieurs paramètres racinaires peuvent être mesurés.</p>	<p>Nécessité d'avoir un grand échantillon pour garantir la précision.</p> <p>Le travail est fastidieux si on veut faire des prélevements en profondeur du sol.</p> <p>La méthode donne seulement des mesures quantitatives pour une partie du système racinaire.</p> <p>Étude de racines fines seulement (diamètre <2 mm) et ne permet pas d'étudier la structure racinaire.</p>	Wu et al., 2018 Jourdan et al., 2008 Snowdon et al., 2002

Tableau 2.2 suite

Méthode	Principe	Avantages	Inconvénients	Références
Méthode destructive				
Méthode traditionnelle de mesure d'architecture -excavation	<p>Excavation du système racinaire en exerçant une haute pression d'eau ou d'air à partir d'une pompe.</p> <p>Le sol est enlevé et le système racinaire est visible en entier.</p> <p>Description du système racinaire complet.</p> <p>La description de la topologie et de la géométrie de tout le système racinaire est ensuite effectuée.</p>	<p>Observation du système racinaire complet.</p> <p>Description et mesures de plusieurs paramètres architecturaux (ramification, longueur, diamètre, angle entre les racines, etc.)</p>	<p>Méthode coûteuse en temps.</p> <p>Les racines peuvent se casser durant l'excavation.</p>	<p>Lu et al., 2019</p> <p>Domenicano et al., 2011</p> <p>Böhml, 1979</p>
Monolithe	<p>Prélèvement d'un volume de sol autour de l'arbre à l'aide d'une planche à clous après coupe manuelle.</p> <p>Les racines sont récoltées et séparées entre fines et grossières</p>	<p>On détermine ainsi la masse, le nombre et la distribution des racines.</p>	<p>Elle s'avère toutefois difficile à appliquer en présence de cailloux et en présence de sol friable.</p>	<p>Groot et al., 1998</p> <p>Mackie-Dawson et Atkinson, 1991</p>

Tableau 2.2 suite

Méthode	Principe	Avantages	Inconvénients	Références
Méthode destructive				
Méthode du profil	Observation des racines à l'aide de tranchées. La distribution, la profondeur, la présence, le nombre et le diamètre des racines sont notés.	Facile à mettre en place, ne nécessite pas de matériels couteux. Plusieurs paramètres racinaires sont déterminés.	Racines verticales non observables (pivot)	Guittonny-Larchevêque et Lortie, 2017 Falkiner et al., 2006 Curt et al., 1998
Numérisation magnétique 3 D	Le principe consiste à numériser le système racinaire excavé manuellement ou semi-automatiquement Acquisition de la configuration spatiale 3D du système racinaire.	Reconstituer une image complète de l'architecture racinaire. Analyser, mesurer et modéliser la structure des arbres. Résultats précis.	Coût élevé. Temps de numérisation et traitement de données très élevé. Traitements complexes des données.	Reubens et al., 2007 Danjon et al., 1999

Tableau 2.2 suite

Méthode	Principe	Avantages	Inconvénients	Références
Méthode destructive				
	<p>Numériseur le plus utilisé est le 3SPACE Fastrak.</p> <p>Traitement des données avec logiciels (AMAPmod).</p>	<p>Possibilité de numériser à la fois les racines fines et grossières.</p> <p>Possibilité de faire des mesures supplémentaires des racines (par ex. volume des racines).</p>	<p>Objets métalliques peuvent fausser les résultats.</p>	
Numériseur laser	<p>Reconstitution de la distribution en deux dimensions avec des possibilités pour une configuration en trois dimensions du système racinaire après excavation.</p>	<p>Récolte de plusieurs paramètres racinaires, distribution, volume, surface, etc.</p> <p>Résultats précis.</p> <p>Manipulation facile.</p>	<p>Perte d'information à cause de l'effet d'ombrage.</p> <p>Mauvaise acquisition pour les racines de diamètre inférieur à 2 mm.</p>	Gärtner et Denier, 2006.

Tableau 2.2 suite

Méthode	Principe	Avantages	Inconvénients	Références
Méthode destructive				
Photogrammétrie	Description en deux dimensions du système racinaire après excavation racinaire.	Facile à mettre en place. Quelques minutes pour la prise des vues.	Résultats peu précis. Perte d'information à cause de l'ombrage. Description incomplète de l'architecture racinaire (pas de 3D).	Lorenzo et Arias, 2005.
Méthode non destructive				
Rhizotron Minirhizotron	Étudier la structure racinaire et la dynamique de croissance à l'aide d'une vitre ou tube installé dans le sol	Peu de travail et suivi à réaliser. Plusieurs mesures racinaires.	Perturbation de la croissance racinaire. Description du système racinaire en deux dimensions seulement. Traitement complexe des données.	Hendricks <i>et al.</i> , 2006 ; Lecompte <i>et al.</i> , 2001 Taylor <i>et al.</i> , 1990

Tableau 2.2 suite

Méthode	Principe	Avantages	Inconvénients	Références
Méthode non destructive				
Radar	<p>Émission d'ondes électromagnétiques par le radar</p> <p>Détections des racines par la réflexion des émissions sur un récepteur.</p> <p>Traitements des signaux par des logiciels (Ex. WINRAD)</p> <p>Description de l'architecture racinaire en deux dimensions et trois dimensions.</p>	<p>Acquisition semi-automatique du système racinaire.</p> <p>Manipulation facile.</p>	<p>Coût élevé.</p> <p>Résultats peu précis.</p> <p>Effet du type de sol.</p>	<p>Drénou, 2006</p> <p>Stokes <i>et al.</i>, 1999</p>

2.4 Espèce utilisée dans l'étude : peuplier hybride

Le genre *Populus* appartenant à la famille Salicacées contient environ une trentaine d'espèces en plus de plusieurs hybrides naturels ou artificiels (Cervera et al., 2005). Les peupliers sont des arbres à croissance rapide très répandus dans le monde (Sharma et al. 2014; Rodriguez et al., 2010). Vingt-huit millions d'hectares (le tiers des quatre-vingt millions d'hectares de peupliers au monde) des espèces indigènes du peuplier se trouvent au Canada (van Oosten, 2004). Toutefois, il y a peu de plantations de peupliers (Volney et al., 2005). Dans les régions nordiques, la plupart des plantations de peupliers hybrides sont installées sur des sols agricoles (Amichev et al., 2010 ; Pinno et al., 2009).

Les peupliers sont caractérisés par une grande capacité à être clonés efficacement par multiplication végétative (DiFazio et al., 2011; Dickmann, 2001). L'hybridation dans les peupliers permet aux sélectionneurs de combiner facilement des caractéristiques et traits recherchés de différentes espèces (Hu et Thomas, 2019). Certains peupliers hybrides peuvent pousser dix fois plus vite que leur parent peuplier (Zalesny, 2004).

Cinq espèces de peupliers sont généralement utilisées pour avoir des peupliers hybrides au Québec (MRNF, 2001) : *P. balsamifera* (B), *P. maximowiczii* (M), *P. deltoides* (D), *P. nigra* (N), *P. trichocarpa* (T). Les peupliers hybrides obtenus des parents *P. maximowiczii* (M) et *P. balsamifera* (B) sont recommandés pour des régions froides et sur des sols pauvres.

Les peupliers et leurs hybrides sont très exigeants en matière d'éléments minéraux, eau et lumière (Paré et al., 2002 ; Mitchell et al., 1999). Les peupliers sont parmi les arbres les plus sensibles au stress hydrique, et leur productivité dépend grandement de la disponibilité de l'eau (Monclús et al., 2006 ; Rood et al., 2003).

La qualité de sol pour les plantations de peuplier doit être riche, et le sol ne doit pas être compact. Une texture moyenne à fine avec un pH de 5 à 7 sont recommandés (Réseau Ligniculture Québec, 2011). Le substrat doit permettre le développement du système racinaire. Dans un sol sec, on peut avoir des effets négatifs sur la croissance des peupliers. Cet effet est amplifié en présence de compétition avec d'autres plantes. Une compétition forte peut causer la mortalité des arbres. En effet les peupliers et leurs hybrides sont très sensibles à la compétition pour les ressources en eau et nutriments et pour la lumière (Messier et al., 2009 ; Balandier et al., 2006). Toutefois, les peupliers hybrides sont connus également pour leur acclimatation et leur adaptation aux conditions de stress hydrique (Bussotti et al. 2015).

Les espèces du genre sont utilisées pour plusieurs objectifs. Ils sont utilisés pour la stabilisation des sols (Schultz et al., 2004). Des espèces de peupliers hybrides, tel que le peuplier noir, peuvent améliorer la qualité de l'eau en piégeant certains contaminants grâce à son système racinaire bien développé (Ruffinoni et Gazelle, 1997). Les peupliers sont parmi les espèces ligneuses ayant une grande capacité d'assimilation de carbone (Fortier et al., 2010) et peuvent être utilisés pour la séquestration de carbone.

Les peupliers sont des arbres avec une productivité élevée, ce qui permet de verdir rapidement les paysages perturbés. Les peupliers sont connus pour leur capacité à croître sur des sites perturbés (Zsuffa et al., 1996). Ils sont utilisés dans les phytotechnologies (Zalesny et Bauer, 2007). Ils sont utilisés pour la phytoremédiation pour réduire les concentrations de polluants dans les sites miniers contaminés grâce à leur capacité d'absorption des métaux lourds (Isebrands et Karnosky, 2001). Les peupliers hybrides montrent généralement des taux élevés de survie sur les sites miniers (McGill et al., 2004).

À maturité, les peupliers ont généralement un système racinaire superficiel et traçant. Il a été toutefois difficile de tracer un schéma général du système racinaire du

peuplier et de ses hybrides à partir de la littérature. Il n'y a pas beaucoup de travaux qui ont examiné l'architecture racinaire de cette espèce dans différents contextes. En particulier, peu d'études ont été effectuées sur des sols argileux en régions boréales. Lorsque les études se font dans des plantations, l'utilisation de différents matériaux de plantation pourrait influencer le développement racinaire par rapport à un développement à partir d'une graine. De plus, à cause du drageonnement des peupliers dans les peuplements naturels, leurs systèmes racinaires peuvent être interconnectés (Wiehle et al., 2009). Enfin, l'architecture racinaire chez les peupliers est complexe à cause de la grande variabilité génétique (Dickmann et al., 2001). Il apparaît qu'il est difficile d'attribuer une architecture donnée pour une espèce ou un contexte. La distribution et l'architecture des systèmes racinaires des peupliers selon certains travaux de recherche sont représentées dans le tableau (2.3).

Tableau 2.3 Distribution et architecture racinaire des peupliers dans la littérature

Références	Espèce	Distribution et architecture racinaire
Gaspard, 2020	Peuplier hybride de 15 ans (<i>Populus maximowiczii</i> × <i>Populus balsamifera</i> ; <i>Populus balsamifera</i> × <i>Populus trichocarpa</i>)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Grosse racine dominante ▪ Plusieurs étages (charpenté¹) <ul style="list-style-type: none"> ▪ Structure herringbone²
Mulia et Dupraz, 2006	Peupliers hybrides de 10 ans (20 m de hauteur) (<i>Populus × euramericana</i> cv. I214)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Plupart des racines s'étendent latéralement à plus de 2 m ▪ Des racines s'étendent jusqu'au 8 m
Drénou, 2003	Peupliers hybrides matures (issus de plançons)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ (Raspalje) (<i>Populus trichocarpa</i> et <i>Populus deltoides</i>) : système racinaire horizontal avec étages de charpentières, présence de pivots, grosses racines obliques ▪ (Beaupré) (<i>Populus trichocarpa</i> et <i>Populus deltoides</i>) toutes les racines sont verticales
Dupuy, 2003	Peupliers de 7 ans dans des parcelles forestières en France	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Structure herringbone
Dickmann et al., 2001		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Système racinaire mixte avec plusieurs étages (charpenté)
Gray, 2000	Peuplier hybride 12 ans (<i>Populus deltoides</i> × <i>nigra</i>)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Racines s'étendent latéralement jusqu'à 4,5 m

¹ Système charpenté : système sous forme de plusieurs étages tout au long de la racine principale (Dickmann et al., 2001).

² Structure herringbone : système racinaire avec une racine principale pivot sur laquelle on trouve plusieurs étages avec des racines latérales (charpenté) (Dupuy, 2003).

Tableau 2.3 suite

Références	Espèce	Distribution et architecture racinaire
Dehoche, 1997	Peupliers hybrides	<ul style="list-style-type: none"> ▪ <i>Populus trichocarpa et Populus deltoides</i> : Racines latérales étendues, système racinaire mixte, charpenté (plusieurs étages de charpentières présentes), très développé ▪ <i>Populus deltoides et Populus nigra</i> : système racinaire fasciculé³
Puri et al., 1994	<i>Populus deltoides</i>	Des racines latérales s'étendent jusqu'à 5 m du collet
Gal et Grigal, 1987	<i>Populus tremuloides</i>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 40 % de la biomasse des racines dans les dix premiers centimètres du sol.
Strong, 1985	<i>Populus tremuloides</i> de 19 à 170 ans Sur sol fin et grossier	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Sur sol argileux (fin) : système racinaire traçant avec quelques racines horizontales Les dix premiers centimètres contiennent 50 % des racines ▪ Sur sol sableux (grossier) : système racinaire composé de racines plongeantes, émission de racines obliques à partir des racines latérales 50 % de la biomasse des racines se trouvent dans les 23 premiers cm <ul style="list-style-type: none"> ▪ Sur les deux sols, les racines horizontalement entre 3 à 8 m et verticalement jusqu'à 2 m.

³ Système racinaire fasciculé : racines adventives qui se développent d'une façon égale à partir de la base de la tige, pas de racines principales (Dehoche, 1997).

2.5 Stress hydrique

2.5.1 Définition

Le stress hydrique se manifeste par une quantité d'eau transpirée supérieure à la quantité d'eau absorbée (Wada et al., 2011 ; Tardieu, 1996). L'eau joue des rôles fondamentaux dans la vie des plantes (Meidner et Sheriff, 1976). Elle intervient dans les activités métaboliques et physiologiques, assure le transport des nutriments minéraux et des produits du métabolisme et elle est nécessaire pour la photosynthèse et le refroidissement des feuilles par évapotranspiration. Par conséquent, sa carence peut affecter la croissance et la survie de la plante. Les effets que peut avoir le déficit hydrique sur les végétaux dépendent du taux de transpiration, de la durée de l'exposition au stress hydrique et de l'espèce végétale (Kagambèga et al., 2019 ; Attia et al., 2015 ; Ben-Yehoshua et Rodov, 2002). L'effet varie également en fonction des organes de la plante et de l'âge. Un déficit hydrique sévère peut endommager les racines et donc causer la mortalité de la plante (Gindaba et al., 2004).

Le stress hydrique affecte à plusieurs niveaux le fonctionnement de la plante, entre autres :

Au niveau physiologique :

- ✓ Photosynthèse : le déficit hydrique (diminution de potentiel hydrique foliaire) provoque la fermeture des stomates, et empêche les échanges gazeux, et donc diminue la photosynthèse et la production végétale (Quick et al., 1992).
- ✓ Conductance stomatique : la fermeture des stomates entraîne l'augmentation de la température foliaire et la réduction de la conductance stomatique (Liu, Z et Dickmann, 1996).

Au niveau morphologique :

- ✓ Surface foliaire : sous l'effet du stress hydrique, la surface foliaire diminue, particulièrement à certains stades de développement (Tardieu et al., 2000).
- ✓ Système racinaire : le développement des racines joue un rôle important dans l'alimentation hydrique et minérale des végétaux. Sous un stress hydrique, les caractéristiques du système racinaire changent en fonction des espèces et variétés (Beniken et al., 2011).

Les plantes répondent au stress hydrique grâce à plusieurs stratégies, incluant les deux suivantes :

- ✓ Le maintien de l'alimentation hydrique : cette stratégie implique la capacité du système racinaire à maintenir une productivité importante malgré les conditions non favorables (Logbo et al., 2013). Pour garantir une alimentation en eau et en nutriments et résister au stress hydrique, il faut augmenter le volume de sol à explorer. Ceci est assuré par le biais du système racinaire, qui subit un ensemble de changements en réponse au déficit hydrique (Comas et al., 2013).

En effet, en réponse au déficit hydrique, les racines changent de structure et de morphologie. Elles augmentent de longueur et prolifèrent en profondeur. Chez certaines espèces, ces changements sont associés à une diminution de diamètre racinaire moyen (Padilla et al. 2013). La production des racines fines est une autre réponse. Ainsi, Craine (2006) a montré que chez les *Poaceae*, plus la biomasse de racines fines est grande, plus les plantes ont été capables de s'alimenter en eau et de tolérer le manque d'eau. Des recherches ont montré que le développement des poils absorbants longs est un autre moyen de résister au manque d'eau. En effet, chez le blé, ils ont permis d'augmenter le contact racine-sol et par conséquent d'extraire plus d'eau (White et Kirkegaard, 2010).

✓ La réduction des pertes liées à la transpiration : fait intervenir l'appareil stomatique du système foliaire (Arango-Velez et al., 2014). Les stomates se ferment à cause de la diminution de potentiel hydrique foliaire, mais aussi en réponse aux signaux en provenance des racines. Étant le premier capteur du dessèchement du sol, le système racinaire envoie aux parties aériennes des messages pour diminuer la transpiration, principalement via la synthèse d'acide abscissique (ABA). Des études ont signalé l'accumulation de cet acide chez les plantes soumises au stress hydrique.

La diminution de la surface foliaire est une réponse observée chez les plantes sous des conditions de contrainte hydrique et contribue notamment à la réduction de la transpiration (Silva et al., 2004). En réponse au stress hydrique, les plantes peuvent adopter une stratégie isohydrique ou anisohydrique, qui engendrent des conséquences différentes en terme d'échanges gazeux, de production de biomasse et de mortalité (Franks et al., 2007). Les espèces isohydriques ferment rapidement leurs stomates en cas de stress hydrique, ce qui empêche l'augmentation de la transpiration et leur permettent de garder un potentiel hydrique foliaire stable tout au long de la période de sécheresse (Zhang et al., 2020 ; Barchet et al., 2014). À l'inverse, les plantes anisohydriques gardent leurs stomates ouverts en cas de stress hydrique et ils sont capables de prélever l'eau du sol même à de très faibles potentiels hydriques. Cette stratégie privilégie le maintien de la production via la photosynthèse (Zhang et al., 2020). Cette option peut être avantageuse dans des conditions de stress hydrique modérées, toutefois, le comportement anisohydrique peut engendrer des dégâts irréversibles en cas de sécheresse plus poussée (McDowell et al., 2008). En réalité, une même espèce peut adopter et combiner les deux stratégies dépendamment des conditions environnementales (climat, sol, l'intensité de stress hydrique) (Tardieu et Tuberosa, 2010 ; Chaves et al., 2003).

2.5.2 Compétition intra- et interspécifique et exposition des arbres au stress hydrique

La compétition inter- et intra-spécifique peut augmenter l'exposition des arbres plantés au stress hydrique. En effet, les plantes entrent en compétition entre elles pour la lumière ainsi que pour les ressources hydriques et minérales. L'étude de Benomar et al., (2012), dans la région boréale du Canada, a montré que la réduction de l'espacement entre les arbres de deux clones de peuplier hybride (*P. balsamifera × trichocarpa* et *P. maximowiczii × balsamifera*) augmente la compétition pour les ressources du sol et peut réduire l'investissement dans la croissance aérienne. L'espacement entre les arbres affecte la disponibilité de l'azote (N), qui constitue un élément indispensable pour le développement des plantes. En effet, les résultats de Yan et al. (2015) sur des plantations de peuplier hybride en Chine (*Populus deltoides × Populus euramericana*) suggèrent que, durant les saisons de croissance, le taux de minéralisation annuel du N dans le sol est plus élevé dans les plantations de faibles densités.

La compétition avec les herbacées peut influencer grandement la croissance des arbres (Bockstette et al., 2017 ; Coll et al., 2007). Ainsi plusieurs auteurs ont signalé que la végétation herbacée risque de rentrer en compétition avec les arbres sur l'eau, la lumière et les nutriments, en particulier l'azote (Bockstette et al., 2017 ; Powell et Bork, 2004 ; Casselman et al., 2006). De plus, la taille des arbres et l'espacement entre les arbres influencent également la productivité de la végétation de sous-étage (Remaury et al., 2019). Plusieurs chercheurs ont souligné la sensibilité des peupliers hybrides à la compétition avec les herbacées pour la croissance des arbres, en particulier durant les premières saisons de croissance (Otto et al., 2010 ; Welham et al., 2007).

2.5.3 Acclimatation des peupliers hybrides au déficit hydrique

Plusieurs recherches ont démontré que les peupliers peuvent présenter plusieurs stratégies de tolérance à la sécheresse, entre autres, la diminution de la surface foliaire, l'abscission des feuilles, la production de racines fines, l'élongation des racines, la fermeture des stomates (Desrochers et al. 2007 ; Monclus et al. 2006). Chez les peupliers, des auteurs ont mis en évidence la fermeture rapide des stomates comme mécanisme de résistance (Arango-Velez et al., 2011, peuplier baumier) et une réduction du taux de transpiration (Amlin et Rood, 2003). Les stomates des peupliers hybrides se ferment à cause de la diminution du potentiel hydrique foliaire, mais aussi en réponse à la production d'acide abscissique par les racines (Plomion et al, 2006 ; Wilkins et al., 2009). Toutefois, toutes les essences ne répondent pas de la même façon (Siemens et Zwiazek 2003). Par ailleurs, Zhang et al. (2010a) ont révélé différentes stratégies de contrôle des pertes d'eau chez les arbres de la même espèce. Les recherches de Larchevêque et al. (2011) ont dévoilé que trois clones de peuplier étudiés ont réagi différemment à l'exposition à la sécheresse. L'étude a montré que l'hybride (*P. balsamifera* × *P. maximowiczii* 915005) a montré les meilleures capacités de résister à un stress d'intensité croissante. En effet, ce clone avait le taux de transpiration instantané le plus élevé. La production de biomasse n'a pas été significativement diminuée à cause de la contrainte hydrique. De plus, ce clone a pu développer de nouvelles feuilles après ré-arrosage (Larchevêque et al., 2011).

2.6 Ancrage des arbres

2.6.1 Stabilité et ancrage des arbres

En plus de la croissance, la pérennité à moyen et long terme des plantations est importante pour garantir l'atteinte des objectifs de la revégétalisation. La stabilité des arbres peut être évaluée par la force de l'adhésion d'un arbre par son système

racinaire dans le sol lorsqu'il est soumis à la traction. La force de résistance à l'arrachement de l'arbre varie selon le type de système racinaire et le degré de ramification (Bell et al., 1991).

La stabilité des arbres est déterminée par plusieurs facteurs : les conditions environnementales (vent, pluie, etc.) ; la structure et la texture du substrat ; la morphologie de l'arbre (la hauteur des arbres, la profondeur et la largeur du système racinaire) (Sellier et al., 2008). La structure et l'architecture du système racinaire jouent un rôle essentiel dans la stabilité des arbres, et les racines sont le principal organe de la plante exerçant des effets mécaniques (Stokes et al., 2008, Dupuy et al., 2005 ; Stokes, 2002).

Les racines peuvent renforcer le sol en assurant la cohésion de ce dernier (Zhang et al., 2010b). Elles assurent également l'ancrage des plantes dans le sol, en particulier l'ancrage contre le déracinement par le vent (Ploudre et al., 2009 ; James et al., 2013). James et al. (2013) ont souligné qu'une bonne portion de l'ancrage face au déracinement est assuré par les racines tenues en tension.

Plusieurs paramètres décrivant la structure des racines grossières (> 4 mm) peuvent influencer l'ancrage de l'arbre dans le sol (Gregory, 2006 ; Godin, 2000 ; Harper et al. 1991). Notamment, la biomasse des racines de structure peut influencer largement la stabilité des arbres (Stokes et al. 1995 ; Nicoll et Ray, 1996). Le nombre de ramifications des racines influence la résistance du système racinaire à une contrainte mécanique. En effet, la force de résistance des racines ramifiées en tension serait plus élevée que pour des racines sans ramifications. La profondeur d'enracinement est un autre facteur important influençant l'ancrage de l'arbre dans le sol (Blackwell et al., 1990).

Chez les arbres matures, les racines emprisonnent le sol et forment ainsi la plaque de sol racinaire, qui est une composante importante de l'ancrage de l'arbre (Nicoll

et Ray 1996). La rigidité de la plaque de sol racinaire dépend de la structure et de l'architecture des racines (Danjon et al., 2005), et son volume joue un rôle déterminant dans la stabilité de l'arbre (Coutts 1983).

Le système racinaire de nombreuses essences s'adapte fortement aux stress mécaniques en augmentant le nombre, la ramification et le volume des racines (Mao et al., 2014). Denis et al. (2000) ont identifié le nombre et la position dans l'espace des racines comme des caractères déterminants pour la stabilité du maïs.

Les premières recherches sur l'évaluation de la stabilité des arbres ont débuté en 1960 par A.I Fraser et ses collaborateurs. Ils ont développé des techniques pour arracher mécaniquement des arbres dans le but d'extraire des informations quant aux dimensions des arbres, du système racinaire et de l'ancrage des arbres dans le sol (Fraser, 1962). La relation entre l'architecture racinaire et la stabilité des arbres a été ensuite décrite par d'autres auteurs (Ray et Nicoll, 1998 ; Coutts, 1983). Toutefois, les recherches sur la stabilité des arbres et le rôle du système racinaire dans l'ancrage des arbres sont rares et les progrès restent insuffisants. Notamment, parce que les techniques d'investigation sont difficiles à mettre en place et n'apportent généralement que des informations partielles. Il y a un manque d'information concernant plusieurs aspects relatifs à la stabilité des arbres et l'ancrage des racines (Stokes, 2002).

2.6.2 Caractéristique du substrat et ancrage des arbres

Le type de sol influence largement le développement et la croissance des racines (Drénou, 2006 ; Lebougeois et Jabiol, 2002). Chaque sol a des caractéristiques physiques et nutritionnelles particulières qui conditionnent l'expansion des racines. Sur les sols argileux ($< 2 \mu\text{m}$) par exemple, le système racinaire est plus dense avec des racines de longueur réduite, car elles ne pénètrent que dans les fissures. Cependant, en sol sableux ($> 50 \mu\text{m}$) les racines sont plus développées et plus

nombreuses (Atger, 1994). Des études ont montré qu'une grande teneur en argile limite l'exploration des racines dans le sol (Falkiner et al., 2006 ; Sudmeyer et al., 2004). Par exemple, la profondeur d'enracinement du pin de Monterey était plus faible sur un sol argileux comparativement au sol sableux dans l'étude de Sudmeyer et al. (2004). Toutefois, d'autres chercheurs ont signalé que ça ne dépend pas seulement de la texture du sol, mais également de sa structure (Drénou, 2006). Ainsi, les résultats de Lebourgues et Jabiol (2002) ont souligné une densité racinaire importante en profondeur jusqu'à 1,5 m pour le chêne sur un sol argileux.

Le développement et la croissance des racines sont également plus importants dans un sol riche (Hutchings et John, 2003). La densité racinaire est généralement plus élevée en surface et dépend de la teneur en matière organique et de la concentration des nutriments (Sainju et Good, 1993).

2.6.3 Le choix du matériel de plantation

Le choix du matériel de plantation est un élément important et doit être considéré durant la revégétalisation des sites (Davis et al., 2010). L'effet du type de plant sur la croissance de la partie aérienne a été documenté dans la littérature (Desrochers et Tremblay, 2009 ; Jutras et al., 2007). Toutefois, des études sont nécessaires pour déterminer l'effet du matériel de plantation sur le développement racinaire et la stabilité des arbres. Au Québec, ce sont généralement des plants à racines nues qui sont utilisés pour produire du peuplier hybride. D'autres matériaux comme les boutures et les plançons peuvent être envisagés (tableau 2.4). Ainsi chaque type de matériel a ses avantages et inconvénients (Balleux et Van Lerberghe, 2001). DesRochers et Tremblay, 2009 ont comparé la croissance de quatre matériaux de plantation de peuplier hybride dans un sol argileux en Abitibi-Témiscamingue. La recherche a souligné la capacité des boutures à survivre et développer un système racinaire capable d'assurer une aussi bonne alimentation hydrique comparé aux

plants à racines nues et aux plançons. Il est à noter que les coûts liés à la production des boutures sont plus faibles que pour les plants à racines nues.

En considérant trois types de matériel (racines nues, plançons et boutures), la différence de taille de la tige ainsi que le rapport aérien/souterrain peuvent influencer la croissance et la survie des arbres (Grossnickle, 2005). Rapidement après plantation, les plants à racines nues ont une grande surface foliaire et donc une transpiration potentiellement plus importante. Les plançons et boutures doivent reconstruire leur système racinaire. Ce déséquilibre pour ces deux types de plants pourrait conduire à l'épuisement des ressources végétales (eau et éléments minéraux) et donc affecter négativement la croissance et survie des arbres, car ils doivent supporter leur biomasse aérienne avec un système racinaire réduit (DesRochers et al., 2004). Des différences entre les trois types de plants (racines nues, plançons et boutures) vis à vis de leur biomasse racinaire pourraient influencer leur architecture racinaire et donc la stabilité de la plante.

Tableau 2.4 Caractéristiques de trois types de matériel de plantation de peuplier hybride utilisés au Québec (DesRochers et Tremblay, 2009; Drénou, 2006; Ménétrier, 2008)

	Caractéristiques	Inconvénients
Boutures	<p>Segment de tige sans racines (30-50 cm) Directement insérées dans le sol Faciles à produire et peu coûteuses</p>	Difficultés d'entretien pendant les premières années de croissance : susceptibles au broutage, aucune hauteur initiale, compétition avec les plantes herbacées en particulier pour la lumière
Plançons	Segment de tige longue sans racines (120-160 cm)	Des difficultés de mise en terre, en particulier pour des sols argileux où il est difficile de labourer le sol à une profondeur de 30 cm
Plants à racines nues	<p>Jeunes plantes avec une hauteur de 150-200 cm et possèdent un réseau racinaire exempt de terre. Produits à partir des boutures. Bon rendement pour la survie et la croissance</p>	<p>Coût élevé Difficulté de mise en terre (il faut creuser le sol pour les installer, système racinaire difficile à enfouir à 30 cm de profondeur)</p>

2.6.4 Effet de la compétition sur la stabilité des arbres

Les plantes entrent en compétition pour l'eau et les nutriments au niveau du sol. L'étude de Benomar et al. (2012) sur un sol argileux a montré que la réduction de l'espacement entre les arbres de deux clones de peuplier hybride (*P. balsamifera x trichocarpa* (BT747) et *P. maximowiczii x balsamifera* (MBB915) s'est traduite par une réduction de la biomasse aérienne alors que la profondeur et la biomasse des racines n'ont pas été affectées. La compétition des herbacées peut influencer grandement la croissance des arbres (Coll et al., 2007). En effet, Messier et al. (2009) ont noté l'augmentation de la biomasse des racines fines ainsi que des parties aériennes des peupliers hybrides suite à l'application d'herbicides.

Plusieurs auteurs ont étudié l'effet de la concurrence inter et intra-spécifique sur le développement des parties aériennes de peupliers (Bockstette et al., 2017 ; Grenke et al., 2016 ; Benomar et al., 2012). Cependant, les connaissances de ses effets sur le développement racinaire des arbres et sur la stabilité des arbres sont encore rares à l'heure actuelle (Bockstette, 2017).

2.7 Objectifs de la thèse

2.7.1 Objectif général

Un développement racinaire adéquat apparaît un élément crucial pour assurer une revégétalisation appropriée et efficace avec des arbres. En effet, le système racinaire influence grandement la croissance et la pérennité des plantes, notamment, en jouant un rôle essentiel dans l'alimentation hydrique et minérale ainsi que dans l'ancrage de ces plantes. Ce projet de doctorat vise à déterminer le design de la plantation qui assure la survie des arbres dans des conditions d'exposition potentielle au stress hydrique (pentes de roches stériles) et favorise un développement racinaire qui augmente l'ancrage d'une plantation de peupliers hybrides sur des pentes de stériles

3H : 1V (33 %) recouvertes de 50 cm de sol. Les principaux facteurs de design considérés seront : l'espacement des arbres, la compétition herbacée, la qualité du sol, et le matériel de plantation.

2.7.2 Objectifs spécifiques

- Étudier l'exposition au stress hydrique et la capacité d'acclimatation à ce stress des arbres plantés, au niveau aérien et souterrain, dans une plantation de peuplier hybride à différentes densités et avec ou sans ensemencement herbacé sur des pentes de stériles de 33 % recouvertes de sol (Chapitre 3)
- Évaluer l'effet des niveaux variables de la compétition intra-spécifique (densité de la plantation) et de la compétition inter-spécifique (hydroensemencement herbacé) sur l'architecture racinaire et la résistance mécanique au déracinement des arbres quatre ans après plantation (Chapitre 4).
- Évaluer l'effet de différents matériaux de plantation (bouture, plançons et racines nues) et l'effet de la qualité du sol (50 cm de sol végétal ou 40 cm de sol minéral+10 cm de sol végétal) sur l'architecture racinaire et la résistance mécanique au déracinement des peupliers hybrides après quatre ans de plantation (Chapitre 5).

CHAPITRE 3

MÉTHODOLOGIE

3.1 Site d'étude

La mine Canadian Malartic est située à Malartic ($48^{\circ} 08' 00''$ N $78^{\circ} 08' 00''$ W), environ 20 kilomètres à l'ouest de la ville de Val d'Or, Québec. L'exploitation s'effectue via une mine à ciel ouvert. La mine Canadian Malartic (figure 3.1) est considérée comme étant l'une des plus importantes mines aurifères au monde avec un taux de traitement journalier du minerai de 55 000 t/jour à une teneur de l'ordre de 1 g/t. La ville de Malartic se situe dans la zone boréale, le climat est de type continental froid et modérément humide, avec des hivers froids et secs et des étés chauds (Girardin et al., 2008). La région connaît une forte variabilité climatique à cause de sa position géographique, des précipitations irrégulières et de fortes fluctuations thermiques annuelles.

Le secteur se trouve à l'intérieur de la ceinture d'argile du Nord-Ouest québécois et les sols dominants y sont les luvisols gris (Canadian Agricultural Services Coordinating, 1998)). Le site appartient au domaine bioclimatique de la sapinière à bouleau blanc (MERN, 2003). La végétation forestière comprend principalement des peuplements d'épinette noire (*Picea mariana*), de pin gris (*Pinus banksiana*), de mélèze laricin (*Larix laricina*) mélangé à du bouleau blanc (*Betula papyrifera*) et de peuplier faux-tremble (*Populus tremuloides*) (Lantz et al., 2010). Les milieux humides se caractérisent par des marais, des tourbières, des étangs, et des aulnaies. La croissance des essences boréales dépend généralement du type de sol et de certains facteurs topographiques. En effet, des plantes comme l'épinette noire se

trouvent dans des zones non drainées, alors que le peuplier faux-tremble et le pin gris peuvent croître en milieu bien drainé (Angstmann et al., 2012; Wang et al., 2003).

Les études d'impact réalisées par la mine ont souligné que le milieu naturel a été relativement perturbé à cause des opérations minières précédentes (1935-1965) (Genivar, 2008).



Figure 3.1 Vue du parc à résidus de la Mine Canadian Malartic (Crédit : Mine Canadian Malartic)

3.2 Dispositif expérimental

Dans le cadre de ce projet de doctorat, deux dispositifs expérimentaux (dispositifs en blocs de répétition complets aléatoires) ont été installés au printemps 2013, sur des pentes 3 h:1 v (33 %) de stériles miniers. Ces derniers sont recouverts d'une

couche de sol superficiel ou minéral, de type luvisols gris (Canadian Agricultural Services Coordinating, 1998), provenant du décapage de la fosse. Celle-ci était colonisée par un peuplement d'épinettes noires sur milieu humide. Le sol superficiel est constitué des horizons O et A, soit les 30 premiers cm de couleur foncée, riches en matière organique. Le sol minéral est constitué de plusieurs mètres de dépôt argileux. Les sols ont été stockés séparément pendant 12 à 18 mois avant utilisation. Les stériles sont peu problématiques à court terme et leur potentiel de génération d'acide à long terme est encore à l'étude, ce qui limite la toxicité lors du contact entre les racines et les stériles. Ainsi, les travaux visent principalement la pénétration et l'ancre des racines en profondeur dans les stériles. Les arbres plantés sont des clones semi-exotiques de peupliers hybrides (un parent peuplier baumier) qui sont produits localement et sélectionnés pour la région de l'Abitibi-Témiscamingue.

❖ Dispositif 1 : Effet de l'espacement et hydroensemencement sur l'exposition au stress hydrique et le développement racinaire en profondeur

Le dispositif expérimental a été installé sur 50 cm de sol superficiel. Quatre traitements ont été adoptés pour évaluer l'influence de l'espacement des arbres ainsi que celle de l'hydroensemencement. Le dispositif comporte 12 parcelles expérimentales (8-12 m × 14 m), soit 3 blocs de répétitions x 4 traitements de compétition (espacements 1x1m, 2x2m, 4x4m sans hydroensemencement ; 2x2m avec hydroensemencement graminées-légumineuses agronomiques), avec 12, 35, ou 117 peupliers MxB 915319 respectivement.

❖ Dispositif 2 : Effet du matériel de plantation et de la qualité du sol de couverture sur l'enracinement des arbres

Le dispositif expérimental en blocs de répétition complets aléatoires comporte 18 parcelles expérimentales, soit 3 blocs de répétitions x 3 types de plants (peuplier MxB 915318 : plançons, plants à racines nues, boutures) x 2 substrats (50 cm de sol

superficiel ou 40 cm de sol minéral+10cm de sol superficiel) x 25 arbres (pseudoréplicats) espacés de 2x2m (plan d'expérience factoriel 2×3).

3.3 Protocole expérimental

Compte tenu de la forte dimension des arbres à l'âge adulte, deux objets d'investigation apparaissent essentiels pour assurer la pérennité d'une revégétalisation par plantation : l'approvisionnement en eau et l'ancre des arbres. Tous deux dépendent d'un développement racinaire adéquat. Globalement notre démarche méthodologique visait donc à évaluer ces deux fonctions (Figure 3.2).

3.3.1 Suivi lié au déficit hydrique dans les arbres

➤ Croissance et survie

Un suivi de mortalité ainsi que des mesures initiales de hauteur maximale et diamètre basal ont été effectués à la plantation au printemps 2013 et ensuite répétés chaque année à l'automne pendant quatre ans.

➤ Exposition au stress hydrique

Potentiel hydrique

L'exposition ponctuelle des arbres au stress hydrique a été suivie toutes les deux semaines pendant la troisième saison de croissance (Juin-Juillet-Août, 2015). La mesure de potentiel hydrique foliaire, à l'aide d'une chambre à pression, est une méthode très utilisée pour étudier la contrainte hydrique des plantes. C'est une technique fiable et facile à manipuler (Kaufmann, 1968 ; Payan et Salançon, 2002). Le principe consiste à appliquer une pression sur les feuilles jusqu'à ce que la sève

exsude des vaisseaux du xylème. La pression exercée correspond alors en valeur absolue au potentiel hydrique (valeur négative).

Discrimination isotopique

Le rapport $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ est un autre indicateur physiologique de l'exposition au stress hydrique à long terme des plantes (Farquhar et al., 1989). Le pourcentage du ^{13}C dans le CO_2 atmosphérique est d'environ 1 %. Le ^{12}C , plus léger est préféré pour la photosynthèse. En réponse au déficit hydrique, les stomates ferment durant la journée et les échanges de CO_2 avec l'atmosphère diminuent. Par conséquent, le rapport $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ fixé dans la matière organique végétale par photosynthèse augmente par rapport à celui dans le CO_2 atmosphérique. Le ratio $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ dans le feuillage a été mesuré dans des feuilles matures au sommet des arbres à raison d'un arbre par parcelle, prélevées au mois d'août de la 3^e saison de croissance, pour évaluer l'exposition à long terme au stress hydrique.

Surface foliaire

La surface foliaire totale a été mesurée avec un planimètre (LI-3100 C leaf area meter, LiCor, Lincoln, NE, USA). La surface foliaire spécifique (SLA : surface foliaire totale/masse sèche totale en cm^2/g) a été ensuite calculée. La diminution du SLA est considérée par plusieurs chercheurs comme un bon indicateur de déficit hydrique (Liu et Stützel, 2004; Craufurd et al., 1999 ; Marcelis et al., 1998).

➤ Développement des racines

La distribution des racines fines (diamètre <2 mm) des arbres à différentes profondeurs du sol de couverture a été étudiée durant l'été (Juin-Juillet) de la 3^e saison de croissance par carottage. Les données ont été traitées et analysées par le logiciel WinRhizo (Regent Instruments Inc., Ottawa, ON Canada). Ce logiciel est largement utilisé pour étudier la morphologie des racines (Pang et al. 2011). Ainsi,

en répartissant les racines en différentes classes de diamètre, le logiciel permet de calculer plusieurs paramètres morphologiques, dont la longueur totale, la surface et le volume des racines.

3.3.2 Suivis reliés à la stabilité des arbres

➤ Test d'arrachement

Des tests d'arrachement ont été réalisés à la 4e saison de croissance (été 2016), pour estimer la force de rétention des arbres dans le sol. Les tests de traction latéraux ont été effectués selon une méthode adaptée de celle utilisée par Girouard (1995), Sheedy (1996) et Thiffault (2010), à l'aide d'un treuil, d'un câble d'acier, d'une chaîne et d'une élingue (figure 5.1). Le test d'arrachement consiste à appliquer une force d'arrachement. On augmente graduellement la force jusqu'au déracinement de l'arbre et les valeurs de force ainsi que le déplacement de l'arbre sont enregistrés.

Des essais préliminaires ont été réalisés pour établir la hauteur à laquelle l'arbre serait attaché afin que la force de treuillage n'indue pas une courbure importante des tiges, mais exerce plutôt une force importante sur les systèmes racinaires. Lorsque les arbres sont jeunes (comme c'est le cas dans notre étude : 4 saisons de croissance), le vent a peu d'effet sur leur stabilité et la stabilité des arbres est assuré principalement par le système racinaire.

Dans cette étude, l'objectif était de caractériser l'ancrage de jeunes arbres à l'aide d'un essai où le cisaillement était la principale contrainte mécanique appliquée à l'arbre. En raison de la taille des arbres, il n'était pas possible de faire un essai où l'on exerçait un moment par ce que la tige des jeunes arbres n'était pas suffisamment rigide.

L'objectif n'était pas de reproduire l'effet du vent sur la stabilité des arbres (qui correspond davantage à exercer un moment). On voulait plutôt comparer l'ancrage

des arbres de différents designs de plantation sur des pentes de stériles miniers pour sélectionner le/les agencements à prioriser pour la revégétalisation des pentes de stériles. Ainsi, pour les tests d'arrachement réalisés, le câble utilisé pour les essais de déracinement latéral a été attaché le plus bas possible de la tige, soit à la base de l'arbre. Par conséquent, la réponse obtenue correspond à la résistance maximale du système racinaire à une force de cisaillement.

Les mesures de la force de traction ont été faites avec un dynamomètre optima scales modèle OP 926 (Optima Led Digital Hanging Scale 2000 lb.) qui est placé au niveau du treuil (WARN Pro Vantage 2500SCE 4200 lb). Les valeurs de force ont ensuite été converties en Newtons. On a exercé une force latérale vers le bas de la pente, parallèlement à la pente. La force appliquée ainsi que le déplacement de l'arbre (déplacement de la tige par rapport à l'état initial) ont été notés toutes les minutes jusqu'à arrachement de l'arbre.

➤ Excavation hydraulique

L'excavation du système racinaire a été réalisée en exerçant un jet à haute pression d'eau à l'aide d'une pompe hydraulique (POMPE 2'' MULTQUIP, N Série : 2 h-7348). Grâce à cette pression, la couche de sol est enlevée jusqu'à ce que toutes les racines grossières (diamètre supérieur à 4 mm) soient visibles. Une fois que les racines sont excavées, la structure du système racinaire est photographiée, décrite et schématisée (distribution sur 360°, distribution verticale). Ensuite des mesures d'architecture ont été effectuées. Des récoltes de biomasse des parties aériennes et racinaires des arbres excavés ont été effectuées pour quantifier les ratios aériens/souterrains des arbres.

➤ Observation des racines

La profondeur de pénétration des racines des peupliers dans les stériles sous-jacents a été observée grâce à des tranchées effectuées à la pelle mécanique à la 4^e saison de croissance (juin 2016).

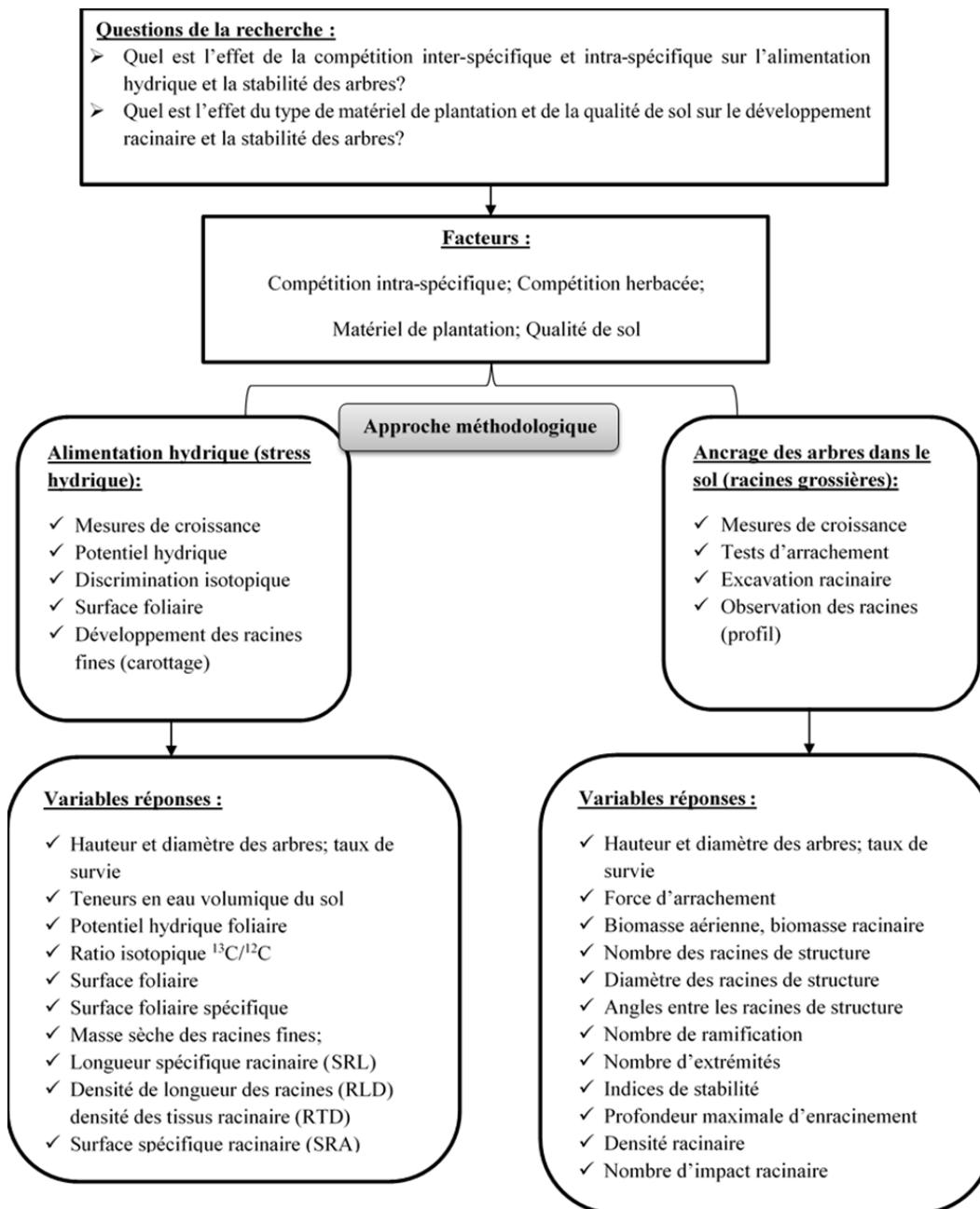


Figure 3.2 Schéma de la démarche méthodologique adoptée

CHAPITRE 4

ARTICLE 1

Effects of spacing and herbaceous hydroseeding on water stress exposure and root development of poplars planted in soil-covered waste rock slopes

Khadija Babi^{1,*}, Marie Guittonny¹, Guy R. Larocque², Bruno Bussière¹,

¹Research Institute in Mines and Environment, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, 445, boul. de l'Université, Rouyn-Noranda, QC J9X 5E4, Canada

² Natural Resources Canada, Canadian Forest Service, Laurentian Forestry Centre, 1055 du P.E.P.S., P.O. Box 10380, Stn. Sainte-Foy, Quebec G1V 4C7.

*Khadija.babi @uqat.ca

4.1 Abstract

Root development is important to ensure tree survival in conditions of water stress. Despite their long-recognized role, little attention has been given to their development on waste rock slopes subject to rapid drainage. This study was conducted in an open-pit gold mine in a boreal forest. Its main objective was to establish a plantation design with a moderate level of competition for water resources

on a waste rock slope. A hybrid poplar plantation was established in May 2013 on a soil-covered waste rock slope of 33%. The experimental design included three different poplar spacings: 1 × 1 m, 2 × 2 m without herbaceous seeding, 2×2h m with herbaceous seeding and 4 × 4 m. The poplars responded to increased competition resulting from closer spacing and herbaceous seeding by investing less energy in diameter and height growth. Poplar individuals that were subject to high levels of competition were able to acclimatize to water stress conditions by increasing root length density and specific root length and by reducing above-ground biomass. This study indicates that some clones of hybrid poplar showing phenotypic plasticity in the ratio of above- and belowground growth can be adapted for short-term revegetation of mine sites.

Keywords: Mine reclamation; Mine revegetation; Mine waste rock; Water stress slopes; fast-growing tree; root development

Résumé

Le développement racinaire joue un rôle crucial dans la survie des arbres en conditions de stress hydrique, mais reste peu étudié sur des stériles miniers sujets à un drainage rapide. Cette étude a été réalisée dans une mine d'or à ciel ouvert en forêt boréale. L'objectif principal était d'établir un design de plantation avec un niveau modéré de compétition pour les ressources hydriques sur une pente de stériles. Ainsi, une plantation de peupliers hybrides a été installée en mai 2013 sur une pente de stériles ayant une inclinaison de 33 % et recouverte de sol. Le dispositif expérimental comprenait trois espacements entre les peupliers (1 x 1, 2 × 2 et 4 × 4 m), avec un ensemencement herbacé combiné ou non à la plantation espacée de 2 × 2 m. Les peupliers ont répondu à l'intensification de la compétition résultant d'un plus faible espacement (1 x 1 m) et d'ensemencement herbacé en diminuant leur investissement dans la croissance en diamètre et en hauteur. Les arbres soumis à un niveau de compétition élevé se sont acclimatés en augmentant leur longueur

racinaire par volume de sol et leur longueur par unité de masse racinaire, et en réduisant leur biomasse aérienne. Cette étude indique que certains clones de peuplier hybride montrant une plasticité phénotypique du rapport développement aérien/souterrain peuvent être adaptés à la végétalisation à court terme de sites miniers.

Mots clés : réhabilitation de sites miniers; végétalisation de sites miniers; stériles miniers; pentes bien drainées; arbre à croissance rapide; développement racinaire

4.2 Introduction

Mining companies have implemented revegetation programs for several years to reduce the social and environmental impacts of their operations and to comply with environmental regulations. Revegetation techniques performed on mine site slopes use fast-growing herbaceous plants, which contribute to stabilizing the soil, protecting it from erosion and ensuring the cohesion of the surface soil layer (Carroll et al. 2000; Xia 2004; Evanylo et al. 2005).

When used in conjunction with herbaceous species, tree plantation can favor colonization by local species from adjacent forests (Nichols et al. 2010), thereby facilitating remediation of the forest landscape. However, the herbaceous cover may compete with planted tree seedlings and hinder their establishment (Skousen et al. 2006). The establishment of tree cover on waste rocks is complicated, notably due to their physical and chemical characteristics (Aubertin et al. 2002; Mench et al. 2003). Waste rocks are characterized by a lack of essential nutrients and absence of organic matter and micro-organisms (Tordoff et al. 2000). Waste rock slopes are subject to wind exposure, erosion and quick drainage, all of which can negatively affect tree development. Topsoil can be used on mine waste rock to provide a fertile substrate. The type of soil is an important determinant of tree growth on sites to be restored (Zipper et al. 2011). Its use to cover waste rock improves soil productivity and soil functionalities

(Tordoff et al. 2000; Sena 2014). Due to their quick drainage and slope, waste rock slopes form a planting environment where the water supply to trees can be very limited. Water stress occurs when the amount of water transpired by a plant is higher than the amount it absorbs (Compaoré 2011). This generally results in lower biomass production (Benomar et al. 2012). Severe water stress can cause root mortality and plant wilting (Condit et al. 1995; Hartmann et al. 2013).

Hybrid poplar is an interesting choice for the revegetation of mine sites because of its high survival rate (Czapowskyj 1978; Clark Ashby 1995) and rapid growth (Casselman et al. 2006), which are important to control slope erosion (Fortier et al. 2008; Fields- Johnson et al. 2014). Poplar is able to develop fine roots (diameter <2 mm) in large volumes of soil in conditions of water stress (Bauhus and Messier 1999; Casselman et al. 2006). These fine roots are highly effective in absorbing water (Leuschner et al. 2008). However, most hybrid poplar clones are known for their high water demand (Dickmann 2001), which may impair their survival, especially in the initial years of growth (Zandalinas et al. 2018).

Root development ensures tree survival in conditions of water stress, but has been poorly considered when assessing revegetation success of mine wastes (Guittonny-Larchevêque et al. 2016; Guittonny- Larchevêque and Pednault 2016). When a tree is subject to moderate water stress, it adopts a series of adaptive strategies in order to avoid or tolerate the stress (Siemens and Zwiazek 2003). The most important of these mechanisms is the development of the root system to maintain water supply (Logbo et al. 2013) and reduce water loss due to leaf transpiration (Arango-Velez et al. 2013). Several studies have shown that hybrid poplar can develop various strategies to tolerate drought conditions, including reduction of foliage area, leaf abscission, production of fine roots, development of root hair, increase in the volume of substrate explored through increased specific root length (SRL = the ratio of root length to dry mass of fine roots in cm/g), root length density (RLD = the ratio of root

length to volume of soil in cm/cm³), and specific root area (SRA = the ratio of the area to dry mass of fine roots in cm²/g), reduction of the average root diameter and aboveground/belowground ratio, and closing of stomata (Almeida-Rodriguez et al. 2010; Bengough et al. 2011; Desrochers et al. 2007; Monclús et al. 2006; Comas et al. 2013; Rodrigues et al. 2013).

Inter- and intra-specific competition can increase the exposure of planted trees to water stress. Trees compete with each other for light, water and minerals. Benomar et al. (2012) showed that the reduction of tree spacing in two hybrid poplar clones (*P. balsamifera × trichocarpa* (BT747) and *P. maximowiczii × balsamifera* (MBB915)) resulted in a reduction of the aboveground biomass without affecting root depth and biomass. Tree spacing affects the competition for nitrogen (N), an essential element for plant growth (Yan et al. 2015). Competition with herbaceous plants can have a significant impact on tree growth (Coll et al. 2007; Bockstette et al. 2017). Several authors have observed that understory vegetation can compete with trees for the use of water, light and nutrient resources, in particular nitrogen (Powell and Bork 2004; Casselman et al. 2006; Bockstette et al. 2017). Earlier studies highlighted the sensitivity of hybrid poplar growth to competition from herbaceous vegetation, particularly during the initial growing seasons (Kabba et al. 2007; Welham et al. 2007; Pinno and Bélanger 2009; Otto et al. 2010; Grenke et al. 2016). The herbaceous vegetation can decrease tree height and annual growth (Grenke et al. 2016).

This study was conducted in an open-pit gold mine located in the Canadian boreal forest. The main objective was to evaluate the effects of a moderate level of competition for water on waste rock slopes. The plantation design was conceived for conditions of limited water supply, but sufficient to ensure tree survival and balanced aboveground and belowground growth. More specifically, this project aimed to study the degree of exposure and capacity of acclimatization to water stress of one hybrid poplar clone planted in different densities (spacing), with or without herbaceous

seeding, on soil-covered waste rock slopes (33%). The study is based on the following hypotheses: (1) herbaceous competition and/or reduced spacing between trees increase poplars' exposure to water stress (reduction of volumetric soil water content and leaf water potential); (2) poplar height is greater for trees planted with denser spacing and lower in plots where competition from herbaceous vegetation is high; (3) herbaceous seeding and/or higher planting density leads to higher SRLs and RLDs compared to plantations with lower levels of competition; (4) higher plantation densities generate lower ratios of leaf area to root length; and (5) tree leaf area is lower in high-density plantations and/or with herbaceous seeding.

4.3 Materials and method

4.3.1 Site description

The Canadian Malartic gold mine is located in Malartic, Quebec, Canada ($48^{\circ} 08' 00''$ N $78^{\circ} 08' 00''$ W). Gold deposits were discovered in 1926 and exploited through the establishment of four under-ground mines between 1935 and 1965. Since 2011, the mine has been operated as an open pit. The Canadian Malartic mine is considered one of the largest gold mines in Canada, with a production rate of 55,000 t/day and a grade of approximately 1 g/t. The town of Malartic is located in the boreal zone and has a cold and moderately humid continental climate, with cold, dry winters and warm summers (Environment Canada 2011). The growing season in this region generally runs from mid-May to early October, with a mean temperature of about 18–19°C during the warmest months (June, July and August). Mean annual temperature is 1 °C and mean annual precipitation is 900 mm (Environment Canada 2010).

The region is located within the clay belt of north-western Quebec and the dominant soils are grey luvisols (Agriculture and Agri-Food Canada 1998). The forest vegetation surrounding the site is mainly composed of stands that include black

spruce (*Picea mariana* (Mill.) BSP), jack pine (*Pinus banksiana* Lamb.), tamarack or eastern larch (*Larix laricina* (Du Roi) Koch) mixed with white birch (*Betula papyrifera* Marsh.) and trembling aspen (*Populus tremuloides* Michx.).

4.3.2 Plant material and substrate

The experimental plots were established in May 2013 on a 33% slope of mine waste rocks exposed to the west and covered with 50cm of grey luvisol topsoil (Agriculture and Agri-Food Canada 1998) obtained from excavation of the mine pit (Table 4-1). The dark, organic-rich overburden soil was previously colonized by a black spruce stand in a humid environment and was composed of O and A horizons (uppermost 30 cm). The choice of a moderate 50 cm soil cover was based on previous experiments conducted on waste rock slopes of 10H:1V in 2011, in which all the trees survived during a particularly hot summer in 2012 (Larchevêque et al. 2014). The soil was stockpiled for 30-36 months before use in 7 m high piles with a slope of 2.5H: 1V. The characteristics of soil and waste rock are presented in (Table 4-1). Soil nutrient analyses were conducted by Lakehead University's Centre for Analytical Services (Thunder Bay, ON, Canada) on sieved samples (2 mm mesh), that were finely crushed and oven dried (50 °C).

The trees planted on all plots belong to a semi-exotic hybrid poplar clone (*P. maximowiczii* × *P. balsamifera* (M × B) clone 915,319). This hybrid was chosen mainly due to its adaptive response to water stress and its ability to develop a well-anchored root system (Larchevêque et al. 2011a). Indeed, Larchevêque et al.'s (2011b) comparison of two hybrid poplar clones and a native poplar showed that the M × B clone demonstrated the highest resistance to water stress.

The trees were produced locally by the Ministère des Ressources naturelles du Québec (MRN). Whips measuring 1.2 m in length were planted directly in the soil at a depth of 30 cm. The planted poplars were fertilized with mineral N and P

at the plantation site: 15 g of ammonium nitrate (34.5–0-0) and 15 g of triple superphosphate (0–45-0) were applied in a slit made near the base of each tree (20 cm from the tree, at a depth of 15 cm).

Tableau 4.1 : Initial soil and waste rock characteristics. All values are expressed on a dry matter basis. EC is electrical conductivity and OM is organic matter content.

*Mean ± SE; N = 15. **Québec Government (2019)

	Unit	Overburden topsoil	Waste rock	Regulatory threshold **
pH		5.9		6.7 à 9
EC*	mS.cm-1	0.4±0.1		
OM*	%	20±3		
total N	%	0.6±0.3		
total S	%	0.3±0.05		
total Ca	g.kg-1	10±1	15	
avail. K	g.kg-1	0.1±0.005		
avail. Mg	g.kg-1	0.6±0.04		
avail. Na	mg.kg-1	22		
total P	g.kg-1	0.6±0.02		
avail. Cu	mg.kg-1	7.4±0.4		
avail. Fe	g.kg-1	0.3±0.03		
avail. Mn	mg.kg-1	75±9		
avail. Zn	mg.kg-1	4.5±0.4		
total Al	g.kg-1	14±0.8	9.5	
total As	mg.kg-1	6.2±1.9	5	30
total B	mg.kg-1	3.5±0.7		
total Ca	g.kg-1	10±0.7		
total Cd	mg.kg-1	0.24±0.09	0.2	5
total Co	mg.kg-1	5.1±1.9	20	50
total Cr	mg.kg-1	217±34	123	250
total Cu	mg.kg-1	50±2	25	100
total Fe	g.kg-1	28±1.4	24	
total K	g.kg-1	4.6±0.6	10	
total Mg	g.kg-1	14±1.4	10	
total Mn	mg.kg-1	404±23	372	1000
total Mo	mg.kg-1	3.7±0.6	6	10
total Na	g.kg-1	0.2±0.04	0.2	
total Ni	mg.kg-1	94±10	57	100
total Pb	mg.kg-1	76±22	31	500
total S	g.kg-1	3.4±0.9		
total Sr	mg.kg-1	101±5		
total Ti	g.kg-1	0.95±0.08		
total Zn	mg.kg-1	96±7	63	500

4.3.3 Experimental design

Four treatments were applied to evaluate the effect of tree spacing and herbaceous hydroseeding. The experimental design consisted of a randomized complete block design containing 12 experimental plots: 3 replication blocks \times 4 competition treatments, including spacings of 1 \times 1 m, 4 \times 4 m, 2 \times 2 m without hydroseeding and 2 \times 2 m with hydroseeding of a grass/legume mixture (2 \times 2h m \times 2h m), with 117, 12, and 35 M \times B 915,319 poplars, respectively. Three plots without trees served as a control for other monitoring (soil erosion survey, Remaury et al. 2018) (Figure 4.1). The plots were separated by 4 m-wide buffer zones. The M \times B trees were planted in the bottom half (last 12 m) of the slope to improve stability (Styczen and Morgan 1995). In the upper half, two lines of fast-growing willows (*Salix miyabeana* Seemen, clone Sx64) were planted and hydroseeding was performed in the top 2 metres to limit soil erosion and water run-off. The hydroseeding mix (100 kg/ha) was composed of the following species: *Avena sativa* L. (cultivated oats) (11%), *Festuca* L. (fescue) (15%), *Lolium perenne* L. (English ray grass) (12%), *Lotus* sp. (lotus) (15%), *Poa pratensis* L. (Kentucky blue grass) (15%), *Sorghum bicolor* L. (sorghum) (12%), *Trifolium repens* L. (white clover) (7%), *Trifolium hybridum* L. (alsike clover) (3%), and *Trifolium pratense* L. (red clover) (10%).

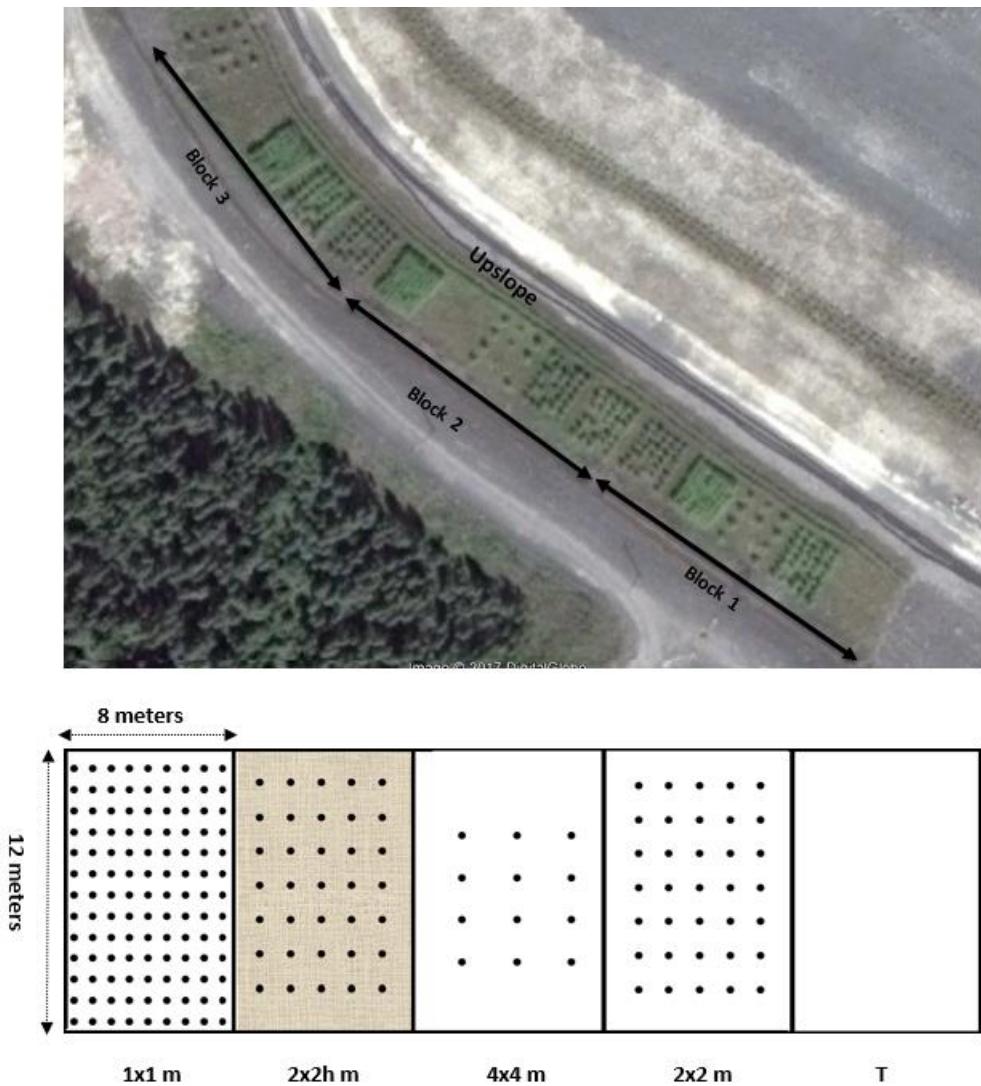


Figure 4.1 Plantation and experimental design. 4×4 m: Plots without hydroseeding and 4×4 m tree spacing; 2×2 m: Plots without hydroseeding and 2×2 m tree spacing; 1×1 m: Plots without hydroseeding and 1×1 m tree spacing; $2 \times 2h$ m: Plots with hydroseeding and 2×2 m tree spacing; T: Plots without hydroseeding and without trees

4.3.4 Measurements

Maximum height and basal diameter (diameter at root collar) were initially measured on the trees in the spring of 2013 and repeated each year in the fall. Mortality assessments were also conducted.

To evaluate treatment effect on exposure to water stress, ECH₂O-5 probes (Decagon) were placed in the plots at a depth of 5 cm from the surface of the topsoil layer (one probe in the center of each experimental plot). The probes were connected to EM 50 dataloggers and data were downloaded using the ECH₂O Utility software (version 1.77).

4.3.4.1 Water potential

Tree exposure to water stress was monitored every two weeks during the third growing season (June–August 2015). One measurement was taken each day (on sunny days, with temperatures generally above 17 °C) between 10:00 am and 2:30 pm on mature leaves located at the top of the trees, taken from a tree growing in the middle of each plot (N = 12). Water potential measurement using a pressure chamber (Model 600, PMS Instrument Co., Albany, OR, USA) is a widely used method for studying plant water stress (Payan and Salançon 2002).

4.3.4.2 Isotope discrimination

Carbon-13 isotope discrimination is another physiological indicator of plant long-term exposure to water stress (Farquhar et al. 1989). ¹³C accounts for just over 1% of the carbon in atmospheric CO₂. Plants exhibit a preference for ¹²C, which is lighter, during photosynthesis. Water deficit triggers the closing of the stomata during the day and reduces exchanges of CO₂ with the atmosphere. As a result, the ¹³C/¹²C ratio established in vegetal organic material by photosynthesis increases in relation to that in atmospheric CO₂.

Long-term exposure to water stress ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratio in the foliage) was measured in mature leaves at the top of the trees in one tree per plot ($N = 12$). Leaves were sampled in August during the third growing season. The samples were dried at $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ for 48 h and then finely ground. The $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ isotope ratio was analyzed by spectrometry at the Natural Resources Analytical Laboratory, University of Alberta, Edmonton. Following complete sample combustion, carbon was converted to carbon dioxide, which was then separated by chromatography and analyzed using a Continuous Flow Isotope Ratio Mass Spectrometer (CF-IRMS, Thermo Finnigan Corp, Bremen, Germany). ^{13}C content was calculated in relation to the international reference standard for carbon isotopes, VPDB (Vienna-Pee Dee Belemnite), which has a $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ isotope ratio of RPDB = 0.0112372. Raw data from mass spectrometry were then referenced to the VPDB using linear regression calculated based on the results of internal standards.

4.3.4.3 Leaf area

During the third growing season (in August), all the leaves from a tree in the middle of each plot were sampled. Total leaf surface area was measured using a planimeter (LI-3100C leaf area meter, LiCor, Lincoln, NE, USA). Samples were dried at $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ for 48 hours in order to calculate the dry mass. Specific leaf area (SLA: total leaf area/total dry mass in cm^2/g) was then calculated.

4.3.4.4 Root development

The distribution of tree roots at different depths in the soil cover was studied in the summer (June–July) of the third growing season using core sampling. For the sampling, a Voronoi polygon was established around each tree (one tree at the center of each plot, $N = 12$, with no sampling for the control). This is the elementary space defined by the half distances between the sampled tree and its neighbors (Snowdon et al. 2002). The polygon space was subdivided into four equal parts. Two squares

were selected, one to the left and above the tree, and the other to the right and below it (Figure 4.2). Six random locations were defined for core sampling; the target core depth was around 10 cm, up to the waste rock (four samples for each location). The actual sampling depth was noted to determine the actual volume of each core sample. An 8 cm diameter corer was used.

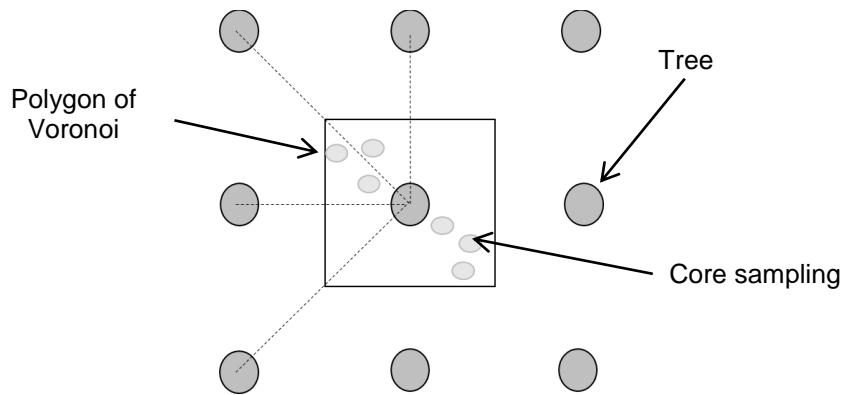


Figure 4.2 Sampling method of soil cores and roots

The samples were stored in a cold room at 4° C pending treatment. The roots were washed in a sieve under running water. Then, tree roots were separated from those of herbaceous plants based on differences in color and architecture. Poplar fine roots are darker and have a more rigid wall than roots of herbaceous plants. Roots were scanned (EPSON Expression 10000XL) and the digital images obtained were analyzed using WinRhizo software (Regent Instruments Inc., Ottawa, ON, Canada), which is commonly used to study root morphology (Pang et al. 2011). By classifying the roots in different diameter classes, the software can be used to calculate several morphological parameters, such as total root length, area and volume. Finally, roots were oven-dried at 60 °C for 48 h and then weighed using a precision balance. For each sample, coarse roots (> 2mm) and fine roots (<2 mm) were weighed separately.

Root development was analyzed using several parameters: total root dry mass, mean root diameter, specific root length (SRL = ratio of root length to root dry mass in cm/g), root length density (RLD = ratio of root length to soil volume in cm/cm³), root tissue density (RTD = ratio of root dry mass to root volume in g/cm³) and specific root area (SRA = ratio of root area to root dry mass in cm²/g). Only fine roots (<2 mm) were considered in the calculation of these parameters.

The ratio of total leaf area to total root length (LA/ RL) per plot was calculated. LA represents the average total leaf area for a tree. RL represents the root length corresponding to the volume of soil occupied by one tree. For each sampling depth range of 10 cm, an average length by soil volume (RLD) was calculated among the six sampling locations around the same tree. Then, the four RLDs of each depth range were added and multiplied by 0.1 and by the surface occupied by one tree. This surface changes according to the spacing between the trees (1 m², 4 m², 16 m², respectively, for trees spaced at 1 × 1, 2 × 2, and 4 × 4m).

4.3.4.5 Nutrient and metal concentration

Leaves were sampled in August during the third growing season (one tree per plot; N = 12). Samples were dried at 60 °C for 48 h and then finely ground. Following HNO₃- HCl digestion, total elemental concentrations (P, K, Ca, Mg, Na, Cd, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb and Zn) were determined by inductive coupled plasma-atomic emission spectrometry (ICP-AES, Lakehead University Centre for Analytical Services, Thunder Bay, ON, Canada). Total N was determined by the Dumas combustion method (Leco CNS-2000, Leco Instruments).

4.3.5 Statistical tests

Data were analyzed using the R software (ver. 3.1.0). A mixed effect ANOVA was conducted. Fixed effects included treatment and sample depth whereas block was the random effect. This ANOVA design was used to test for significant differences

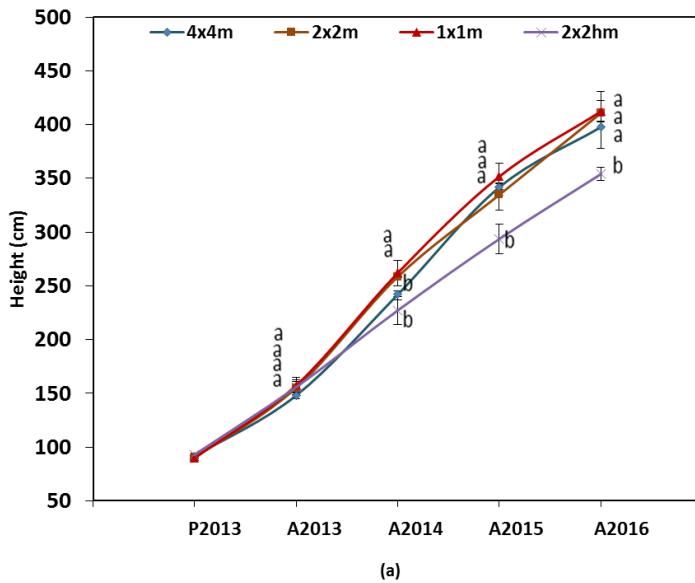
between treatments for the parameters studied: specific root length (SRL), root length density (RLD), root tissue density (RTD), mean root diameter, specific root area (SRA) and total root dry mass. The same type of mixed effect ANOVA was also used to analyze the following parameters: specific leaf area (SLA), $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ isotope ratio in the foliage and ratio of total root length to total leaf area (RL/LA) per plot. A repeated measures ANOVA was used for tree height and diameter, water potential and survival.

ANOVA assumptions (normal distribution, homoscedasticity, independence of errors) were tested. Normality of the dependent variables was tested using a histogram and normal Q-Q plot. Distribution of all variables was normal, except for diameter which was square root transformed. When effects were significant at 5%, a Tukey test was conducted, also at the 5% level.

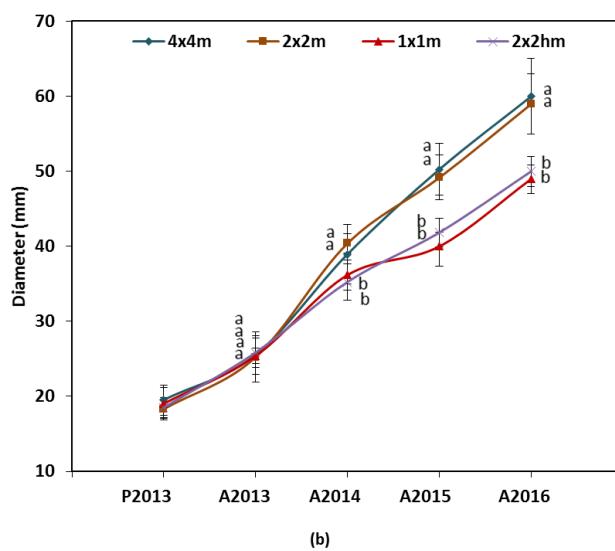
4.4 Results

4.4.1 Growth and survival

Tree survival throughout the three growing seasons was above 98% for all treatments. At the end of the first growing season in 2013, there were no significant differences in mean height between the four treatments (Figure 4.3 (a)). In 2014, mean tree height was significantly higher for the 1×1 m and 2×2 m treatments ($P <0.0001$) compared to the 4×4 m and $2 \times 2\text{h}$ m treatments. The differences increased over time between the $2 \times 2\text{h}$ m treatment and the other treatments. In 2015 and 2016, plants in the $2 \times 2\text{h}$ m treatment had the lowest heights ($P <0.0001$). With regard to basal diameter, significant differences were observed between treatments, starting in the second growing season. Tree diameter was significantly larger for the 2×2 m and 4×4 m spacing treatments compared to the denser spacing (1×1 m) and to the 2×2 m spacing with herbaceous hydro-seeding ($P <0.0001$) (Figure 4.3 (b)).



(a)



(b)

Figure 4.3 Effect of treatment (4×4 m, 2×2 m, 1×1 m tree spacing, and 2×2 h m combined with herbaceous seeding) on maximum height (cm) (a) and basal diameter (mm) (b) of hybrid poplar stems at planting (spring 2013) and at the end of each growing season from 2013 to 2016. Mean (SE). N \geq 36. For each year, mean values that differ significantly ($p < 0.05$) are marked with different letters (a>b)

4.4.2 Exposure to water stress

Volumetric water content (VWC) values were lower in the 1×1 m treatment from early June to the end of August in the third growing season compared to the other treatments ($P < 0.0001$) (Figure 4.4 (a)). The plots with lowest exposure to water stress were those in the 2×2 m treatment, which had higher VWC values in relation to the other treatments. There was no significant differences between the 4×4 m and 2×2 m treatments for the first four weeks studied, starting in early July. Monthly precipitations received on the experimental site during the experiment were in the same range as monthly averages calculated from 1981 to 2010 (Figure 4.4 (b)).

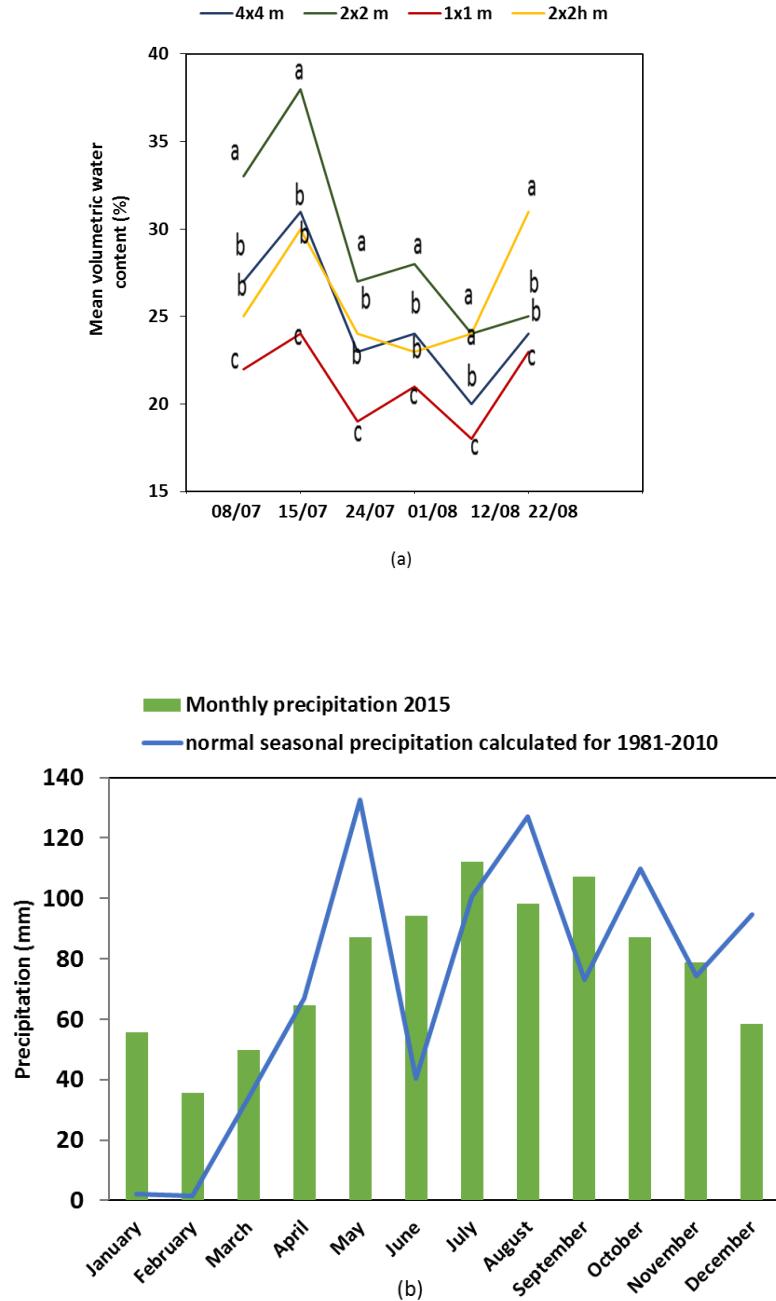


Figure 4.4 (a) Effect of treatment (4×4 m, 2×2 m, 1×1 m tree spacing, and $2 \times 2h$ m $\times 2h$ m combined with herbaceous seeding) on soil volumetric water content from July to August 2015. For each year, mean values that differ significantly ($p < 0.05$) are noted with different letters (a>b>c). (b). Monthly precipitation in 2015 and normal precipitation calculated for 1981–2010

4.4.3 Water stress indicators

The lowest values for leaf water potential were observed in trees in the most densely planted treatment (1×1 m) and with herbaceous hydroseeding (2×2 h m) ($P < 0.0001$) compared to the 2×2 m and 4×4 m treatments (Figure 4.5 (a)). As statistical analysis revealed no interaction between ‘treatment’ and ‘measurement date’, the water potential results presented in this article represent the mean of the six measurements taken over time. Water potential measurements ranged between -0.8 Mpa (4×4 m) and -1.8 Mpa (1×1 m). Total leaf area ($P = 0.007$, $F = 27.98$) and leaf dry mass ($P < 0.0001$, $F = 53.14$) were significantly higher for the 1×1 m and 2×2 h m treatments, compared with the other two treatments (4×4 m and 2×2 m). SLAs were significantly lower for the 1×1 m and 2×2 h m treatments ($P = 0.0004$, $F = 32.46$) relative to the 4×4 m and 2×2 m treatments (Figure 4.5 (b)). The ratio of total leaf area to total fine root length for each plot was greater for the 4×4 m and 2×2 m treatments compared to the 1×1 m and 2×2 h m treatments ($P < 0.0001$).

Statistical analyses did not reveal any significant difference between treatments with regard to the $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ isotope ratio of tree leaves (August 2015), which varied between -28.54 (4×4 m) and -29.03 (1×1 m).

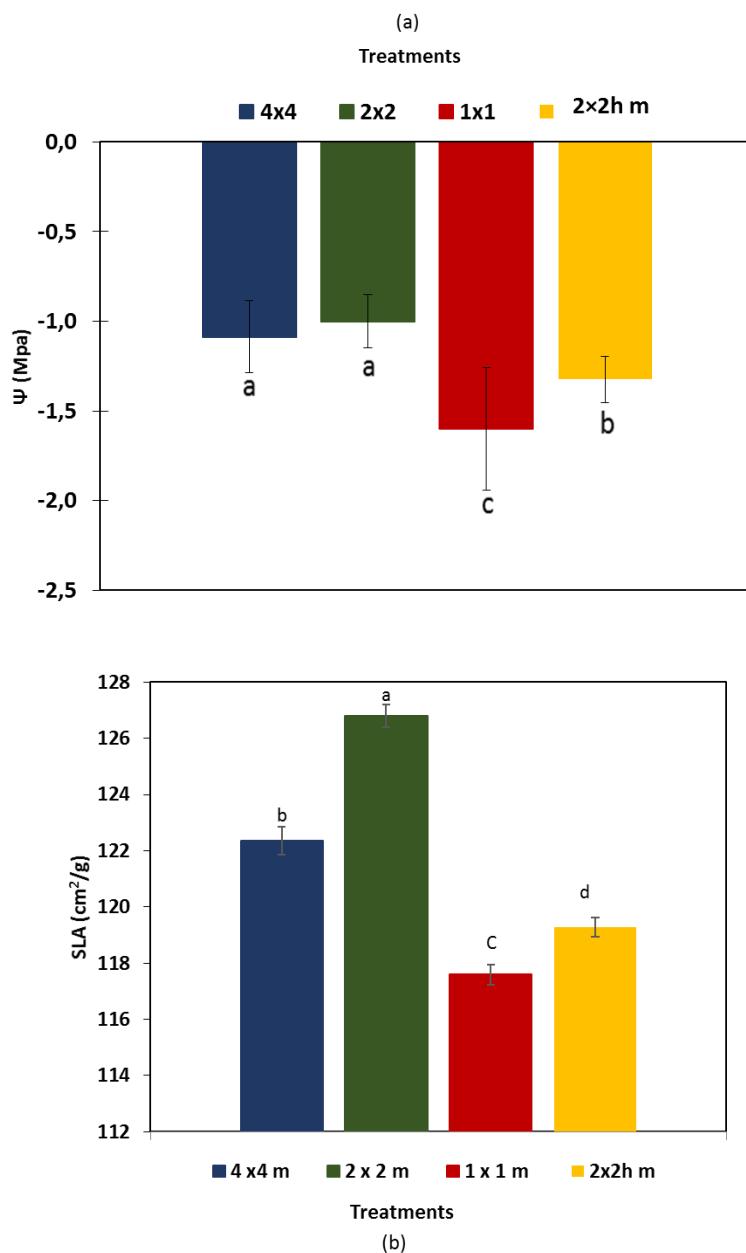


Figure 4.5 Effect of treatment (4×4 m, 2×2 m, 1×1 m tree spacing, and 2×2 h m combined with herbaceous seeding) on foliar water potential (a), specific leaf area (b), and ratio of total leaf area to total fine root length cm/cm (c). Mean values that differ significantly ($p < 0.05$) are noted with different letters (a>b>c)

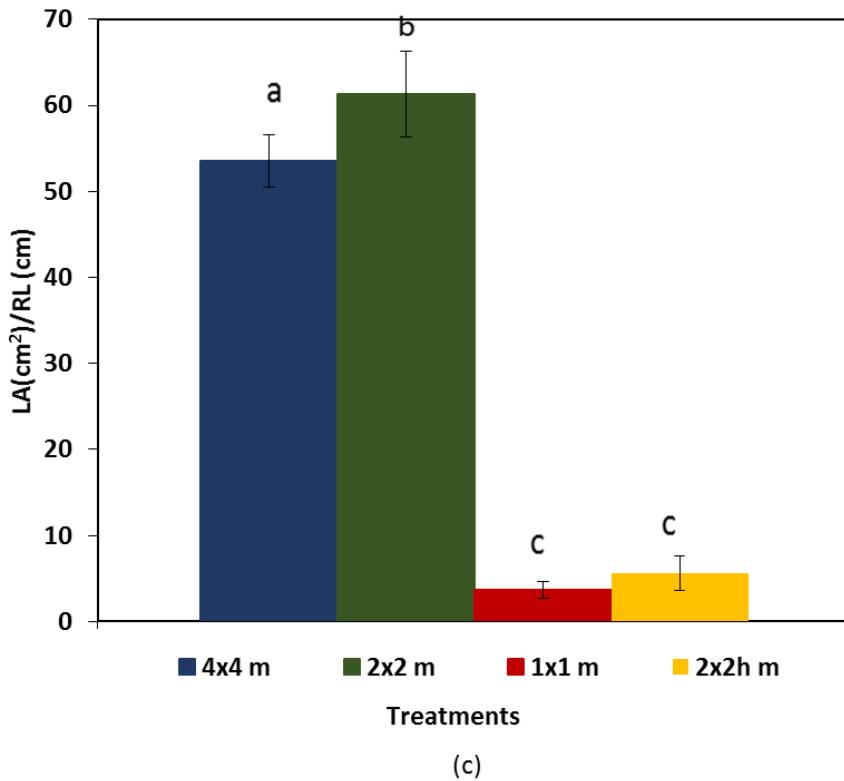


Figure 4.6 Effect of treatment (4×4 m, 2×2 m, 1×1 m tree spacing, and $2 \times 2h$ m combined with herbaceous seeding) on foliar water potential (a), specific leaf area (b), and ratio of total leaf area to total fine root length cm/cm (c). Mean values that differ significantly ($p < 0.05$) are noted with different letters (a>b>c)

4.4.4 Nutrient and metal concentrations

The different treatments had no significant effect on nutrient and metal concentrations in the leaves of planted trees.

4.4.5 Root development

Hybrid poplar fine roots made up 95% of the total root mass in the samples. Moreover, treatment effect was similar when all roots (fine and woody roots) were considered together. Accordingly, only the results obtained for fine roots (<2 mm) in direct relation to their water uptake function will be presented.

Treatment effect and depth were significant for SRL and RLD, RTD, SRA and DM (dry mass) ($P < 0.0001$). There was an interaction between treatment and depth. For all depths <30 cm, SRL, RLD, RTD and DM were higher for the more densely planted plot (1 × 1 m) and that with herbaceous hydroseeding (2 × 2 m h) compared to the other two treatments (Figure 4.6). These variables largely decreased after 30 cm of soil depth, with no more significant differences between treatments for SRL, RTD and DM. In terms of SRA, the 1 × 1 m and 2 × 2 m h treatments also differed from the others, with SRA values much higher and largely decreasing after a soil depth of 30 cm. There was no significant difference in mean fine root diameter in terms of the effect of depth and treatment. Diameter did not vary significantly between treatments or with sampling depth.

The ratio of total leaf area to total root length (RL/ LA) was lower for the plot with herbaceous hydroseeding (2 × 2 m h) and the more densely planted plot (1 × 1 m) compared to the other two treatments ($P < 0.0001$).

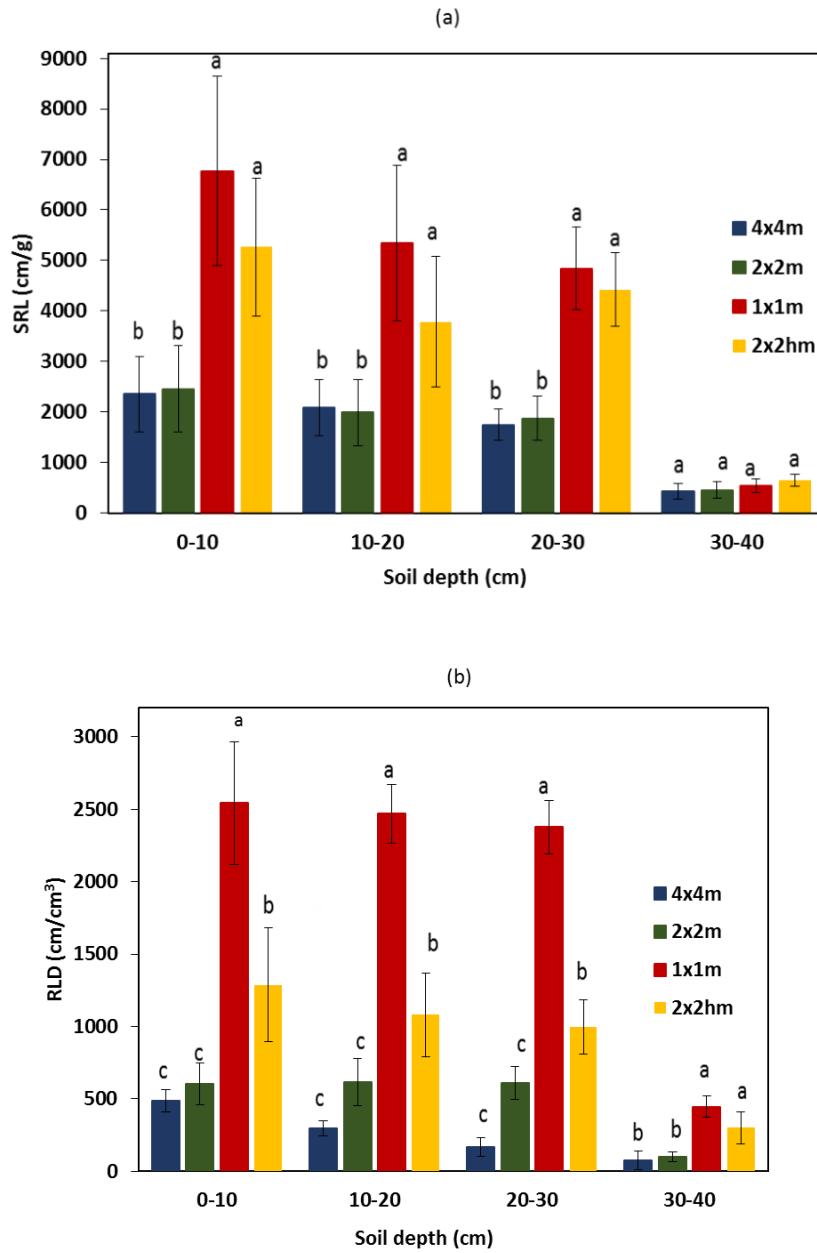


Figure 4.7 Effect of treatment 4×4 m, 2×2 m, 1×1 m tree spacing, and 2×2 hm combined with herbaceous seeding and soil depth (0–10, 10–20, 20–30, 30–40 cm) on SRL (a) RLD (b) RTD (c) and dry matter (d) ($N = 18$) for poplar fine roots. For the same depth, parameters that differ significantly ($p < 0.05$) are noted with different letters ($a > b > c$)

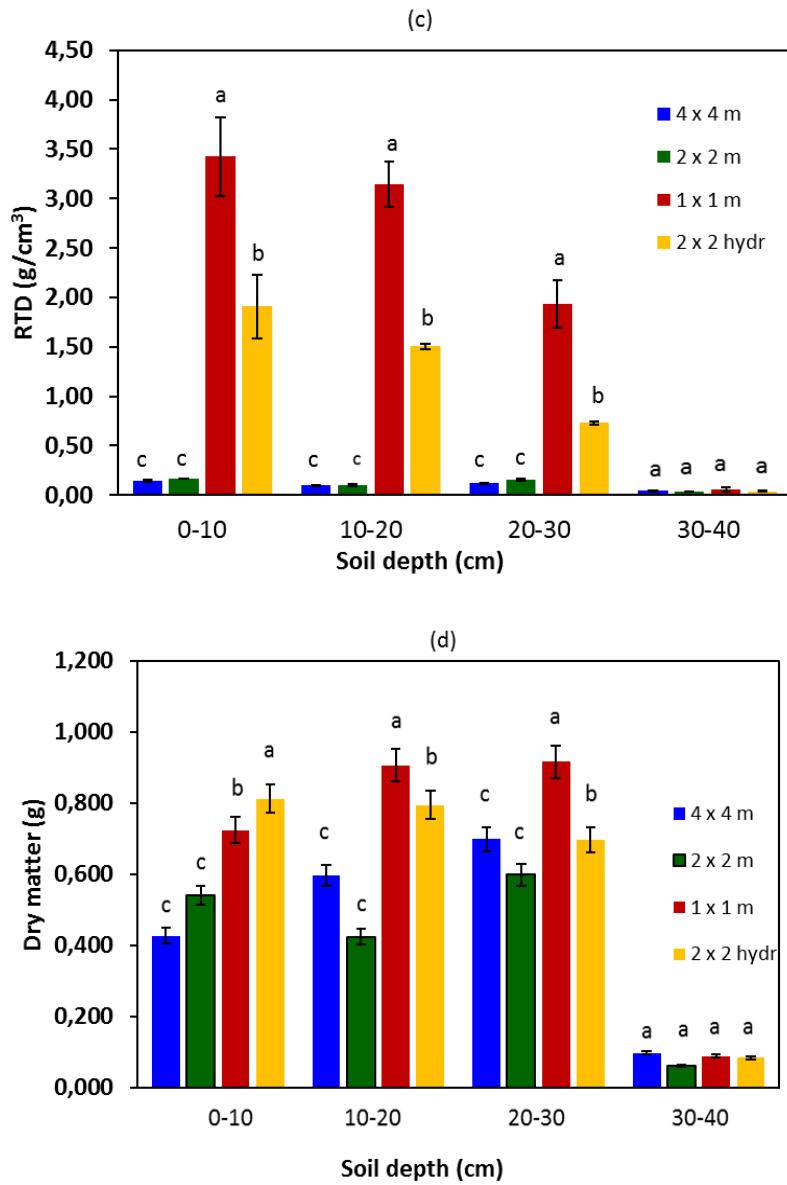


Figure 4.8 Effect of treatment 4×4 m, 2×2 m, 1×1 m tree spacing, and 2×2 h m combined with herbaceous seeding) and soil depth (0–10, 10–20, 20–30, 30–40 cm) on SRL (a) RLD (b) RTD (c) and dry matter (d) ($N = 18$) for poplar fine roots. For the same depth, parameters that differ significantly ($p < 0.05$) are noted with different letters ($a > b > c$)

4.5 Discussion

4.5.1 Water and nutritional stress exposure and tolerance of poplars planted on a waste rock slope

The high survival rate after four growing seasons indicates high acclimatization capacity of the hybrid poplar *P. maximowiczii* × *P. balsamifera* (M × B) on a mine waste rock slope, despite a planting environment characterized by limited water supply. There was no planting shock and the studied hybrid was able to tolerate the water deficit on the slope. The treatments showed mean annual height growths of 64 and 95 cm. year⁻¹ during the first and second years, respectively. These growth rates are similar or superior to those observed for other hybrid poplar plantations in similar boreal conditions. For example, growth was lower than 40 cm. year⁻¹ for the same poplar clone in studies conducted by Larchevêque et al. (2011a) and Benomar et al. (2012). Results obtained for all treatments in the present study also showed no metal accumulation, perhaps due to low total metal concentrations and/or neutral pH of waste rocks (Guittonny-Larchevêque et al. 2016). Volumetric water content of the surface soil was generally above the permanent wilting point of 20% (VWC varied between 18% and 38%), with the exception of the 1 × 1 m treatment, where these values were close to 20% for certain weeks. Low soil water content was not associated to low precipitation. According to climate data for 2015, when water stress measurements were conducted, monthly precipitation over the growing season (May–October) was similar to normal mean precipitation calculated for the past 30 years. Moreover, regardless of the treatment, leaf water potential values recorded were below drought thresholds reported previously (-3.7 to -0.7) (Ridolfi and Dreyer 1997; Larchevêque et al. 2011b; Barchet et al. 2014; Guittonny-Larchevêque et al. 2016) and triggered a response in trees that varied with treatment.

4.5.2 Variation in water stress exposure based on competition and response of poplars in terms of stress indicators

4.5.2.1 Stress exposure and water stress indicators

The first hypothesis was partially confirmed by the results. Exposure to water stress differed depending on treatment. Due to competition, the values for volumetric water content of the surface soil were lowest in the high density treatment (VWCs were close to the 20% wilting point for certain weeks). However, there was no significant difference between the 2×2 m and 4×4 m treatments. This finding can be explained by the development of an herbaceous cover in the plantation with wide spacing (4×4 m), where canopy closure occurs later than with closer spacing. In a study of the same plantation, Remaury et al. (2018) observed that the aboveground vegetation cover resulting from natural colonization after planting changed according to planting density.

Poplar response to water stress caused by competition was characterized by a decrease in leaf water potential. In their study on different eucalyptus clones (a fast-growing species), Hakamada et al. (2017) similarly observed that leaf water potential was affected by planting density. The results of the present study did not reveal any difference in isotope ratio between treatments. It appears that even in case of low water potential, poplars kept their stomata open, thereby exhibiting anisohydric behavior (Tardieu and Simonneau 1998). A similar response of hybrid poplars was also observed previously (Larchevêque et al. 2011b; Attia et al. 2015 ; Guittonny-Larchevêque et al. 2016). As a result, planted trees maintained their physiological functions and growth despite reduced soil moisture availability (Farquhar et al. 1989). While this anisohydric behavior may appear beneficial in conditions of moderate water stress, it can become risky and jeopardize plant survival in more severe and/or longer cases of water scarcity (McDowell et al. 2008). However, poplar trees show considerable variation in drought tolerance (Hamanishi et al. 2010). Several researchers have observed an isohydric effect in certain poplars (Ceulemans

et al. 1988; Bassman and Zwier 1991; Gebre et al. 1998; Barchet et al. 2014 ; Théroux Rancourt et al. 2015 ; Lütschwager et al. 2016). Isohydric plants are able to maintain constant water potential regardless of water conditions (Amigues et al. 2006 ; McDowell et al. 2008). However, these conclusions should be qualified because the results of isotope ratios were not confirmed by complimentary measurements of stomatal conductance or transpiration rates.

4.5.2.2 Tree growth

Increased intraspecific competition associated with narrower spacing between trees resulted in reduced diameter growth but did not affect tree height (there were no significant differences between the three treatments (1×1 m, 2×2 m and 4×4 m)). Height growth is generally considered to be unaffected by variations in competition (Woodruff et al. 2002). However, other studies have demonstrated that tree height can increase, decrease or remain unchanged depending on planting density (Nilsson and Albrektson 1994; DeBell et al. 1996; Pinkard and Neilsen 2003; Toillon et al. 2013). Increased planting density results in greater competition for water, nutrients and light (Benomar et al. 2012; Toillon et al. 2013). Higher densities thus favor height growth to the detriment of diameter growth due to increased competition for light (Brodie and Debelle 2004; Benomar et al. 2012). In hybrid poplars in particular, diameter growth is generally affected before height growth in the presence of water deficit (Brodie and Debelle 2004). Consequently, initial tree spacing is a key factor in stand development.

As expected, and in line with the second hypothesis, presence of herbaceous plants in the 2×2 h m plantation reduced poplar height and diameter growth. This indicates that fast-growing herbaceous plants compete for resources and can delay tree development (Henkel-Johnson 2014; Grenke et al. 2016; Bockstette et al. 2017). Other studies have also reported the negative effect of understory vegetation on hybrid poplar growth (Goehring 2015). Poplars are known for their high water

requirements (Goehring 2015; Monclús et al. 2006). Competition with herbaceous vegetation occurs either aboveground for light, belowground for water and mineral elements (Goehring 2015; Balandier et al. 2006). Thus, the results of the present study suggest decreased soil moisture in the 2×2h m plantation due to competition with weeds (Powell and Bork 2004; Pinno and Bélanger 2009). Nutrient availability, particularly nitrogen, can further limit the development of poplar plantations (Coll et al. 2007; Kabba et al. 2007). Accordingly, the importance of controlling herbaceous vegetation and/or adequately fertilizing the soil, particularly during the first years of growth, has been highlighted (Coleman et al. 2006). On the other hand, herbaceous plants can also have positive effects on slopes, mainly nutrient retention and reduction of soil erosion (Remaury et al. 2018). However, little information is available about how herbaceous plants can perform ecological functions without subjecting planted trees to competition.

4.5.3 Poplar acclimatization to water stress explaining tolerance below and aboveground

Intensified competition associated with narrower tree spacing and herbaceous seeding increased tree demand for limited resources, such as water, to which poplars responded by increasing root biomass. This may constitute a form of acclimatization to water deficit by the clone tested. Several studies have shown that drought tolerant tree species tend to allow more resources to root biomass development to maximize water supply (Marino and Gross 1998; Larchevêque et al. 2011b).

Fine roots of hybrid poplars are known for their high plasticity and ability to adapt to limited water and nutrient conditions. The majority of fine roots were located in the first 30 cm of soil. Other studies have also observed higher fine root density at the soil surface – that is, within the 0–30 cm horizon. For example, in their study of 16 hybrid poplars, Crow and Houston (2004) reported that the 0–36 cm stratum

contained, on average, 81% of the total number of roots. Consistent with the third hypothesis tested, all the studied root morphological traits (SRL, RLD, SRA, DM and RTD) were higher in the 1×1 m and $2 \times 2h$ m treatments relative to the two other treatments, with the exception of mean diameter, which was insensitive to treatment. The root systems of drought-tolerant plants can optimize contact area with the soil and increase the explored substrate volume by increasing SRA, SRL and RLD (Comas et al. 2013). The result obtained for RTD seems to contradict those obtained for SRL and RLD. In fact, a negative correlation was expected between them, with lower RTDs in treatments with higher competition. It is likely that trees responded to increased competition by increasing root life span (Benomar et al. 2012). In addition, N concentrations in tree leaves were relatively low. Trubat et al. (2006) attributed the increase in RTD to lack of nutriments often coinciding with lack of water.

Drought tolerance through increased investment in the root system comes at a cost in terms of reduced aboveground growth. Biomass allocation to above-ground growth was lower in trees subject to greater stress. Similar results were reported in other studies of the effect of competition on various species, such as poplar (Benomar et al. 2012; Toillon et al. 2013), eucalyptus (Stape et al. 2010; Hakamada et al. 2017) or pine (Blevins et al. 2005).

In line with the fifth hypothesis, hybrid poplars exhibited decreased leaf area in response to stress, thereby reducing the total transpiring area in order to conserve water. The 1×1 m and $2 \times 2h$ m treatments had the lowest SLA values. Indeed, changes to SLA in water-limiting conditions reflect a modulation of leaf structure. This resistance mechanism is often used by certain poplar clones to reduce transpiration by reducing the leaf area exposed to light and CO₂ by unit of biomass (Barigah et al. 1994; Marron et al. 2003). Moreover, the higher RL/LA ratio in trees subject to greater stress indicates water acquisition capacity coupled with a

simultaneous reduction in water loss by transpiration, which is considered a drought resistance criterion.

4.6 Conclusion

This work contributes to selecting planting densities allowing short-term (three years) hybrid poplar survival and growth despite high water requirement. When facing a lack of water in the soil, the tested poplar used a combination of aboveground and belowground acclimatization strategies. The root traits examined in this study showed that poplars invested more energy in root development to acquire more water through a larger surface of exchange between roots and soil per unit of root biomass. Aboveground, trees adopted a more conservative resource strategy, with reduced SLAs and lower biomass production. In the short term, growth and survival rates were high for all treatments, despite low soil water availability in treatments where competition was higher. This confirms that some clones of hybrid poplars could be well adapted to mine sites' revegetation, even on drier surfaces. However, clone choice may be of primary importance due to the known variation of drought resistance. Moreover, survival of the anisohydric poplar tested in this study should be monitored in the longer term, as higher water requirements could accompany size increase. Finally, as poplars are amongst the trees having the greatest water needs, less water-demanding species could also possibly cope with short-term water stress on waste rock slopes.

4.7 Acknowledgements

The authors would like to thank the research technician and undergraduate students who contributed to the collection of field data: Avril Jobin, Charles Frenette-Vallières, Sara Gervais, Antoine Beaulieu, Maguelonne Rajot and Liam Boivin.

4.8 Disclosure statement

No potential conflict of interest was reported by the authors.

4.9 Funding

This work was funded by the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC; grant number RDCPJ 462610-13) and the Canadian Malartic Partnership.

CHAPITRE 5

ARTICLE 2

Influence of competition on root architecture and root anchorage of young hybrid
poplar plantations in waste rock slopes

Khadija Babi^{1,*}, Marie Guittonny¹, Bruno Bussière¹, Guy R. Larocque²

¹Research Institute in Mines and Environment, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, 445, boul. de l'Université, Rouyn-Noranda, QC J9X 5E4, Canada

² Natural Resources Canada, Canadian Forest Service, Laurentian Forestry Centre, 1055 du P.E.P.S., P.O. Box 10380, Stn. Sainte-Foy, Quebec G1V 4C7.

*khadija.babi@uqat.ca

5.1 Abstract

In revegetated mine slopes, tree uprooting could negatively affect the integrity of constructed mine structures and soils. Root systems are crucial to tree and soil stability in terms of mechanical support but are rarely considered in revegetation studies. Intra-specific competition associated with planting density and competition with herbaceous plants, which are most commonly used to control erosion, can affect

root architecture and have a significant impact on tree growth. This study aimed at determining the effect of planting density and herbaceous hydroseeding on the root architecture and mechanical resistance to uprooting of planted poplars in waste rock berms.

The study took place on an open pit gold mine located in the Canadian boreal forest in Malartic, Québec, Canada. A hybrid poplar plantation was established in 2013 on soil-covered waste rock slopes (3H:1V), with 4 treatments randomly distributed in three replicated blocks: 4×4 m, 2×2 m, and 1×1 m between trees and 2×2h m with hydroseeding. Lateral uprooting tests of four-year-old hybrid poplars were conducted in the direction of the slope. Root architecture characteristics were also studied using a complete excavation method.

The maximum resistance to the uprooting force was observed for the 2×2 m treatment. Root systems were more symmetrical, deep, branched, and had higher root diameters for the 2×2 m and 4×4 m treatments. In contrast, the treatments with greater competition (1×1 m and 2×2h m) showed shallower root systems with smaller diameter roots, with asymmetrical structures. The root anchorage indexes calculated in this study were higher for the 2 × 2 m and 4×4 m treatments compared to the other treatments. Therefore, competition can significantly reduce tree anchorage.

Plantations designed with trees spaced at 2×2 m and 4×4 m, without hydroseeding of herbaceous plants, are preferred for the revegetation of the studied mine waste rock berm because they decrease tree uprooting risk.

Keywords: mine reclamation; mine revegetation; root traits; root architecture; slope; competition; tree anchorage

Résumé

Les systèmes racinaires sont essentiels à la stabilité des arbres et du sol en termes de support mécanique, mais sont rarement considérés dans les études de végétalisation. La compétition intra-spécifique associée à la densité de plantation et la compétition avec les herbacées, qui sont généralement utilisées pour contrôler l'érosion, peuvent affecter l'architecture racinaire et avoir un impact significatif sur la croissance des arbres. Cette recherche visait à déterminer l'effet de la densité de plantation et de l'hydroensemencement herbacé sur l'architecture racinaire et la résistance mécanique au déracinement des peupliers plantés dans les pentes de stériles.

L'étude a eu lieu dans une mine d'or à ciel ouvert située dans la forêt boréale canadienne à Malartic, Québec, Canada. Une plantation de peuplier hybride a été installée en 2013 sur des pentes de stériles recouvertes de sol (3 h : 1V), avec 4 traitements répartis au hasard en trois blocs de répétition : 4 × 4 m, 2 × 2 m et 1 × 1 m entre les arbres et 2 × 2 h m avec hydroensemencement herbacé. Des tests d'arrachement latéraux de peupliers hybrides âgés de quatre ans ont été effectués dans le sens de la pente. Les caractéristiques de l'architecture racinaire ont également été étudiées à l'aide d'une méthode d'excavation complète.

La résistance maximale à la force d'arrachement a été observée pour le traitement de 2 × 2 m. Les systèmes racinaires étaient plus symétriques, profonds, ramifiés et avaient des diamètres racinaires plus élevés pour les traitements 2×2 m et 4×4 m. En revanche, les traitements avec une plus grande compétition (1×1 m et 2×2h m) ont montré des systèmes racinaires moins profonds avec des racines de plus petit diamètre, avec des structures asymétriques. Les indices d'ancrage racinaire calculés dans cette étude étaient plus élevés pour les traitements 2 × 2 m et 4 × 4 m par rapport aux autres traitements. Par conséquent, la compétition peut réduire considérablement l'ancrage des arbres.

Les plantations avec des arbres espacés de 2×2 m et 4×4 m, sans ensemencement de plantes herbacées, sont préférées pour la revégétalisation des pentes de stériles miniers étudiées, car elles ont augmenté l'ancrage des arbres.

Mots clés : restauration des mines; revégétalisation des mines; architecture racinaire; pente; compétition; ancrage des arbres.

5.2 Introduction

In recent years, laws and regulations related to mine site reclamation have become more and more stringent. In particular, the revegetation of mine sites must control erosion and restore the site to a natural appearance. Tree planting is a useful means by which to reintegrate restored mines into natural forested lands. Planted trees can facilitate the establishment of native species from adjacent forests (Bouchard et al. 2018; Nichols et al. 2010; Strong 2000). However, few studies are available about tree planting in the context of reclaiming metalliferous mine wastes (Larchevêque et al. 2013; Asensio et al., 2011; Boyter et al. 2009), especially on waste rock slopes.

In the case of trees planted on waste rock slopes, tree uprooting could alter the integrity of the constructed soils and structures, and uprooting risk should be minimized. The root system plays an essential role in mechanical support and stability of trees and soils (Yang et al. 2018; Danquechin-Dorval et al. 2016; De Baets et al. 2006; Gyssels et al. 2005). Plantations on waste rocks are often established on soils with limited thicknesses for economic reasons, which may constrain root development. However, root development in waste rock slopes has rarely been studied in the scientific literature. Moreover, only a few studies have focused on how the spatial arrangement of roots contributes to tree stability (Danquechin-Dorval et al. 2016; Stokes et al., 2008, Dupuy et al, 2007; Dupuy et al., 2005. The scarcity of literature can be explained, at least in part, by the fact that root systems are an invisible part of trees and are difficult to sample (Gyssels and Poesen 2003).

Fast-growing trees like hybrid poplars can be used for rapid revegetation of mine sites and show good survival and growth rates (Remaury et al. 2019; Larchevêque et al. 2014; Casselman et al., 2006; McGill et al., 2004; Clark Ashby, 1995; Guy and Bateman, 1989; Czapowskyj, 1978). Their extensive root systems explore the

available soil and allow these trees to be firmly anchored to the soil and to resist disruptions by environmental factors such as wind and precipitation (Douglas et al. 2010). Hybrid poplars are also highly sensitive to changes in environmental conditions (e.g., weather and soil texture and structure) (Zandalinas et al., 2018; Dickmann, 2001). Therefore, even small variations in planting density and competing vegetation are expected to induce noticeable responses. Hybrid poplars are sensitive to herbaceous competition, particularly during the initial growing seasons (Kabba et al. 2007). Herbaceous vegetation can compete with planted trees for water, mineral elements, and light (Bockstette *et al.*, 2017). For example, at the aboveground level, Grenke et al. (2016) observed negative effects of understory vegetation on the height of hybrid poplars. Intra-specific competition results in decreased diameter growth due to increased competition for light (Toillon *et al.*, 2013; Larocque, 1999). Similarly, the findings of Benomar et al. (2012) suggest that competition with neighbouring trees result in a reduction of the aboveground biomass of two tested hybrid poplars.

Tree stability can be evaluated by the force of a tree's adhesion between the soil and the root system when submitted to traction. This resistance force varies with the root system type and degree of branching (Bell et al. 1991). The morphology and architecture of a root system greatly influences tree stability (Coutts 1983; Stokes et al. 2007). Root architecture is the spatial configuration of a root system (Gregory, 2006) and is governed by interactions between genetics and environmental conditions (Kano-Nakata et al., 2019; Ingram and Malamy 2010; Hodge et al. 2009; Wu and Stettler, 1994). The root system of a tree is comprised of two types of roots: coarse roots and fine roots (Drénou 2006). Coarse roots increase the volume of the soil explored and ensure the anchorage of the tree in the soil. They play an important role in the stability of a tree and form a stiffened base to support the tree (Coutts 1983).

Coarse roots are distinguished from fine roots by their lignification and secondary anatomy structure, as well as by their diameter, which is typically greater than 1-2 mm (Fortier et al. 2013; Böhm 1979). Multiple traits that describe the architecture and the morphology of a root system can play a role in anchoring the tree (Gregory 2006; Nicoll et al., 2006; Godin 2000; Fitter 1991; Godin et al. 1999; Harper et al. 1991), including root number, root diameter, maximum root depth, number of sink roots, number of root tips, and angle between the lateral roots (Stokes et al. 1995; Nicoll et Ray 1996). The diameter of roots and the number of sink roots are important factors for root system resistance when exposed to winds (Stokes et al. 2007). Large, structural roots will be richer in lignin, and therefore more resistant to uprooting (Stokes et al. 1995).

There are diverse techniques to study root systems. Uprooting tests and manual excavation are the most common methods used (Rahardjo et al. 2014; James et al. 2013; Sani et al. 2012; Peltola et al. 2000; Danjon et al. 1999a). Traditional methods for roots structure measurements are based on photograph and drawing after excavation, followed by qualitative analysis of root structure (Böhm 2012; Danjon et al., 2008; Danjon et al. 1999; Gray and Leiser 1982). Trench profiles are also used to perform quantitative measurements like root occurrence with depth (Guittonny-Larchevêque and Lortie 2017). However, the use of more than one technique is often necessary to provide complete information on coarse root architecture.

The architecture of the roots depends on several factors, including plant species, soil type, seedling genetics, resource distribution (e.g., water and nutrients) and competition for water and nutrients (Morris et al. 2017; Ingram et Malamy 2010; Schenk 2006). The ability of plant to adjust its root system to changing conditions is called developmental plasticity (Kano-Nakata et al. 2019; Bockstette, 2017; McCleery et al. 2017). Several authors have studied the influence of inter- and intra-specific competition on the development of aboveground parts of trees (Bockstette

et al. 2017; Grenke et al. 2016; Benomar et al. 2012; Pinno and Belanger, 2009; Kabba et al. 2007; Welham et al. 2007). However, knowledge on the effects of competition on the belowground development of trees and on tree stability is still scarce at present (Bockstette 2017). At the underground level, herbaceous competition can affect root development (Harmer and Robertson, 2003; Schroth, 1999). Ludovici et al. (1997) demonstrated that herbaceous competition induced reductions in soil water availability reduced the rate of root extension of pine seedlings. The application of herbicides strongly increased in the number of cherry tree roots in the study of Dawson et al. (2001). Results of Schaller et al. (2003) suggest that strips of competitive grasses can reduce the lateral root development of *Eucalyptus deglupta*, especially of young trees. And Collet et al. (2006) found that root system size was considerably reduced by competition of herbaceous vegetation. But, in the context of reclaiming metalliferous mine wastes, the influence of competition on root systems of planted hybrid poplar is unknown.

The main objective of this study was to determine which planting designs (in terms of competition levels) favor root development to increase resistance to uprooting of a hybrid poplar plantation on a soil-covered waste rock slope (3H:1V). More specifically, the effects of variable intra-specific (planting density) and inter-specific (+ herbaceous hydroseeding) competition levels on the root architecture and the mechanical resistance to uprooting of planted trees were investigated. The main hypotheses of this study were: i) the maximum resistance to the uprooting force will be lower in plots with increased competition levels (i.e., with denser spacing and with hydroseeded herbaceous species); ii) the main quantitative variables describing the root system structure (e.g., root number, root diameter, maximum rooting depth, number of sink roots, number of root tips) will be reduced by increased competition; and iii) aboveground biomass growth of hybrid poplar will decrease with increase in competition level.

5.3 Materials and methods

5.3.1 Site description

The present study took place at an open pit gold mine located in Malartic, Québec (Canada) in the boreal forest ($48^{\circ}08'00''\text{N}$, $78^{\circ}08'00''\text{W}$). Canadian Malartic mine is one of the largest gold mines in Canada, with a production rate of 55,000 t/day and a grade of approximately 1 g/t. The site belongs to the white birch domain (bioclimatic domain), which occupies the southern part of the boreal zone (Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles 2003). The forest vegetation that surrounds the site is mainly composed of stands of black spruce (*Picea mariana*), jack pine (*Pinus banksiana*), and larch (*Larix spp.*), mixed with white birch (*Betula papyrifera*) and trembling aspen (*Populus tremuloides*). The growing season runs from mid-May to October, Mean temperature during the warmest months (June, July, and August) is about $18\text{--}19\text{ }^{\circ}\text{C}$. The mean annual air temperature is $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ and the mean annual precipitation is around 929 mm (Canada Government 2017). The mean number of frost-free days is 97 (Agriculture and Agri-Food Canada 2014).

5.3.2 Experimental design

Four treatments were tested to evaluate the effect of tree spacing and herbaceous hydroseeding on the anchorage of planted hybrid poplars. The design consisted of twelve experimental plots ($8\text{ or }12\text{ m} \times 14\text{ m}$) in a randomized complete block design containing four treatments randomly distributed in three replication blocks:

- $1 \times 1\text{ m}$: plots without hydroseeding planted at $1 \times 1\text{ m}$ tree spacing (117 planted hybrid poplars)
- $2 \times 2\text{ m}$: plots without hydroseeding planted at $2 \times 2\text{ m}$ tree spacing (35 planted hybrid poplars)

- 2×2h m: plots with hydroseeding of a grass/legume mixture planted at 2 × 2 m tree spacing (35 planted hybrid poplars)
- 4×4 m: plots without hydroseeding planted at 4×4 m tree spacing (12 planted hybrid poplars).

Three plots without trees served as a control for additional follow up (soil erosion survey, Remaury et al. 2019).

5.3.3 Substrate

The experimental plots were established in May 2013 on 3H:1V (33%) slope of waste rocks that were covered with a 50-cm-thick layer of Grey Luvisol soil (Agriculture and Agri-Food Canada 2014) following pit stripping. The surface soil consisted of the O and A horizons, the first 30 cm of dark soil, rich in organic matter. The soil was stored for 30-36 months before use in 7-m high piles with a slope of 2.5H:1V. In May 2013, during tree planting, soil samples were collected for chemical characterization; one composite sample was composed of two samples (0-10 cm depth) per plot. Analyse of nutritional elements was conducted on sieved (2-mm mesh), finely ground, oven-dried samples (50 °C) by the Lakehead University Centre for Analytical Services (Thunder Bay, Ontario, Canada). Metal (oid) concentrations in the soil and waste rock did not exceed the regulatory thresholds (Table 4.1).

5.3.4 Plant material

The plant material used in this study was a semi-exotic hybrid poplar clone (*Populus maximowiczii* A. Henry × *Populus balsamifera* L. (M × B) - clone 915319). The Québec Ministry of Energy and Natural Resources (MERN) produced the trees locally. 1.2-m-long whips were planted vertically directly in the soil at a depth of 30 cm in early June 2013. To limit soil erosion and runoff, two lines of fast-growing willows were planted and an herbaceous hydroseeding was performed on the uppermost two metres of the slope. The poplars were planted in the last twelve meters of the lower part of the slope.

The hydroseeding was performed after tree planting with an 8-32-16 fertilizer (8% N, 32% P, and 16% K, di- and mono-ammonium phosphates and potassium chloride; 750 kg/ha) in addition to agronomic seeds (100 kg/ha) composed of the following species: *Avena sativa* L. (cultivated oats; 11%), *Festuca* L. (Fescue; 15%), *Lolium perenne* L. (English ray grass; 12%), *Lotus* sp. (Elna *Lotus*; 15%), *Poa pratensis* L. (Kentucky blue grass; 15%), *Sorghum bicolor* L. (sorghum bicolor Moench; 12%), *Trifolium repens* L. (white clover; 7%), *Trifolium hybridum* L. (alsike clover; 3%), and *Trifolium pratense* L. (red clover; 10%). This hydroseeding of fast-growing herbaceous plants resulted in a greater weed cover in the three first growing seasons after planting compared to non-hydroseeded plots (see Remaury et al. 2019).

5.3.5 Measurement and analysis

5.3.5.1 Lateral uprooting tests

Uprooting tests were conducted in July 2016 (fourth growing season) to estimate the maximum resisting force of trees (one tree in the center of each plot for each treatment). The lateral traction tests were adapted from Grouard (1995) and Sheedy (1996), and performed using an automatic winch, a steel cable, a chain, and a sling

(Figure 5.1). The cable was attached to the base of the tree using a chain surrounding the trunk. A lateral traction force (0-6700 N) was exerted down the slope with a constant rate of displacement parallel to the slope. The applied force, as well as the displacement of the tree (displacement of the stem compared to the initial state), were noted every minute until the tree was removed from the soil.

Preliminary tests were conducted to establish the height at which the tree would be attached, so that the winching force did not induce significant curvature of the stems, but rather exerted a significant force on the root systems (i.e, shear stress rather than rotational stress).

Traction force measurements were performed by optimum dynamometer scales model OP 926 (Optima Led Digital Hanging Scale 2000 lb), which was placed on the winch itself installed on four wheels (WARN Pro Vantage 2500SCE 4200 lb). Force values were then converted to Newtons.

The curves of the uprooting force (N) versus displacement (cm) were drawn. Then, the area under the curve (work in J) of the uprooting force according to displacement was calculated using trapezoidal method.

Prior to the uprooting tests, aboveground measurements were taken to determine maximum height and basal diameter (diameter of the base of the stem).

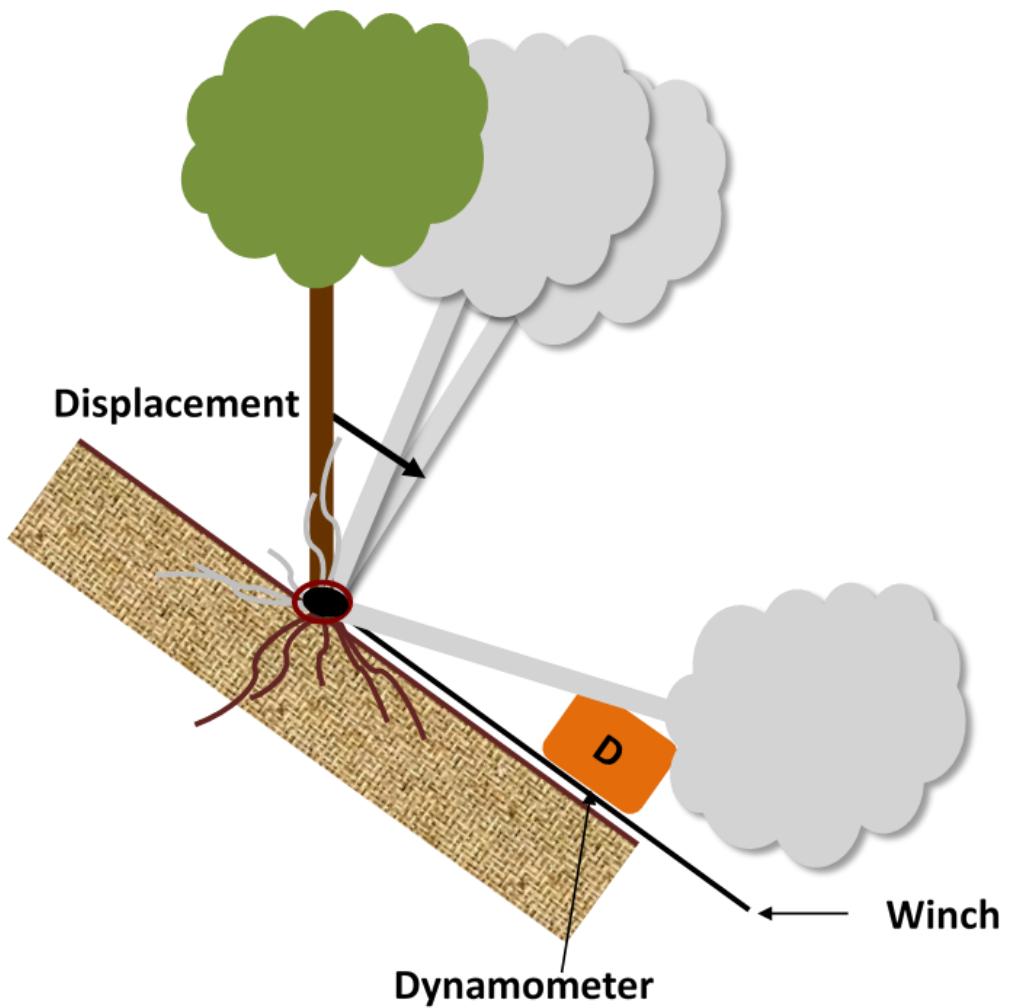


Figure 5.1 Schematic illustration of lateral uprooting tests

5.3.5.2 Root distribution along the soil profile

In June 2016, trenches were made under the second tree in the second line from the bottom of the slope about ten centimeters from the stem. A 1×1 m large and deep observation trench was dug with a mechanical shovel (Figure 5.2) for each plot ($N = 12$). A 70×80 cm grid with 5×5 cm squares was applied vertically to the profile (Figure 5.3). Root occurrence (i.e., the number of squares where a root is present / total number of squares $\times 100$) and the number and diameter of the roots were recorded for each of the cells in the grid and compiled according to the depth of the soil (every 5 cm; Guittonny-Larchevêque and Lortie 2017). Secondary roots were not counted when they were located in the same square as the primary root from which they originated. Conversely, they were considered when they crossed the limits of a given square.



Figure 5.2 Trenches made with a mechanical shovel to observe the vertical profile of roots



Figure 5.3 Root count grid applied to the vertical walls of the trenches

5.3.5.3 Root excavation

In the summer of the fourth growing season (June 2016), the root systems of twelve trees, one tree in the center of each plot for each treatment, were excavated to observe the symmetry, distribution, and extent of the coarse roots (diameter < 4 mm). Excavation of the root systems was performed by applying a high-pressure water jet (Figure 5.4) using a hydraulic pump (PUMP 2 " MULTIQUIP, N Series: 2H-7348). With this pressure, the soil layer is removed until all coarse roots are visible. Once the roots were excavated, the structure of the root system was photographed, described, and schematized (360° distribution, vertical distribution). Next, architectural measurements were performed, including the number of main roots, number of branches at each main root, length of the main root, angles between main roots, and diameter every 50 cm or until there was no more change in the diameter. Measurements were taken from the collar (origin of all roots) in the direction of growth. Before excavation, the basal diameter of the main stem and the maximum aboveground height were measured for the twelve trees.

The belowground and aboveground parts of the twelve trees were harvested to quantify the aboveground/belowground ratios of their biomasses. The samples were oven-dried at 90 °C for 48 h for the aboveground parts and at 90 °C for 72 h for the roots. Then, the samples were weighed.



Figure 5.4 Photograph of root excavation

Two root anchorage indices were calculated to integrate some of the architectural parameters measured:

- Angles between the lateral roots (A_n): the sum of the angles between the lateral roots on the upper side of the slope (180^0) was calculated for each excavated tree (one tree per plot, twelve in total).
- Diameters of the structural roots on the upper side of the slope (d): the diameter of each lateral root was measured at the collar.
- The length of the main lateral roots ⁴(L; cm)
- The maximum rooting depth (P): maximum rooting was measured for each excavated tree.

⁴ The length was considered constant with L: 50 cm. According to field observations, the diameter of the main structural roots decreases rapidly after 50 cm, thus it is chose to consider a maximum length of 50 cm and constant in the calculations. It is considered that the maximum root reinforcement occurs at this level, close to the trunk.

Two indices were calculated according to the formulas given in Figure (5.5):

I_1 normalized by the sum of the diameters of the upslope roots.

I_2 multiplied by maximum rooting depth and divided by soil depth.

$$\text{Stability index 1} (I_1) = \frac{\sum_0^n (x_n d_n)}{\sum_0^n d_n}$$

$$= \frac{\sum_0^n (L d_n \sin A_n)}{\sum_0^n d}$$

$$\text{Stability index 2} (I_2) = \sum_0^n (x_n d_n) \left(\frac{P}{\text{soil depth}} \right)$$

$$= \sum_0^n (L d_n \sin A_n) \left(\frac{P}{\text{soil depth}} \right)$$

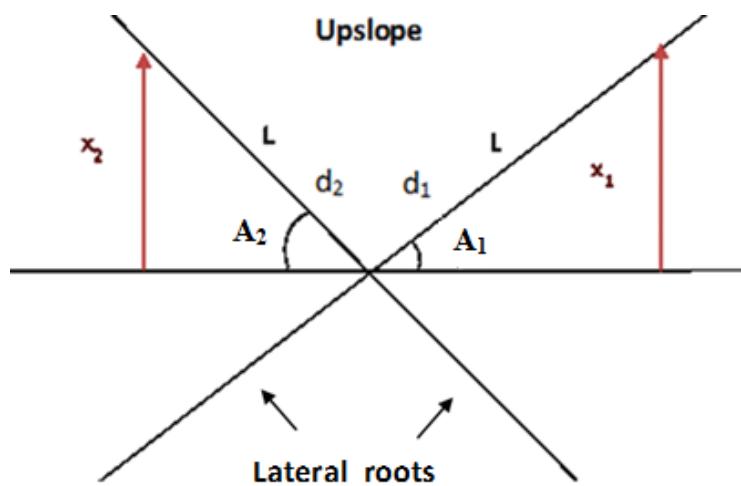


Figure 5.5 Equation used for calculating the root anchorage index. A_n is the angle between the lateral roots of the upper side of the slope and the line separating upper and lower slope; d_n is the diameter of the corresponding structural roots (cm); L_1 is the length of the root; and P is the maximum root depth (cm)

The concept is based on the balance of forces in a 2D plane. The following assumptions were considered:

- Assumption 1: the traction force exerted on the lower trunk is transferred to the upslope roots as a tensile force. If we assume that the force exerted is in the direction of the y-axis, only the y component of the roots will resist the force exerted. We also consider that everything happens in a 2D plane.
- Assumption 2: the downslope roots are in compression and have a negligible impact on the resistance of the roots to the uprooting force exerted by the winch.
- Assumption 3: for the first index (I_1), it is assumed that the influence of the roots is limited to a certain length. It is also assumed that the root diameter has an influence on its ability to resist the tension exerted.

5.3.6 Statistical analysis

Mixed linear models in R (ver.3.1.0) were used (fixed effect: treatment; random effect: block) to check if there were significant differences that occurred among the treatments for the studied parameters: root occurrence, root anchorage index, maximum resisting force, mean root diameter, mean number of roots, mean number of root branches, and aboveground/belowground biomass ratios of trees. An ANOVA with repeated measures was used for tree height, basal diameter, and diameter at breast height. The normality of the response variables and the ANOVA assumptions were verified. Tukey's multiple comparison test was used when an effect was significant. A significance level of 5% was considered for the statistical analyses performed in this study. Correlations between the area under the curve of the uprooting force according to displacement and the stability indices (I_1 and I_2) were tested with Pearson's (for I_1) and Spearman's (for I_2) correlation analyses.

5.4 Results

5.4.1 Lateral uprooting tests

The maximum mean resistance to uprooting (6617 N) was observed for the 2×2 m treatment, and the minimum mean resistance was observed for the 1×1 m treatment, compared to all other treatments ($P < .0001$, $F = 178$; Figure 5.6). Additionally, the evaluation of the mean uprooting force relative to the mean displacement of the trees not only revealed that the maximal uprooting force was greater for the 2×2 m treatment, but also that the trees were uprooted later (after 16 minute of exerting the traction force) and after a greater displacement (45 cm; Figure 5.7). The trees in the high-density plots (1×1 m) were uprooted earlier than other treatments (after 6 mn of exerting the traction force) and after a mean displacement of only 18 cm. As shown in Figure 5.7, the 4×4 m, 2×2 m and $2 \times 2h$ m treatment curves had similar slopes, while the slope for the 1×1 m treatment was steeper; indicating that the resistance of the 1×1 m planted trees to the traction force was greater at the beginning of the test.

The area under the curve was higher for the 2×2 m and 4×4 m treatments than for treatments with higher levels of competition (1×1 and $2 \times 2h$ m; Table 5.1).

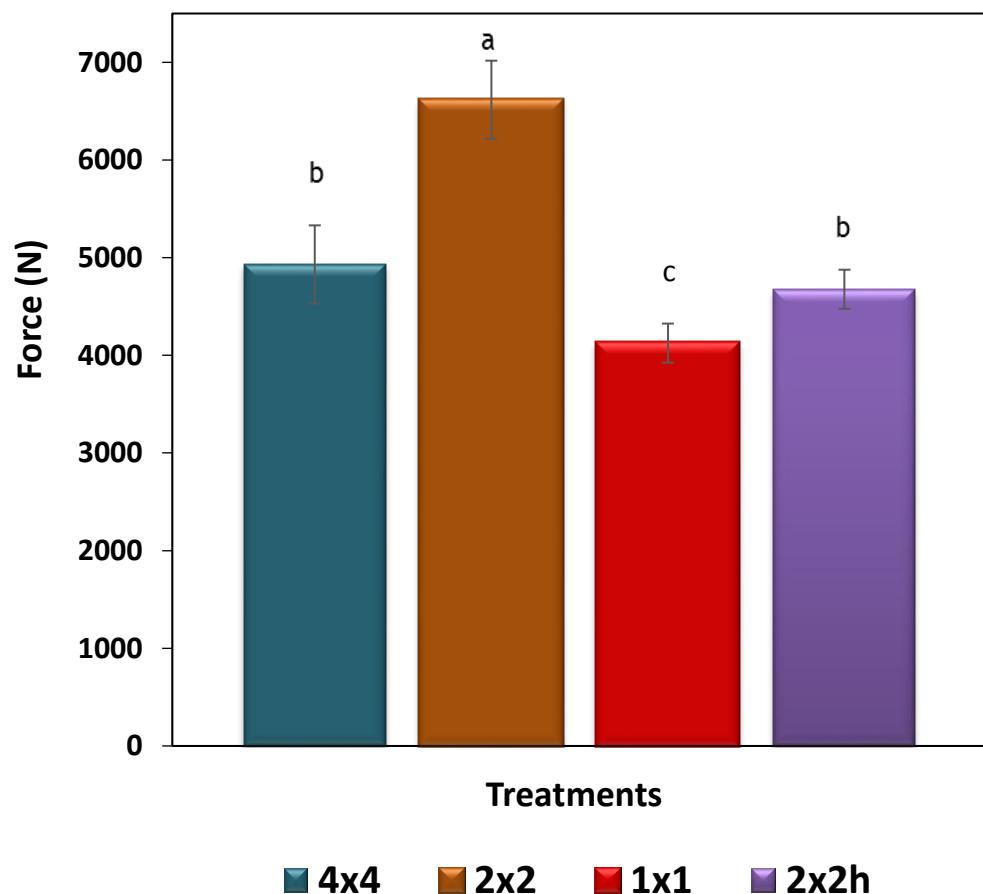


Figure 5.6 Effect of the 4×4 m, 2×2 m, 1×1 m, and $2 \times 2h$ m treatments combined with herbaceous seeding ($2 \times 2hm$) on the maximum resistance to the uprooting force after four growing seasons (2016). Mean \pm SE, N = 3. Mean values that differ significantly ($P < 0.05$) are marked with different letters a>b

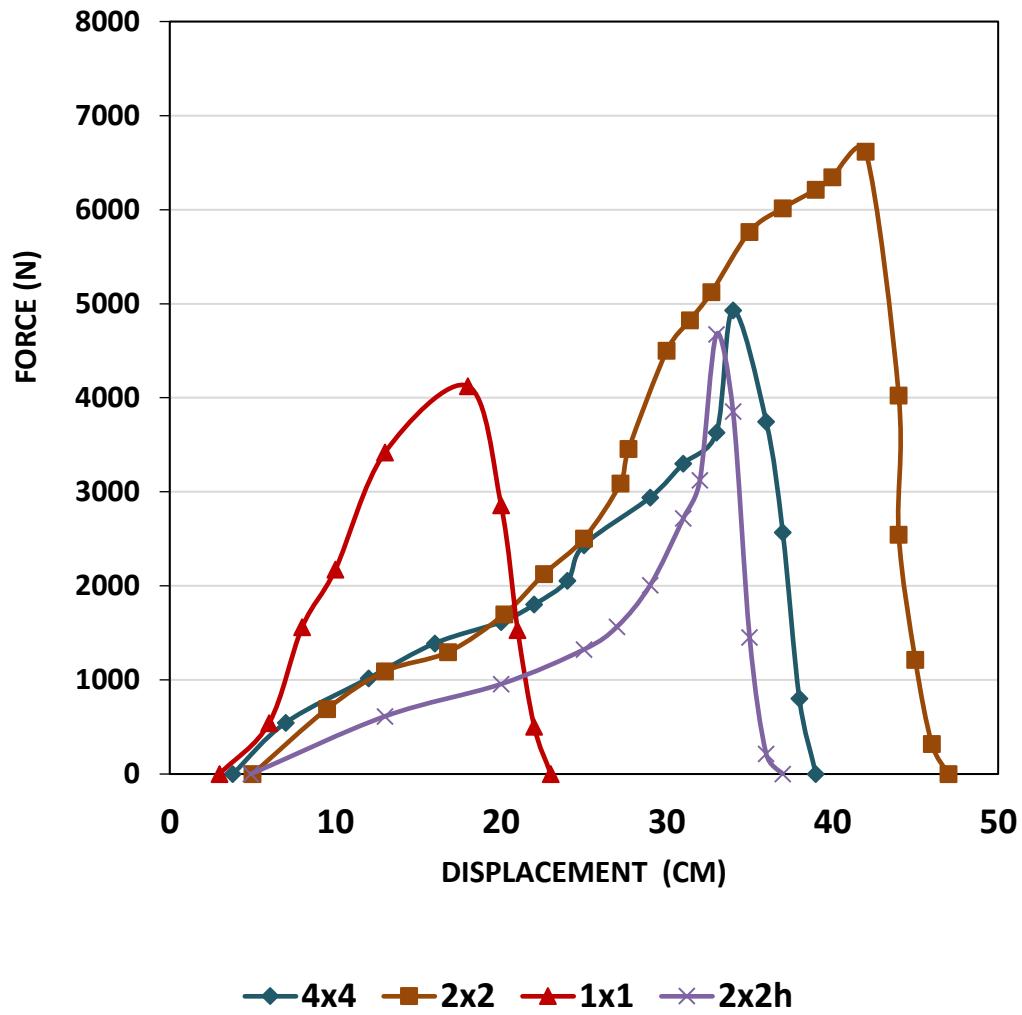


Figure 5.7 Effect of the 4×4 m, 2×2 m, 1×1 m, and $2 \times 2h$ m treatments combined with herbaceous seeding ($2 \times 2h$ m) on the uprooting force according to displacement after four growing seasons (2016). Mean \pm SE, N = 3

Tableau 5.1 Area under curve according to treatments (4×4 , 2×2 , 1×1 , and 2×2 m spacings combined with herbaceous seeding, 2×2 h m). Mean \pm SE, N =3. Mean values that differed significantly at P <0.05 are marked with different letters, a> b

Treatments (m)	Area under curve (J)
4×4	1094 ± 105 (a)
2×2	1158 ± 83 (a)
1×1	489 ± 65 (c)
2×2 h	726 ± 72 (b)

5.4.2 Hybrid poplars biomass

After four growing seasons, the 2×2 h m trees had the smallest mean height (247 cm) (P <.0001, F=186). The mean basal diameter (P=0.0002, F=132) and the diameter at breast height (P <.0001, F=76) were significantly larger for the plots in the 2×2 m and 4×4 m spacings compared to the 1×1 m and the 2×2 h m spacings (Table 5.2). Specifically, the basal diameter was 46 mm for the 2×2 m spacing and 47 mm for the 4×4 m spacing, vs 29 mm and 32 mm for the 1×1 m and 2×2 h m spacings, respectively. Diameters at breast height were 25 mm, 23 mm, 16 mm, and 18 mm for the 2×2 m, 4×4 m, 1×1 m and 2×2 h m plots, respectively.

Poplars responded to increased competition levels by decreasing their investment in aboveground growth. Aboveground biomass growth was lower in the 1×1 m

spacing and the 2×2h m spacing compared to the two other treatments ($P = 0.005$). Greater intra-specific competition levels decreased root biomass, but root biomass was not affected by herbaceous competition; there was no significant difference between the 2 × 2 m and 2×2h m treatments. The 1 × 1 m treatment and the 2×2h m treatments were characterized by lower aboveground/belowground biomass ratios ($P < .0001$; Table 5.2) than the 2 × 2 m and 4×4 m treatments.

Tableau 5.2 Effect of the 4×4 m, 2 × 2 m, 1 × 1 m, and 2 × 2 m spacings combined with herbaceous seeding, 2×2h m) on poplar biomass, diameter and maximum height after four growing seasons (2016). Mean±SE, N =3. Mean values that differed significantly at $P < 0.05$ are marked with different letters, a>b

	4 × 4 m	2 × 2 m	1 × 1 m	2×2h
Maximum height (cm)	326 ± 49(a)	351 ± 65 (a)	360 ± 92 (a)	247 ± 63 (b)
Basal diameter (mm)	47 ± 16 (a)	46 ± 20 (a)	29 ± 11 (b)	32 ± 9 (b)
Diameter at breast height (mm)	23 ± 8 (a)	25 ± 10 (a)	16 ± 9 (b)	18 ± 5 (b)
Aboveground biomass (g)	1440 ± 325 (a)	1733 ± 298 (a)	537 ± 175 (b)	884 ± 106 (b)
Root biomass (g)	498 ± 102 (a)	505 ± 97 (a)	320 ± 37(b)	429 ± 61 (a)
Aboveground/belowgroun d biomass	2.9± 0.67(a)	3.43 ± 0.72 (a)	1.68 ± 0.23(b)	2.06 ± 0.15 (b)
Aboveground/total biomass	0.74 ± 0.14 (a)	0.77 ± 0.08 (a)	0.63 ± 0.34 (a)	0.67 ± 0.28 (a)
Belowground/total biomass	0.26 ± 0.02 (a)	0.23 ± 0.09(a)	0.37 ± 0.20 (a)	0.33 ± 0.25 (a)

5.4.3 Root architecture

5.4.3.1 Root profiles

The maximum mean rooting depth observed in this study was observed in the 2×2 m spacing at approximately 89 cm. In comparison with the plots exposed to greater competition levels (1×1 and 2×2 m spacings), trees in the 2×2 m and 4×4 m treatments had root systems that were nearly two times deeper than the 1×1 m plots ($P=0.004$, $F=351$).

Root distribution along the substrate profile showed root systems differing by treatment in terms of total root number ($P = 0.012$), density ($P = 0.008$), and occurrence (percentage of root presence relative to total surface grid; $P < 0.0001$). All these root variables were greater for the 4×4 m and 2×2 m treatments compared to the other treatments (Figure 5.8 a, b). We observed the absence of roots after 40 cm depth in the 1×1 m and 2×2 m plots (Figure 5.8 a, b). The number of roots in each 5-cm soil layer decreased rapidly after reaching a depth of 40 cm. The highest root density was observed in the upper soil layers, since over 85% of all roots were located between 0 and 30 cm. Root density and root occurrence decreased for all treatments as depth increased; interactions between the different treatments and depth were not statistically significant.

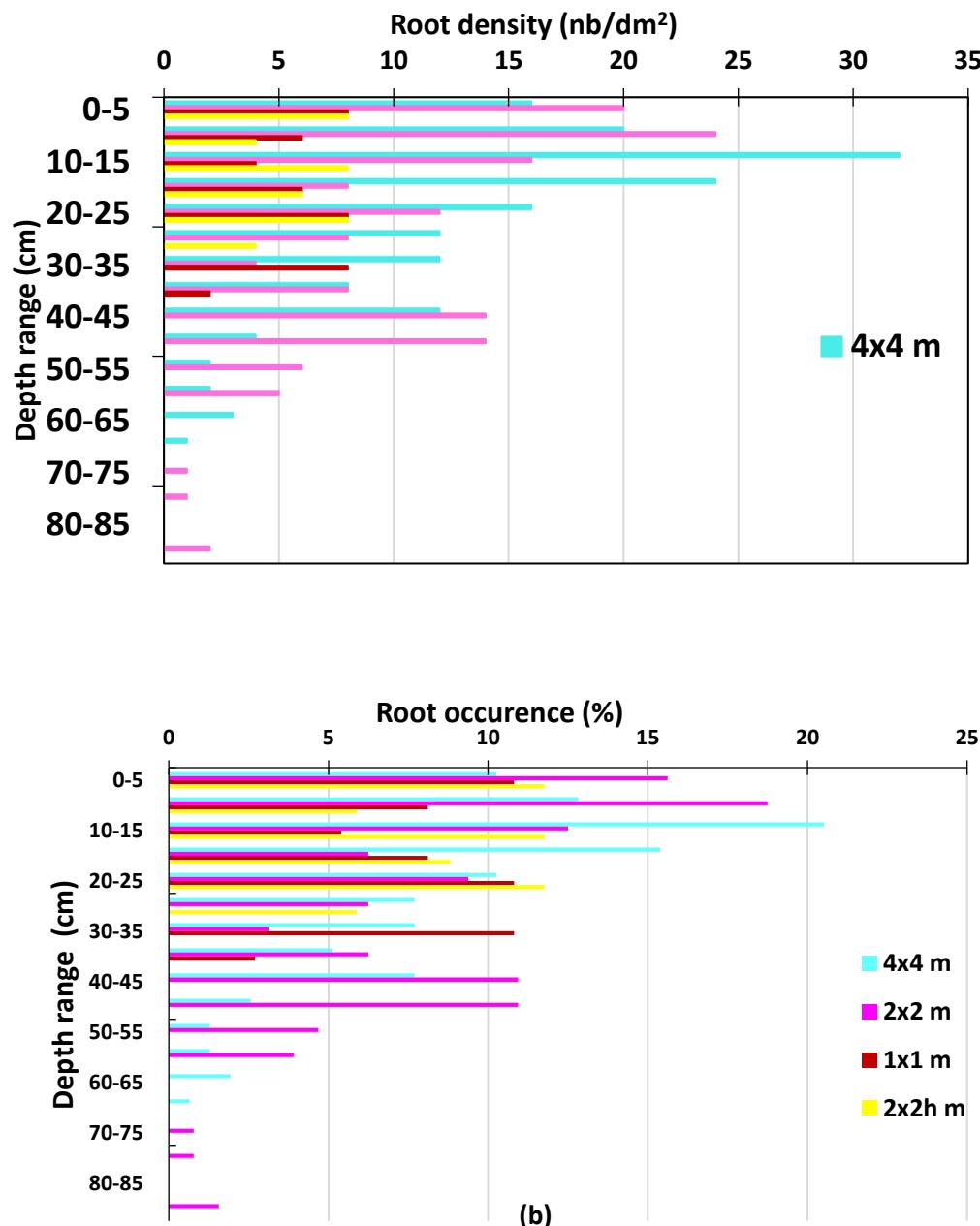


Figure 5.8 Poplar root (a) density (roots/dm²), (b) occurrence (%.) along a 5-cm layer in a 1 × 1 m observation trench for all tested treatments (4×4 m , 2 × 2 m, 1 × 1 m, and 2 × 2 m spacing combined with herbaceous seeding (*2 × 2hm) after four growing seasons (2016). N = 3. Mean values that differ significantly at P <0.05 are marked with different letters a>b

5.4.3.2 Coarse root architecture

In this study, roots with diameters ≥ 4 mm were selected to represent coarse, structural roots (Danjon and Reubens, 2008). Analysis of coarse root morphology and architecture revealed a more symmetrical root system for the 2×2 m and 4×4 m treatments, with roots regularly distributed around the stems. In addition, the hybrid poplars of these two treatments had a higher number of coarse, structural roots, more ramified (in depth), and a greater number of root tips, compared to the other treatments (Figure 5.9). Furthermore, by examining the angles between the structural roots, there were fewer angles that were $\geq 60^\circ$ in the 2×2 m and 4×4 m treatments than in the treatments with higher levels of competition (1×1 m and $2 \times 2h$ m).

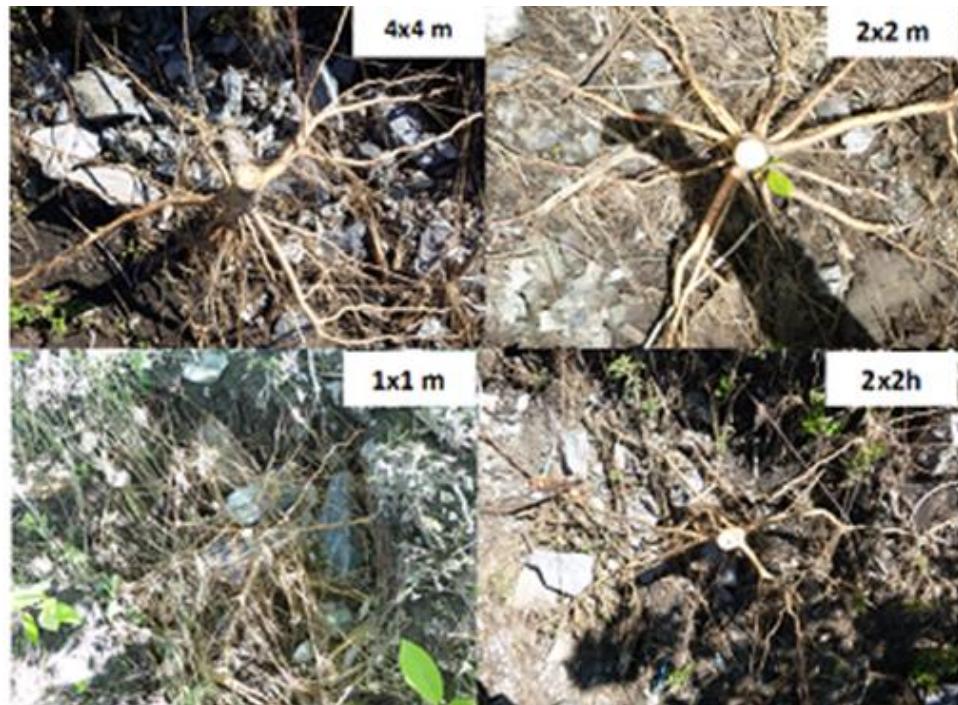


Figure 5.9 Pictures showing typical root systems of a tree in each of the four treatments (4×4 m and 2×2 m, 1×1 m and 2×2 m combined with herbaceous seeding. $2 \times 2h$)

Overall, the main quantitative variables describing the root system structure were reduced by increased competition levels (Table 5.3), especially for the 1×1 m treatment. Mean diameters of structural roots were significantly greater in the 2×2 m (23 mm) and 4×4 m (24 mm) treatments than in the 1×1 m (11 mm) and $2 \times 2h$ m (14 mm) treatments ($P=0.0021$, $F=53$). Mean root number per tree was lower for the 1×1 m treatment (3 roots) ($P= <.0001$, $F=254$) compared to the less dense treatments (2×2 m = 6; 4×4 m = 5), but mean root number did not differ with the presence of herbaceous seeding ($2 \times 2h$ m = 6 roots). The number of ramifications gradually decreased with increasing depth for all root systems. The mean number of ramifications was lower for the 1×1 m spacing compared to the other treatments ($P = <.0001$, $F = 94$). The total number of root tips was higher for the 2×2 m (17 root tips) and 4×4 m (13 root tips) treatments compared to the other two treatments (1×1 m = 3; $2 \times 2h$ m = 4 root tips) ($P <0.0001$, $F=182$).

Tableau 5.3 Effect of the treatments (4×4 m, 2×2 m, 1×1 m, and 2×2 m combined with herbaceous seeding ($2 \times 2h$ m) on architectural root (diameter > 4 mm) variables after four growing seasons (2016). N = 3. Mean values that differ significantly at 0.05 are marked with different latters a>b

	4×4 m	2×2 m	1×1 m	$2 \times 2h$ m
Roots number (lateral roots)	5 ± 2 (a)	6 ± 3 (a)	3 ± 1 (b)	6 ± 1 (a)
Mean root diameter (mm)	24 ± 5 (a)	23 ± 6 (a)	11 ± 3 (b)	14 ± 2 (b)
Maximum root depth (cm)	77 ± 10 (a)	73 ± 16 (a)	36 ± 5 (b)	45 ± 4 (b)
Number of sink roots (in depth)	14 ± 2 (a)	12 ± 3 (a)	9 ± 1 (b)	12 ± 4 (a)
Total Number of root tips	13 ± 3 (a)	17 ± 4 (a)	3 ± 2 (b)	4 ± 3 (b)

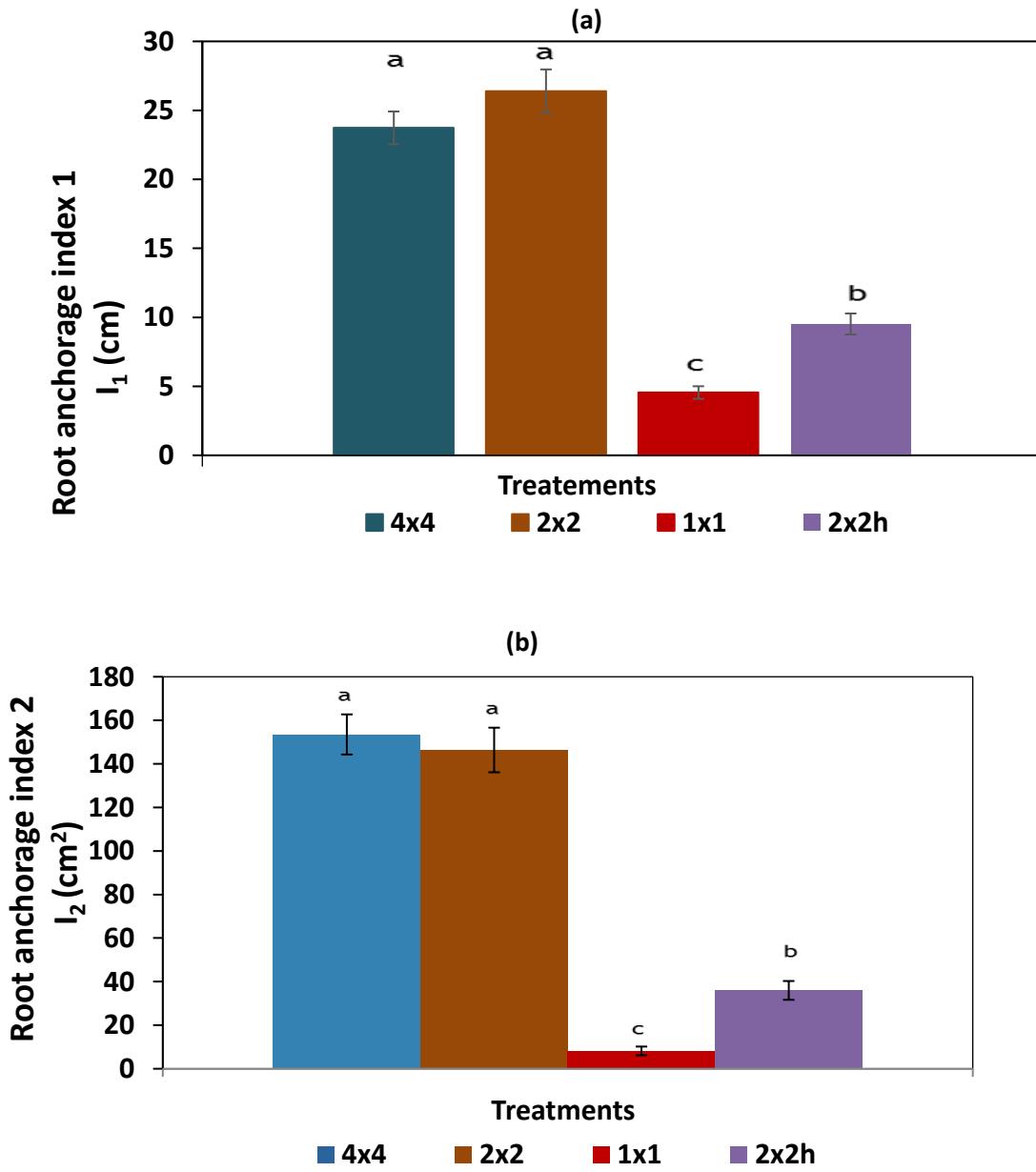


Figure 5.10 Root anchorage indexes I_1 (a) and I_2 (b) among the four tested treatments (4×4 m, 2×2 m, 1×1 m, and 2×2 m combined with herbaceous seeding: $2 \times 2\text{hm}$). Mean (SE), N=3. Mean values that differ significantly at 0.05 are marked with different letters a>b

The two root anchorage indexes were significantly higher for treatments where the level of competition was lower (2×2 m and 4×4 m treatments) (Figure 5.10; I_1 : $P = <.0001$, $F=89$; I_2 : $P = <.0001$, $F=125$).

The Pearson correlation between root anchorage index 1 (I_1) and the area under the curve is 0.98 ($P = <.0001$), which indicates a very strong positive, linear relationship between variables (Figure 5-11 a). The Spearman correlation coefficient between index (I_2) and the area under the curve is about 0.97 ($P = <.0001$). Therefore, there is a strong positive relationship (I_1 : linear, I_2 : exponential) between the variables (Figure 5.11 b). As the area under the curve of the uprooting force versus displacement increases, the two root anchorage indexes I_1 and I_2 also increase.

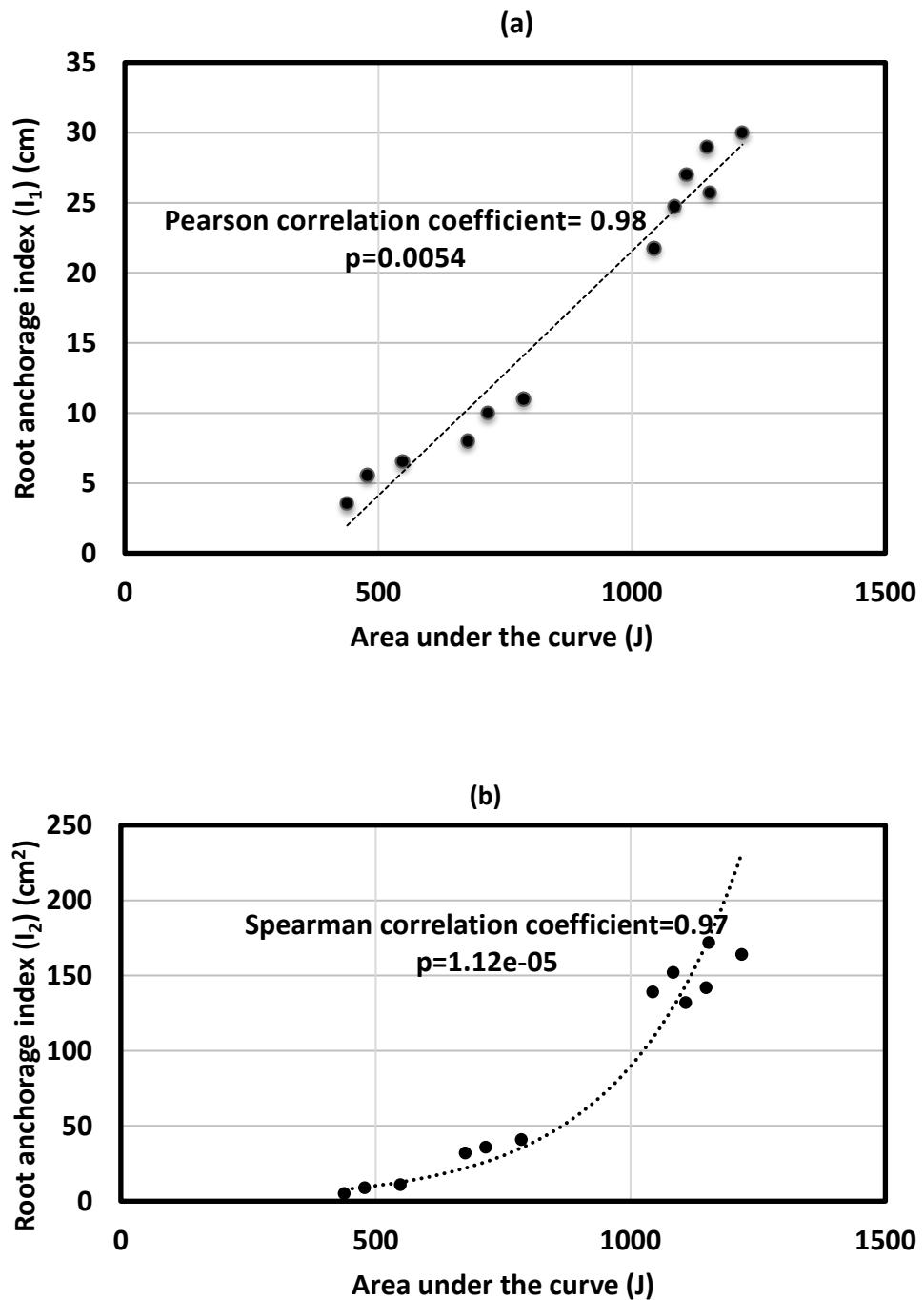


Figure 5.11 Variation of root anchorage indexes I1 (a) and I2 (b) in the area under the curve. N = 12

5.5 Discussion

5.5.1 Mechanical resistance of hybrid poplars

This study provides new knowledge and a better understanding on the effect of competition on root architecture and the root anchorage of hybrid poplars. In line with our first hypothesis, the results of the present study showed that the minimum resistance to the uprooting force was observed for the 1×1 m treatment. The results also indicate that trees in the 1×1 m spacing plots showed greater resistance at the start of the uprooting tests compared to the other treatments, however, this resistance decreased rapidly. The entanglement of roots with those of neighboring trees, which was observed in the field during excavation in the highest density planting (1×1 m), could explain this behavior. The significant difference between the 2×2 m and 4×4 m treatments can be explained by the development of a weed cover in the 4×4 m plots, where the canopy closed later than the plots in the 2×2 spacing. The development of the weed cover by natural colonization depends on the spacing between trees (Remaury et al. 2019). In this study, the maximum rooting depth observed was about 89 cm; this occurred in the 2×2 m spacing plot. It was about two times greater for the 2×2 m plot (89 cm) and 4×4 m plot (70 cm) than for the plots exposed to more severe competition levels. The greatest depth of rooting is generally concentrated around the tree to provide it with the necessary anchorage and support (Sudmeyer et al. 2004).

After the third growing season, about 85% of root numbers were located in the first 30 cm of soil. Similar results were obtained in other studies. For example, in their study of hybrid poplars, Crow and Houston (2004) reported that the 0-36 cm stratum contained, on average, 81% of the total number of roots. In a study evaluating the root distribution of 12-year-old hybrid poplars, 95% of the total number of roots

were noted in the first 40 cm (Gray, 2000). These higher root densities at the soil's surface could be explained by a variety of factors, including higher organic matter content, better aeration, and easier access to water resources (Douglas et al. 2010; McIvor et al. 2009; Crow and Houston 2004).

5.5.2 Roots architecture

Tensile forces mobilized in the roots are highly dependent on the morphology and architecture of root systems (Dupuy et al. 2005). Accordingly, inter- and intra-specific competition decreased the required force to uproot trees, as well as the main quantitative variables describing a root system, supporting our second hypothesis. The root system is a zone of competition for soil resources. The availability of nutrients and water plays a major role in the evolution and the development of root systems (Igram and Malamy 2010). Intensified competition associated with smaller tree spacing and denser herbaceous seeding increased the trees' demand for limited resources, which can subsequently affect the mechanical resistance of a root system. More ramified root systems, higher mean root diameters, and higher total root numbers characterized the plots in the 2×2 m and 4×4 m treatments. The number of roots had a major impact on tree stability as the presence of additional roots increases the anchorage strength of plants (Stokes et al. 2007). In addition, branching density is beneficial because it promotes a better distribution of stresses in the soil (Dupuy 2003), which results in increasing the anchorage force. The root systems of treatments with higher levels of competition (1×1 m and 2×2 m spacings) contained more angles $\geq 60^\circ$ between the structural roots. The stability of a tree depends not only on the number of coarse roots around the trunk, but also on the angles between them. Large angles ($\geq 60^\circ$) will reduce the distance of the lever on

which the tree can pivot and, thus, the tree will be more susceptible to uprooting (Bell et al. 1991).

The 2×2 m and 4×4 m treatments had more symmetrical root systems. Coarse roots symmetry can greatly influence the root anchorage of trees (Danjon et al. 2005). Therefore, when main roots are absent or poorly developed on one side, the system's stability will be reduced (Coutts et al. 1999; Coutts 1983). If the 360° distribution of roots and their vertical distribution is not homogeneous, the anchoring of a tree would be locally reduced. Therefore, during a mechanical stress test, tension will not be applied homogeneously and the risk of causing a root breakage increases (Danjon and Reubens 2008). The root system is generally asymmetric top and bottom of the slope. After 4 growing seasons, a mixed root system with several stages was observed in the planted hybrid poplars obtained from long cuttings (i.e. whips). This structure has been observed by other authors (Dehoche 1997; Dickmann et al. 2001; Dupuy 2003) in natural populations of poplars that may rather come from seedlings. Dupuy (2003) observed a herringbone structure in 7-year-old poplars in forest plots in France. This architecture could be modified over time. Indeed, with the growth and development of hybrid poplar, the size of the pivot will become smaller and the root system will tend to adopt a tracing architecture with well extended lateral roots. The establishment of the architecture of root systems over time is first determined genetically (Kano-Nakata et al. 2019; Ingram and Malam 2010). The architecture of the root system is formed along a continuum, where root types will be set up according to a specific topology. This architecture can be modified in response to abiotic variations that cause the plant to acclimate in response to environmental conditions. The root system has significant plasticity allowing it to react strongly to environmental constraints. The development of new lateral roots, its speed and direction, is guided by the environmental information (like nutrient concentrations, natural obstacle, water conditions) (Smith and De Smet, 2012; Collet et al. 2006;

Malamy 2005) and competition from other plants. During its development, a tree changes root system dimensions that becomes more complex. The number of tree roots increases over time, reflecting the increasing size of trees in the establishment phase (Campbell et al. 1994).

The results obtained for the calculated root anchorage indexes reflected the combined effects of the maximum resistance to the uprooting force of trees and the root architecture. The two root anchorage indexes are strongly correlated to the area under the curve of tensile force vs displacement of the different treatments. This area is equivalent to an energy (Joule if displacement is expressed in m) and increases with the effort needed to complete an uprooting test. Only roots in the opposite direction of winching were considered, because these roots were in tension during uprooting tests and exerted a resistance to displacement. The calculated root anchorage indexes integrated major traits describing the root architecture and morphology. Therefore, these indices could be used and/or adapted in the future to evaluate the stability of trees. Both I_1 and I_2 gave similar results in terms of comparing the four treatments. The first index (I_1) requires less measured parameters since it integrates the distribution of the roots in a plan view, whereas the second index (I_2) integrates also the vertical distribution.

At the tree root level, the effect of intra-specific competition was greater than competition from herbaceous plants. Thus, the effect of planting density on root biomass was more important than herbaceous competition. In addition, herbaceous competition had a limiting effect on the number of coarse lateral roots and number of sink roots. The number of roots may have positively influenced tree stability since a greater number of roots was found in the two treatments with the greater resistance to uprooting. However, under other environmental conditions (temperature, CO₂ concentration, rain, and soil texture and structure), the presence of herbaceous

species could have a higher influence and more negatively affect the stability of the trees.

5.5.3 Growth and biomass

In this study, poplars responded to increased competition levels (both inter- and intra-specific) by decreasing their investment in aboveground growth, which is in agreement with our third hypothesis. Aboveground biomass growth was lower in the 1×1 m spacing and the $2 \times 2h$ m spacing compared to the other two treatments. Similarly, other studies reported that greater intra-specific competition levels in a hybrid poplar plantation decreased the aboveground biomass (Benomar et al. 2012). On one hand, herbaceous competition for water and nutrient resources resulted in a reduction of the diameter and height of trees. Other authors also observed the negative effect of the presence of herbaceous plants on the aboveground development of trees (Bockstette et al. 2017; Henkel-Johnson et al. 2014; Henkel-Johnson et al. 2016; Goehring, 2015; Pinno and Bélanger 2009; Powell and Bork 2004). On the other hand, increased intra-specific competition in the 1×1 m plots triggered a decrease in the diameter of the trees. This competition did not affect tree height, which was variably affected by planting density. Prior studies have demonstrated that tree height can increase, decrease, or remain unchanged depending on planting density (Toillon et al. 2013; Pinkard and Neilsen 2003; Woodruff et al. 2002; DeBell et al. 1996).

Treatments with higher levels of competition (1×1 m and $2 \times 2h$ m) were characterized by lower aboveground/belowground biomasses ratios. The distribution of biomass between the aboveground and belowground parts of trees plays an important role in their root anchorage. However, for a given biomass ratio, anchoring varies greatly depending on the architecture of the roots. The stability of a tree would be affected when the applied bending moment surpasses its maximum resistance

(Scott and Mitchell 2005). In this study, the cable used for lateral uprooting tests was attached to the base of the tree. Therefore, this moment corresponds to the maximum resistance of the tree root system to overturning. However, wind can affect the structure and functioning of trees (Zeng 2006; Gardiner et al. 2005; Hale et al. 2004; Nicoll et al. 1995). Wind exerts forces on the plant in the aboveground part and tree size influences the force imposed on a tree. The trees in the high-density plots (1×1 m) had the smallest aerial parts, but also were uprooted earlier than in other treatments. In fact, the resistance of a tree to wind damage is controlled by environmental conditions, root systems, and tree stand heights and diameters (Scott and Mitchell 2005; Hale et al. 2004; Coutts 1986). Previous studies have highlighted the role of stand density on wind resistance (Dupont et Patton 2012). Thus, a high density of trees results in a reduction and dissipation of the force transmitted by the wind (Moore and Maguire 2004), and may qualify the susceptibility of trees planted at 1×1 m to uprooting due to wind.

5.6 Conclusions

This study is one of the first to integrate root system traits and root anchorage, while evaluating and comparing the effects of intra- and inter-specific competition. Data from this study in the specific context of mine waste rock slopes show that intra-specific competition and competition of hybrid poplars with herbaceous plants have negative effects on root architecture traits that are related to the anchorage of the trees. The effect of intra-specific competition was higher than that of herbaceous competition since the root biomass and number of coarse lateral roots decreased in the 1×1 m plots and the resistance of the trees to uprooting was lower. In consequence, enough tree spacing is important to consider to decrease uprooting risk in plantations on waste rock slopes. The 2×2 m and 4×4 m spacings showed root structures that allowed for increased resistance to tensile shear forces applied to the tree. Thus, a minimal spacing of 2m between trees can be recommended to

revegetate the studied mine waste rock slopes. The two root anchorage indexes that were based on coarse root morphological and architectural traits were good predictors of the results of the uprooting tests. The results of this study may differ depending on the type of soil, slope, plant species, and/or the age of the trees.

5.7 Acknowledgements

We thank the research technician and undergraduate students who helped in the fieldwork. This study was funded by the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC) and the Canadian Malartic Partnership.

CHAPITRE 6

ARTICLE 3

Effect of soil quality and planting material on root architecture and the root anchorage of hybrid poplar plantations on waste rock slopes

Khadija Babi^{1,*}, Marie Guittonny¹, Bruno Bussière¹, Guy R. Larocque²

¹Research Institute on Mines and the Environment, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, 445, boul. de l'Université, Rouyn-Noranda, QC J9X 5E4, Canada

² Natural Resources Canada, Canadian Forest Service, Laurentian Forestry Centre, 1055 du P.E.P.S., P.O. Box 10380, Stn. Sainte-Foy, Quebec G1V 4C7.

*Khadija.babi@uqat.ca

6.1 Abstract

Tree planting can facilitate the rehabilitation of forested landscapes on mine waste rocks. However, because of their physical and chemical nature, waste rocks are difficult to revegetate and can restrict tree root growth. On waste rock slopes, trees with inadequate root development could be prone to uprooting. The anchorage of

trees is mainly determined by the architecture of the root systems that drive their mechanical interactions with the soil. The success of tree planting can be improved if performed after spreading soil over waste rock slopes. However, there is limited knowledge on the influence of soil quality on tree root development and stability. The objective of this study was to evaluate the effects of soil quality (50 cm of topsoil versus 40 cm of mineral soil + 10 cm of topsoil) and of different planting materials (whips, cuttings, and bareroots) on the architecture and resistance to shear stress of root systems of hybrid poplars four years after they were initially planted. The study was conducted in an open-pit-gold mine located in the boreal forest of Malartic, Quebec, Canada. A hybrid poplar plantation was established in 2013 on 33% soil-covered waste rock slopes, using a randomized complete block design; i.e. 3 replicated blocks × 3 planting materials × 2 soil qualities. During the fourth growing season, the stability of the hybrid poplars (resistance to uprooting) was evaluated using lateral traction tests. Complete excavations were performed to characterize their coarse root (> 4 mm) architecture. Results showed no significant differences between treatments in terms of the maximum resistance force to uprooting, which varied between 7142 and 8989 N. After four growing seasons, no significant effects due to soil quality or planting material were observed in the number of lateral roots, mean root diameter, root biomass, aboveground biomass, and shoot/root ratio. The maximum height and basal diameter also did not differ among treatments. These findings indicate that the coarse root architecture of the planted trees and their associated root anchorage were not affected, in the short-term, by soil quality or planting material.

Keywords: mine site revegetation, tree planting, coarse root development, uprooting tests, topsoil, overburden.

Résumé

Des plantations d'arbres peuvent faciliter le rétablissement du paysage forestier sur les stériles miniers. Cependant, en raison de leur nature physique et chimique, les roches stériles sont difficiles à revégétaliser et peuvent limiter la croissance des racines des arbres. Sur les pentes de stériles exposées aux vents, les arbres dont le développement racinaire est inadéquat pourraient être déracinés. L'ancrage des arbres est principalement déterminé par l'architecture des systèmes racinaires qui assurent leurs interactions mécaniques avec le sol. Le succès d'une plantation d'arbres peut être amélioré avec l'utilisation du sol sur les pentes de stériles. Cependant, les connaissances sur l'influence de la qualité du sol sur le développement et la stabilité des racines des arbres sont limitées. L'objectif de cette étude était d'évaluer les effets de la qualité du sol (50 cm de sol superficiel versus 40 cm de sol minéral + 10 cm de sol superficiel) et de différents matériaux de plantation (plançons, boutures et racines nues) sur l'architecture racinaire et la résistance mécanique au déracinement des peupliers hybrides quatre ans après leur plantation initiale. L'étude a été menée dans une mine d'or à ciel ouvert située dans la forêt boréale de Malartic, Québec, Canada. Une plantation de peupliers hybrides a été établie en 2013 sur 33 % de pentes de stériles recouvertes de sol, en utilisant un dispositif en blocs aléatoires complets; soit 3 blocs répliqués \times 3 matériaux de plantation \times 2 qualités du sol. Au cours de la quatrième saison de croissance, la stabilité des peupliers hybrides (résistance au déracinement) a été évaluée à l'aide de tests d'arrachement latéraux. Des excavations complètes ont été réalisées pour caractériser l'architecture de racines grossières (> 4 mm). Les résultats n'ont montré aucune différence significative entre les traitements en termes de force de résistance maximale à l'arrachement, qui variait entre 7142 et 8989 N. Après quatre saisons de croissance, aucun effet significatif lié à la qualité du sol ou au matériel de plantation n'a été observé sur le nombre de racines latérales, diamètre moyen des racines, biomasse racinaire, biomasse aérienne et rapport aérien / racines. La hauteur

maximale et le diamètre de base ne différaient pas non plus selon les traitements. Ces résultats indiquent que l'architecture des racines grossières des arbres plantés et leurs stabilités mécaniques associées n'ont pas été affectées, à court terme, par la qualité du sol ou le matériel de plantation.

Mots clés : revégétalisation des sites miniers, plantation d'arbres, développement des racines grossières, tests d'arrachement, sol superficiel, mort-terrain.

6.2 Introduction

In forested areas, the revegetation of mine sites after closure often involves planting trees on waste storage facilities that need to remain geotechnically stable over long periods. The resistance of trees to uprooting is, therefore, important to ensuring the stability of these waste facilities, which are often exposed to strong winds, particularly on slopes. Metal mining generates large volumes of solid wastes, and in particular, waste rocks, which consist of the uneconomic material that is extracted to reach the ore body. Waste rocks are usually stored at the surface in the form of piles of several tens of meters high called waste rock piles (Aubertin *et al.*, 2002). Typically, these structures are difficult to revegetate due to their physical and chemical characteristics (Mench *et al.*, 2003); specifically, waste rock piles lack the proper physical structures, nutrients, organic matter (OM), and microorganisms to support plant growth (Burger and Zipper, 2002; Tordoff *et al.* 2000). The geometry of sites can also be a challenge for establishment of vegetation, especially where there are higher angle slopes and overall elevations.

To facilitate their revegetation, waste rock piles are usually covered with soil layers. Soil quality (in particular organic matter concentration) is an important determinant of tree growth (Zipper *et al.*, 2011), and especially root growth. Therefore, when available, topsoil (i.e. A horizon) is used to improve soil productivity and biological functionality (Tordoff *et al.*, 2000). However, the quantity of topsoil available at mine sites can be limited. In these cases topsoil may be replaced by or combined with mineral soils, which are low in OM content and have poorer fertility, but are available in greater quantities.

Hybrid poplar plantations on soil-covered waste rock slopes have previously shown good survival and growth rates (Babi *et al.*, 2019; Remaury *et al.* 2019; Larchevêque *et al.* 2014; Casselman *et al.*, 2006; McGill *et al.*, 2004; Clark Ashby, 1995). However, hybrid poplars are sensitive to changes in environmental conditions and

known to respond to variations in the availability of nutrients and water in the soil depending on the plantation design (Babi et al., 2019; Zandalinas *et al.*, 2018; Dickmann, 2001). Thus, these fast-growing trees can be used as model plants to study the establishment of trees on mine tailings, including the effect of factors related to the design of plantations on the root development of trees and their stability.

Root systems provide both physiological and mechanical functions for plants. The absorption of water and nutrients is primarily performed by fine roots ($d < 2$ mm), whereas coarse roots ($d > 2$ mm) provide anchorage for the tree (Gyssels et al. 2005; James et al., 2006; Stokes *et al.*, 2005). Coarse root architecture is essentially represented by the spatial configuration of the roots (Gregory, 2006) and plays a major role in the root anchorage of the tree, wherein stability is defined as the capacity of a tree's root system to resist uprooting (Khuder *et al.* 2007; Stokes et al. 2007). The resistance force of a tree varies with its root architecture (Bell *et al.*, 1991). Moreover, the angles between roots, the number of roots, root diameters, root system symmetry, and root depths are all known to have significant impacts on anchorage and tree stability (Garrett et al, 2009; Gregory 2006; Nicoll et al., 2006; Godin 2000; Godin et al. 1999; Ruel, 1995; Fitter 1991; Harper et al. 1991). Despite the importance of these parameters, relatively few belowground investigations have been conducted to evaluate the influence of planting design on root development, especially in the context of revegetation of waste rock slopes.

Although root system architectures are usually genetically predetermined (Kano-Nakata et al., 2019; Das and Chaturvedi, 2008), environmental factors, including soil texture (Drénou, 2006) and structure, can also affect root distribution (Lebourgeois and Jabiol, 2002; Coutts et al. 1999. For example, Moore (2000) showed that the mechanical resistance of pine depended on soil quality, with, trees growing on clay soils showing greater maximum resistances to bending moments than those

growing in non-cohesive soils. Root growth has been shown to increase with the presence of pores, thus allowing for balanced water storage and air transmission in the soil (Dexter, 2004; Oades, 1984), and root distribution was shown to depend on the content of OM and nutrients in the soil (Sainju and Good, 1993). Roots develop more (number, length, and diameter) in environments where water and nutrients are abundant (Hutchings and John, 2003). Organic matter influences soil structure by increasing total porosity (Tejada and Gonzalez, 2003; Marinari *et al.*, 2000), which can result in an increased water retention capacity (Celik *et al.*, 2004; Khaleel *et al.*, 1981). Root density is generally positively related to OM content (Strong and La Roi, 1985), therefore, trees may be more stable in soils richer in OM where root development would otherwise not be optimal. In fine-textured soils, root systems are generally denser and comprised of smaller roots because are more able to penetrate into cracks (Nagarajah, 1987; Lévy, 1968). In coarse-textured soils roots are usually longer and more numerous (Nagarajah, 1987; Lévy, 1968). The depth and colonization intensity of the rooting zone also depends on the physical constraints of the soil (Curt *et al.*, 2001), which restrict root elongation and can modify the root architecture of the plant (Ludovici, 2004) as well as its stability.

Planting material choice is an integral part of plantation establishment (Davis *et al.*, 2010; Burdett, 1990). The type of planting material can affect aboveground tree growth, physiology, and survival (Desrochers and Tremblay, 2009; Jutras *et al.* 2007; Mohammed *et al.* 2001), and thus the overall success of plantations (e.g. Johansson *et al.*, 2007). Nonetheless, the influence of planting material on root development and tree anchorage still requires further research. In Québec, Canada, planting materials of large sizes are generally used to produce hybrid poplars and to overcome weed competition for light (Réseau Ligniculture Québec, 2011). Materials such as bareroot seedlings, cuttings, and whips can be considered as viable options. Each type of material has advantages and disadvantages (Balleux and Van Lerberghe, 2001) according to differences in size as well as imbalances in the

shoot/root ratio, which influences the water budget and, therefore, the aboveground as well as belowground growth and survival of trees (Grossnickle, 2005). A large aboveground biomass with a reduced root system can lead to the depletion of a plant's water resources (Grossnickle, 2005; DesRochers et al., 2004). Moreover, waste rock slopes are generally prone to fast drainage, which can amplify the exposure of trees to water stress (Babi et al., 2019). Bareroot seedlings provide large leaf areas, where transpiration and water losses occur, while whips and cuttings must rebuild their root system, which allows for water absorption. DesRochers and Tremblay (2009) compared the growth of four types of hybrid poplar planting material in the clay soils of Abitibi-Témiscamingue. Cuttings were able to survive and develop a root system capable of providing a water supply comparable to other types of planting materials, while the costs of producing them are lower than bareroot seedlings. However, other authors found that hybrid poplar rooted cuttings can outperform unrooted cuttings of the same genotype in terms of survival and growth (Riemenschneider, 1997). In addition, Block et al. (2009) reported a survival rate 51% greater for rooted cuttings compared to unrooted cuttings of hybrid poplars.

The main objective of the present study was to check whether topsoil could be saved by combining it with mineral soil, while allowing an adequate rooting and anchorage of trees, for differing planting materials in a hybrid poplar plantation on waste rock slopes (3H:1V, 18°) covered with 50 cm of soil. More specifically, this study examines the effects of using different planting materials (whip, cuttings, and bareroot) and soil qualities (50 cm of topsoil or 40 cm of mineral soil + 10 cm of topsoil) on root architecture and mechanical resistance to uprooting of planted trees four years after planting. Lateral traction tests of hybrid poplars were conducted until uprooting as well as a complete excavation method to relate anchorage to the root architectural characteristics. The study is based on the following hypotheses:

- i) Only bareroots seedlings have roots at planting. Therefore, the growth and survival of trees will be highest for bareroots.
- ii) The growth and survival of hybrid poplars will decrease when the topsoil is combined with mineral soils as compared to using topsoil only.
- iii) The root architecture of unrooted plants (cuttings and whips) will be less developed (number and diameter of roots; maximum rooting depth) than rooted plants (bareroots). Therefore, the resistance to uprooting of cuttings and whips will be lower than for bareroots.
- iv) Higher topsoil quantities will foster more developed root systems (in terms of number, length, and diameter of roots), thus, allowing for higher resistances to uprooting forces.

6.3 Materials and methods

6.3.1 Site description

The study site was located at the Canadian Malartic mine in the Abitibi-Temiscamingue region of Quebec, Canada ($48^{\circ} 08' 00''$ N $78^{\circ} 08' 00''$ W). Canadian Malartic is a an open pit gold mine (average grade 1g/t) that exploits an orebody at a rate of approximately 55,000 t/day. The ore to waste rock ratio at the mine is typically between 2 to 4, and thus mining operations at Canadian Malartic generate significant quantities of solid wastes.

The forest vegetation that surrounds the site is mainly comprised of stands of black spruce (*Picea mariana*), jack pine (*Pinus banksiana*), and larch (*Larix spp.*) mixed with white birch (*Betula papyrifera*) and trembling aspen (*Populus tremuloides*).

6.3.2 Experimental design

The experimental design, shown in Figure 6.1, included eighteen (18) experimental plots organized in a randomized complete block design that included three

replication blocks and two tested factors (2×3 factorial design): 1) three plant types (whips, bareroots, and cuttings of the hybrid poplar MxB 915318); and 2) two substrates (50 cm of topsoil versus 40 cm of mineral soil + 10 cm of topsoil). Each of the eighteen experimental plots contained 25 trees (pseudoreplicates) with a spacing of 2×2 m. The plots were separated by 4-m-wide buffer zones. Two lines of fast-growing willows (*Salix miyabeana* Seemen, clone Sx64) were planted in the upper half to limit soil erosion and water run-off.

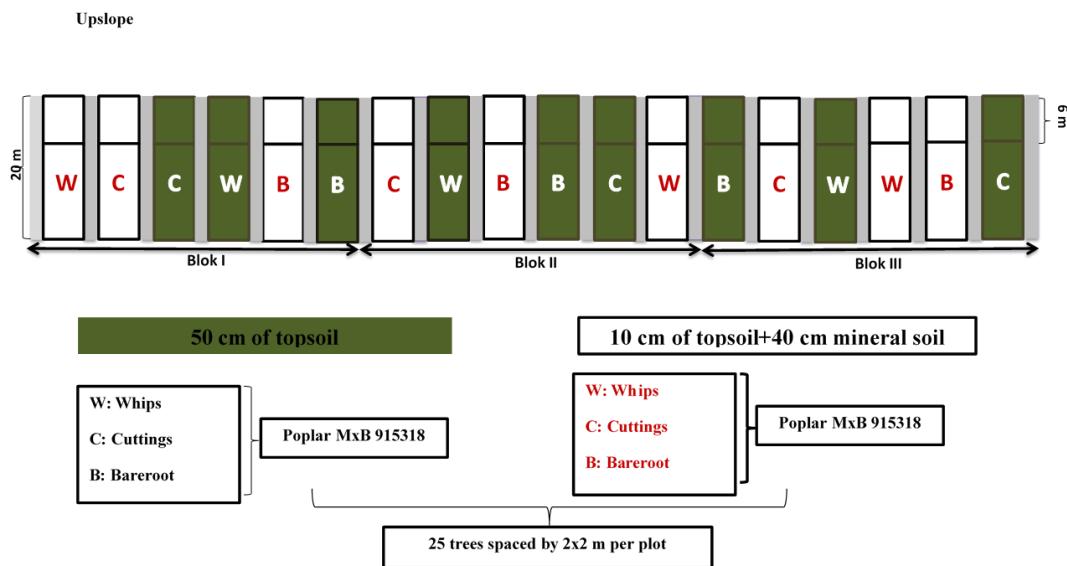


Figure 6.1 Plantation and experimental design

6.3.3 Planting material and growing conditions

The experimental plots were established in May 2013 on 3H: 1V (33% or 18°) slopes of mine waste rocks covered with 50 cm of soil. The topsoil was a Grey Luvisol soil (Agriculture and Agri-Food Canada, 2010) from an area that was located above the actual open pit. The topsoil consisted of the O and A horizons; i.e., the first 30 cm, which were dark in color and rich in organic matter (~ 20% OM content). The mineral soil contained the sandy clay remained which was excavated to bedrock after the removal of the overburden topsoil. The soil texture was composed of 42% clay particles, 27% silt particles, and 31% sand particles, and contained ~1% OM. The topsoil and mineral soil were stored for 30-36 months before use in 7-m-high piles with a slope of 2.5:1. One composite sample (consisting of two samples per plot; 0-10 cm depth) was used for chemical characterization during planting (May 2013). Soil nutrient analyses were conducted by the Lakehead University Centre for Analytical Services (Thunder Bay, Ontario, Canada). All measured soil and waste rock metal concentrations were below relevant regulatory thresholds (Table 6.1).

A physical characterization of the same soil (topsoil and mineral soil) was determined in other studies (Larchevêque et al., 2016; Larchevêque and Pednault, 2016; Larchevêque et al. 2014). Briefly, these studies showed a greater macroporosity (15-20%) and lower density in the topsoil ($0.7\text{-}0.9 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$) relative to the mineral soil (macroporosity: 12-16%; density: $1.1\text{-}1.2 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$). Both the topsoil and mineral soil were found to have macroporosities above the 10% threshold allowing root growth (Archer et Smith, 1972). The density of the two soils is also adequate for root growth (Schuuman, 1965).

The planting material used in this study was a semi-exotic hybrid poplar clone (*Populus maximowiczii* A. Henry \times *Populus balsamifera* L. (M \times B) - clone 915318),

locally produced by the Quebec Ministry of Energy and Natural Resources (MERN). This poplar was selected based on its rapid growth and establishment from vegetative material.

Three planting materials were used (Figure 6.2): bareroot plants (mean length above ground = 131 cm and mean diameter = 11 mm); whip plants (mean length above ground = 93 cm and mean diameter = 15 mm), and cuttings (mean length above ground = 33 cm and mean diameter = 11 mm). The mean lengths and diameters of the planting materials were initial measurements taken just after planting. These measurements exclude the 20-30 cm of stems/roots buried in the soil.

Tableau 6.1 Initial soil and waste rock characterizations. All values are expressed on a dry matter basis. Where applicable, values represent mean \pm standard error; N = 18 except for the waste rocks. EC = electrical conductivity; OM = organic matter

	Units	Overburden topsoil	Overburden mineral soil	Waste rock	Quebec Government (2019) regulatory threshold
pH		6 \pm 0.2	6 \pm 0.2	6.7 to 9	
EC	mS.cm ⁻¹	0.4 \pm 0.1	0.4 \pm 0.1		
OM	%	20 \pm 4	1 \pm 0.5		
N _{total}	%	0.6 \pm 0.2	0.6 \pm 0.3		
S _{total}	%	0.3 \pm 0.05	0.3 \pm 0.04		
C _{total}	g.kg ⁻¹	3 \pm 0.5	2 \pm 0.2	15	
K _{avail}	g.kg ⁻¹	0.1 \pm 0.005	0.1 \pm 0.004		
Mg _{avail}	g.kg ⁻¹	0.6 \pm 0.04	0.2 \pm 0.01		
N _{avail}	mg.kg ⁻¹	26 \pm 2	18 \pm 3		
P _{total}	mg.kg ⁻¹	1 \pm 0.03	bdl		
Cu _{avail}	mg.kg ⁻¹	7 \pm 0.5	3.0 \pm 0.1		
Fe _{avail}	g.kg ⁻¹	0.3 \pm 0.02	0.1 \pm 0.005		
Mn _{avail}	mg.kg ⁻¹	108 \pm 15	20 \pm 4		
Zn _{avail}	mg.kg ⁻¹	5 \pm 0.5	1 \pm 0.1		
Al _{total}	g.kg ⁻¹	13 \pm 1	11 \pm 0.9	9.5	
As _{total}	mg.kg ⁻¹	6 \pm 1	5 \pm 1	5	30
B _{total}	mg.kg ⁻¹	4 \pm 1	2 \pm 0.5		
C _{total}	g.kg ⁻¹	9 \pm 0.5	7 \pm 0.6		
Cd _{total}	mg.kg ⁻¹	0.2 \pm 0.001	0.2 \pm 0.001	0.2	5
C _{total}	mg.kg ⁻¹	5 \pm 2	8 \pm 1	20	50
Cr _{total}	mg.kg ⁻¹	195 \pm 26	140 \pm 30	123	250
Cu _{total}	mg.kg ⁻¹	54 \pm 3	29 \pm 1	25	100
Fe _{total}	g.kg ⁻¹	29 \pm 1	24 \pm 2	24	
K _{total}	g.kg ⁻¹	4 \pm 0.5	2 \pm 0.4	10	
Mg _{total}	g.kg ⁻¹	14 \pm 1	11 \pm 2	10	
Mn _{total}	mg.kg ⁻¹	449 \pm 15	327 \pm 22	372	1000
Mo _{total}	mg.kg ⁻¹	3 \pm 0.5	1 \pm 0.09	6	10
Na _{total}	g.kg ⁻¹	0.2 \pm 0.02	0.2 \pm 0.01	0.2	
Ni _{total}	mg.kg ⁻¹	86 \pm 12	64 \pm 14	57	100
Pb _{total}	mg.kg ⁻¹	157 \pm 34	36 \pm 5	31	500
S _{total}	g.kg ⁻¹	3 \pm 1	1 \pm 0.05		
Sr _{total}	mg.kg ⁻¹	99 \pm 6	52 \pm 5		
T _{total}	g.kg ⁻¹	0.9 \pm 0.07	0.9 \pm 0.06		
Zn _{total}	mg.kg ⁻¹	102 \pm 10	59 \pm 8	63	500

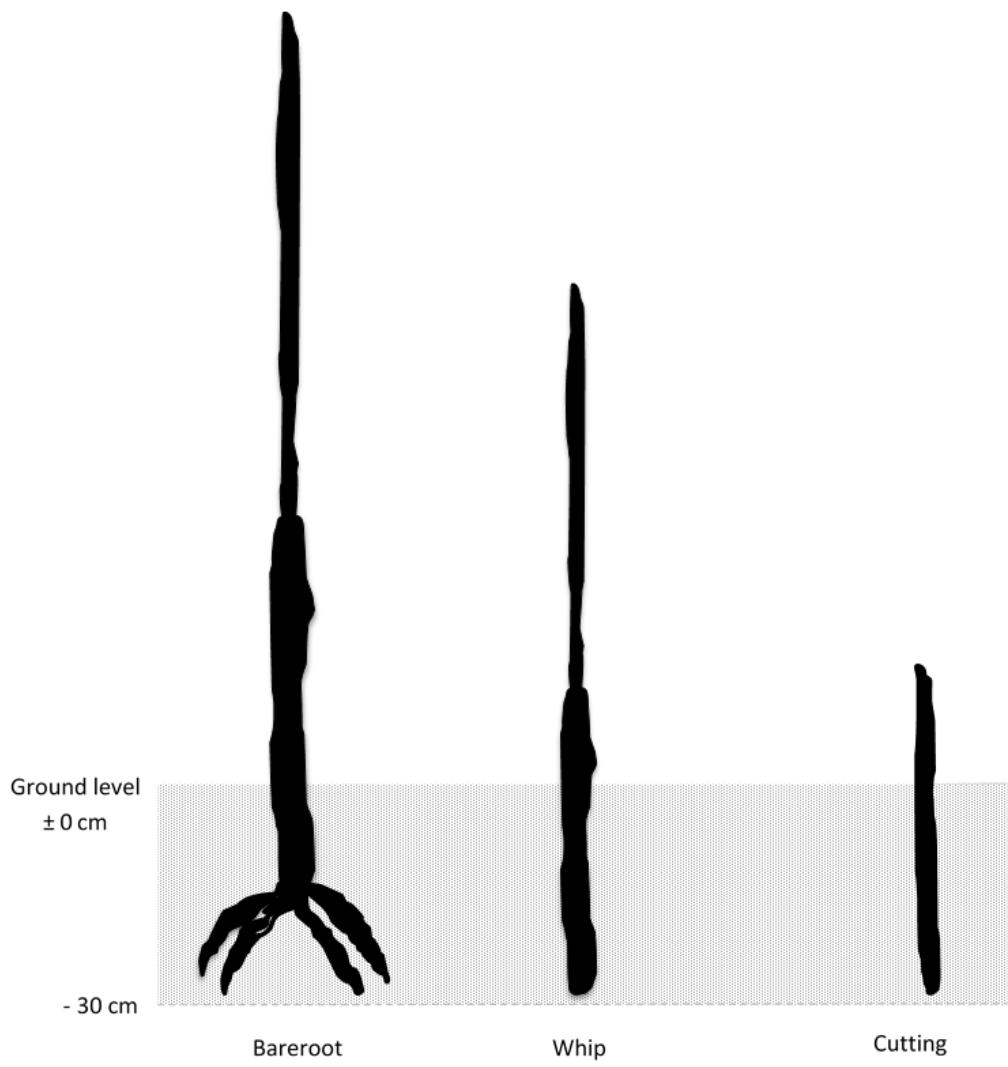


Figure 6.2 Illustration of the three planting material types

6.3.4 Measurements, sampling, and analysis

Initial growth measurements (maximum height and basal diameter) were conducted at the planting in spring 2013, as well as at mortality. This inventory was repeated in the fall in 2013, 2014, 2015, and 2016.

6.3.4.1 Coarse root observations

In this study, only roots with a diameter > 4 mm were considered coarse, structural roots (Danjon and Reubens, 2008). Observation trenches were dug after four growing seasons (June 2016) under the second tree of the second line from the bottom of the slope, approximately ten centimeters from the stem. These $1 \times 1 \times 1$ m³ trenches were dug with a mechanical shovel (Figure 6.3) for each plot (N = 18).

The maximum rooting depth was noted for each treatment.



Figure 6.3 Trenches made with a mechanical shovel to determine the maximum rooting depth

6.3.4.2 Root extraction

In June 2016 (fourth growing season), the root systems of eighteen trees (one tree in the center of each plot for each treatment), were excavated with a high-pressure water jet using a hydraulic pump (PUMP 2 " MULTIQUIP, N Series: 2H-7348). The structure of the root system was photographed, described, and schematized (360° distribution, vertical distribution). The overall description of the root systems was complemented by the following quantitative measurements: the number of main lateral roots (roots with a diameter > 10 mm), the number of branches from each main root, the diameter of each main root every 50 cm (until there was no more change in the diameter), the total length of the main roots until reaching a diameter < 4 mm, and the angles between main lateral roots. Measurements were performed from the collar (origin of all roots) in the direction of growth. Prior to excavation, the stem basal diameter (diameter of the base of the stem) and maximum height were measured for the eighteen studied hybrid poplars. For each excavated tree, the aboveground biomass and belowground biomass was measured. The material was oven-dried at 90 °C for 48 h for the aboveground parts and for 72 h for the roots. Once dried, the samples were weighed.

Two root anchorage indices were calculated to integrate some of the key measured root architectural parameters (Figure 6.4) for each plot. These included:

- Angles between the main lateral roots (A_n): the sum of the angles between the main lateral roots on the upslope side was calculated for each excavated tree (one tree per plot, twelve in total).
- Diameters of the lateral roots on the upslope side (d ; mm): the diameter of each lateral root was measured at the collar of each excavated tree.
- The length of the main lateral roots (L ; cm):
- The maximum root depth (P ; cm): measured for each excavated tree.

Two indexes were calculated and compared:

I_1 (cm) normalized by the sum of the diameters of the upslope roots.

I_2 (cm²) multiplied by maximum root depth and divided by soil depth.

$$\text{Stability index 1} (I_1) = \frac{\sum_0^n (x_n d_n)}{\sum_0^n d_n}$$

$$= \frac{\sum_0^n (L d_n \sin A_n)}{\sum_0^n d}$$

$$\text{Stability index 2} (I_2) = \sum_0^n (x_n d_n) \left(\frac{P}{\text{soil depth}} \right)$$

$$= \sum_0^n (L d_n \sin A_n) \left(\frac{P}{\text{soil depth}} \right)$$

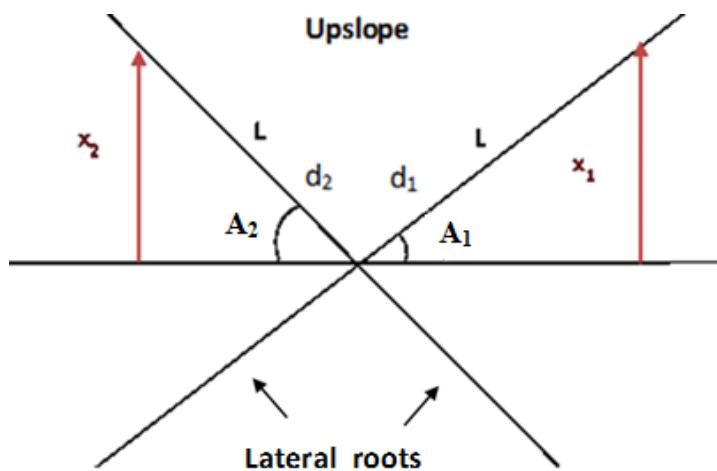


Figure 6.4 Equations used to calculate the root anchorage indexes, A_n : angle between the main lateral roots of the upslope side and the line separating upper and lower slope, d_n : diameter of the corresponding structural roots (cm), L : length of the root, P : maximum rooting depth (cm)

The concept is based on the balance of forces in a 2-D plane. The following hypotheses were considered:

- Hypothesis 1: the traction force exerted on the lower trunk is transferred to the upslope roots as a tensile force. If we assume that the force exerted is in the direction of the y-axis, only the y component of the roots will resist the exerted force. We also consider that everything happens in a 2-D plane.
- Hypothesis 2: the downslope roots are in compression and have a negligible impact on the resistance of the roots to the uprooting force exerted by the winch.
- Hypothesis 3: for the first index (I_1), it is assumed that the influence of the roots is limited to a certain length. It is also assumed that the root diameter has an influence on its ability to resist the tension exerted.

6.3.4.3 Lateral uprooting tests

In July 2016 (fourth growing season), lateral traction tests were performed for eighteen hybrid poplars (one tree in the center of each plot) using methods adapted from previous studies (Grouard, 1995; Sheedy, 1996). Before the uprooting tests, maximum height and basal diameter of the stem were measured for each tree.

The point of attachment was determined by preliminary tests in order to have a significant force on the root systems and not cause curvature of the stems. An automatic winch (WARN Pro Vantage 2500SCE 4200 lb) was used. It was attached to an optimum dynamometer scale model OP 926 (Optima Led Digital Hanging Scale 2000 lb), which was in turn attached to the tree with a sling and chain around the base of the trunk. The force was measured by the dynamometer and the readings were converted to Newtons. A lateral force (0-8811 N) was exerted down the slope, parallel to the slope. The applied force (N) and the displacement (cm) of the tree

(displacement of the stem compared to the initial state) were noted each minute until the *root system* was removed from the soil.

6.3.5 Statistical tests

Results from the lateral uprooting tests (maximum resisting force); root architecture observations (mean root diameter, mean number of roots, mean number of root branches); biomass analyses (aboveground and belowground biomass, shoot to root ratio); maximum measured rooting depths; and calculated root anchorage indexes were analyzed using mixed linear models created with R (ver.3.1.0). The fixed effects were planting material and soil quality, and the random effect was block. An ANOVA with repeated measures was used for tree height, basal diameter, and diameter at breast height. The normality of the response variables and the ANOVA assumptions were verified. The Tukey multiple comparison test was used when an effect was significant. A significance level of 5% was considered for the statistical analyses performed in this study.

6.4 Results

6.4.1 Growth, survival, and poplar biomass

After four growing seasons, survival was high (95-100%) for all treatments (Table 6.2). The maximum height of the trees was lower for the cuttings compared to the other two types of planting materials until autumn 2015 for the topsoil only treatment and autumn 2014 for the topsoil + mineral soil treatment (Figure 6.5). However, at the end of the fourth growing season, none of the treatments were statistically different in terms of the aboveground and belowground development of trees (maximum height, basal diameter, diameter at breast height, root biomass, aboveground biomass, aboveground/belowground ratio, aboveground/total biomass

and belowground/total biomass; Table 6.3). No interactions were observed between planting material and soil quality. In the fourth growing season, mean tree height ranged from 327 to 471 cm and the basal diameter ranged from 50 to 78 mm. Aboveground biomass (1791-2672 g) was four times greater than the root biomass (379-566 g).

Tableau 6.2 Effect of treatment on poplar survival rate (%) at each growing season (2013: first growing season; 2014: second growing season; 2015: third growing season; 2016: fourth growing season). Mean \pm SE, N = 75. Mean values that differed significantly at P <0.05 are marked with different letters, a>b

		Treatments	2013	2014	2015	2016
Topsoil	Whips	100 \pm 0 (a)	100 \pm 0 (a)	99 \pm 1 (a)	98 \pm 1 (a)	
	Cuttings	100 \pm 0 (a)	100 \pm 0 (a)	95 \pm 3 (a)	95 \pm 2 (a)	
	Bareroots	100 \pm 0 (a)				
Mineral soil	Whips	100 \pm 0 (a)				
	Cuttings	100 \pm 0 (a)	100 \pm 0 (a)	98 \pm 2 (a)	97 \pm 2 (a)	
	Bareroots	100 \pm 0 (a)	100 \pm 0 (a)	95 \pm 4 (a)	95 \pm 4 (a)	

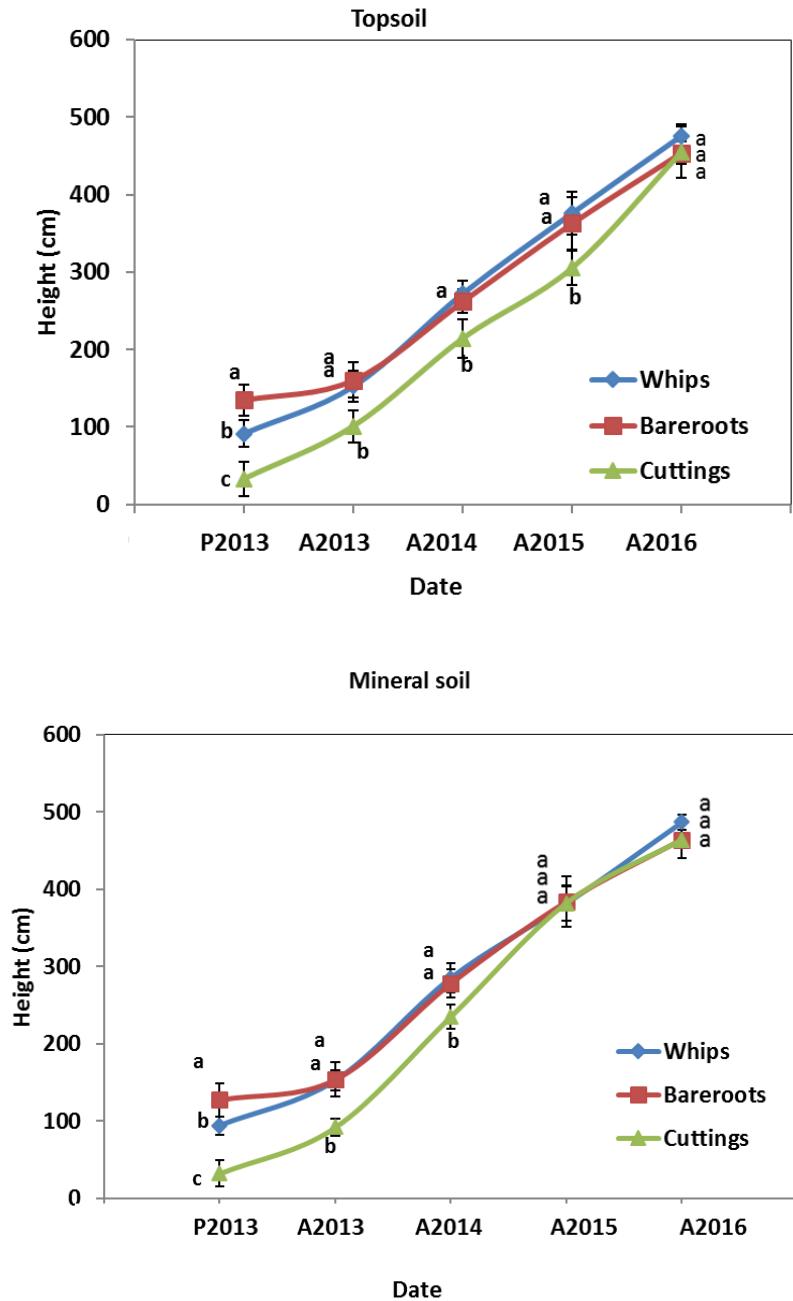


Figure 6.5 Maximum height (cm) of whips, cuttings, and bareroots on topsoil and mineral soil at planting (spring 2013) and at the end of each growing season from 2013 to 2016. Mean \pm SE, N=75. Mean values that differed significantly at $P < 0.05$ are marked with different letters at each date, a>b

Tableau 6.3 Effect of treatments (Topsoil: whips, cuttings, and bareroots; Mineral soil: whips, cuttings, and bareroots) on hybrid poplar biomass, diameter, and maximum height after four growing seasons (2016). Mean \pm SE, N = 3. Mean values within a column that differed significantly at P < 0.05 are marked with different letters, a > b. Ba = aboveground biomass; Bb = belowground biomass; Ba/Bb = above/belowground biomass

	Planting material	Basal diameter (mm)	Diameter at breast height (mm)	B _a (g)	B _b (g)	B _a /B _b	B _a /total biomass	B _b /total biomass
Topsoil	Whips	53 \pm 21(a)	31 \pm 17(a)	2519 \pm 495 (a)	515 \pm 39(a)	4.89 \pm 1.2(a)	0.83 \pm 0.04(a)	0.17 \pm 0.02(a)
		78 \pm 5(a)	43 \pm 9(a)	1801 \pm 925 (a)	379 \pm 65(a)	4.75 \pm 1.2(a)	0.83 \pm 0.05(a)	0.17 \pm 0.01(a)
		50 \pm 15(a)	29 \pm 12(a)	1791 \pm 649 (a)	544 \pm 38(a)	3.29 \pm 1.4(a)	0.77 \pm 0.04(a)	0.23 \pm 0.02(a)
	Cuttings	55 \pm 17(a)	30 \pm 9(a)	2227 \pm 865 (a)	466 \pm 29 (a)	4.77 \pm 0.9(a)	0.83 \pm 0.2(a)	0.17 \pm 0.04(a)
		62 \pm 9(a)	44 \pm 4(a)	1870 \pm 312 (a)	449 \pm 37 (a)	4.16 \pm 1.1(a)	0.81 \pm 0.03(a)	0.19 \pm 0.02(a)
		55 \pm 11(a)	31 \pm 8(a)	2672 \pm 442 (a)	566 \pm 24 (a)	4.72 \pm 0.8(a)	0.83 \pm 0.02(a)	0.17 \pm 0.03(a)
	Bareroots	55 \pm 17(a)	30 \pm 9(a)	2227 \pm 865 (a)	466 \pm 29 (a)	4.77 \pm 0.9(a)	0.83 \pm 0.2(a)	0.17 \pm 0.04(a)
		62 \pm 9(a)	44 \pm 4(a)	1870 \pm 312 (a)	449 \pm 37 (a)	4.16 \pm 1.1(a)	0.81 \pm 0.03(a)	0.19 \pm 0.02(a)
		55 \pm 11(a)	31 \pm 8(a)	2672 \pm 442 (a)	566 \pm 24 (a)	4.72 \pm 0.8(a)	0.83 \pm 0.02(a)	0.17 \pm 0.03(a)

6.4.2 Root architecture

Four years after planting, there was no significant difference between the topsoil only and topsoil + mineral soil treatments in terms of the main quantitative variables describing the root system structure (Table 6.4). These included the: mean root number, mean root diameter, maximum rooting depth, and number of sink roots. Similarly, the planting material had no significant effect on the same variables. There was no interaction between planting material and the quality of soil. Hybrid poplars showed herringbone root structure with lateral and horizontal roots. The main roots were ramified and could extend to lengths of more than 2 m. The diameter of these roots varied between 11 and 26 mm at a maximal distance of 1 m from the trunk.

For all root parameters, the results showed that the two calculated root anchorage indexes did not change significantly with planting material or soil quality. There was no interaction between the two evaluated factors (planting material and soil quality). (Figure 6.6).

Tableau 6.4 Effect of treatments (Topsoil: whip, cutting, bareroot; Mineral soil: whip, cutting and bareroot) on architectural root (diameter > 4 mm) variables after four growing seasons (2016). N = 3. Mean values that differed significantly at P <0.05 are marked with different letters, a>b

	Planting material	Root number (lateral roots)	Mean root diameter (mm)	Maximum rooting depth (cm)	Number of sink roots (in depth)
Topsoil	Whips	4 ± 2 (a)	18 ± 7 (a)	40 ± 6 (a)	12 ± 4 (a)
	Cuttings	5 ± 1 (a)	21 ± 3 (a)	37 ± 14 (a)	9 ± 5 (a)
	Bareroots	5 ± 1 (a)	20 ± 5 (a)	43 ± 8 (a)	14 ± 1 (a)
Mineral soil	Whips	4 ± 1 (a)	19 ± 6 (a)	47 ± 10 (a)	12 ± 3 (a)
	Cuttings	4 ± 3 (a)	22 ± 2 (a)	38 ± 17 (a)	11 ± 7(a)
	Bareroots	5 ± 1 (a)	20 ± 2 (a)	36 ± 15 (a)	11 ± 4(a)

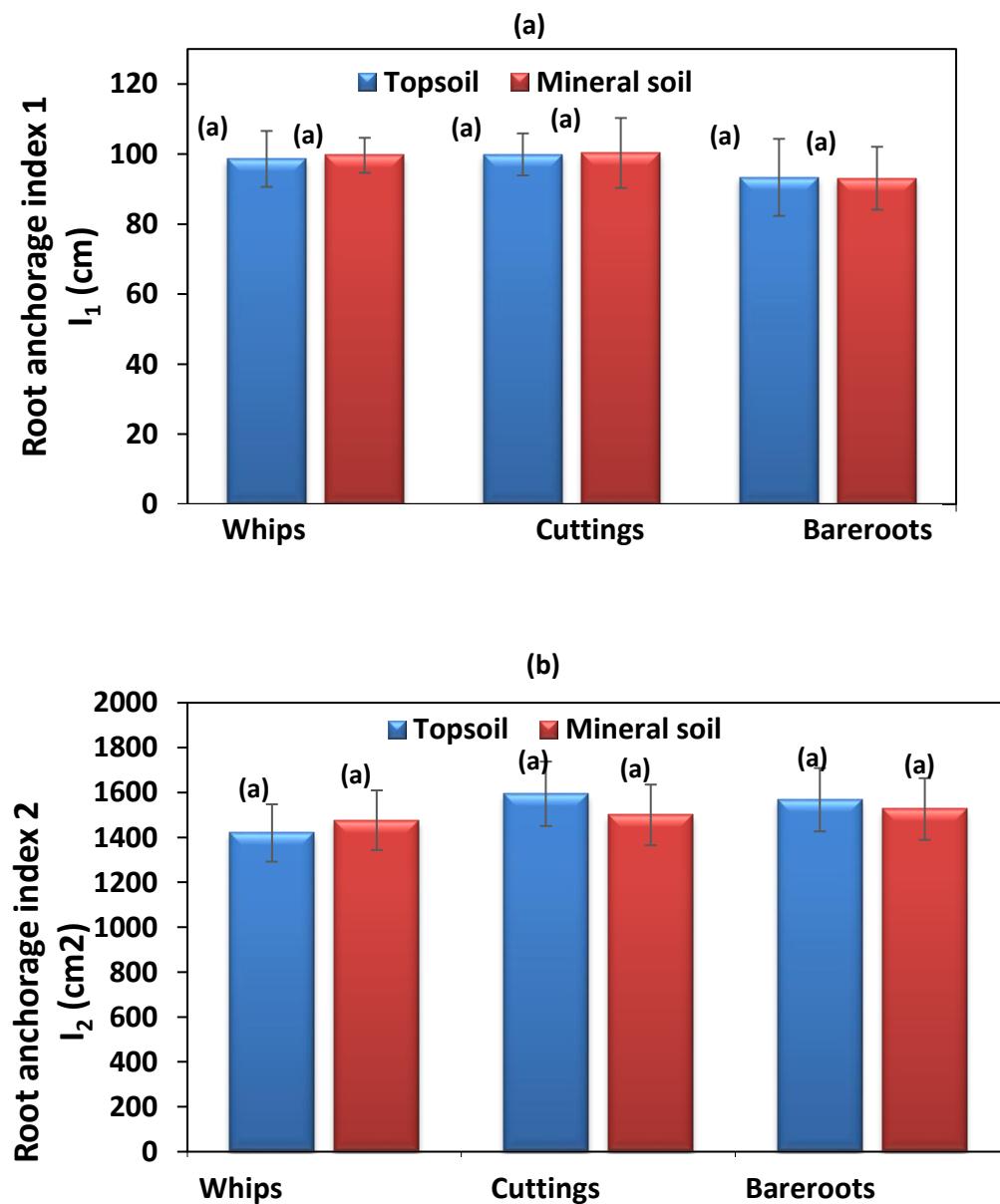


Figure 6.6 Comparison of root anchorage indexes I_1 (a) and I_2 (b) for the three types of planting material (whips, cuttings, and bareroots) on topsoil and mineral soil, after four growing seasons (2016). Mean \pm SE, N =3. Mean values that differed significantly at P <0.05 are marked with different letters, a> b

6.4.3 Lateral uprooting tests

For both the aboveground and belowground parameters, soil quality and tree planting material did not significantly affect the maximum resistance to uprooting and there was no significant interaction between the two tested factors. The measured maximum resistance force to uprooting varied between 7351 and 8851 N (Figure 6.7), with the following mean values for the topsoil treatment (whip: 7320 N, cutting: 8767 N, and bareroot: 8046 N) and topsoil + mineral soil treatment (whip: 7049 N, cutting: 8587 N, and bareroot: 8026 N).

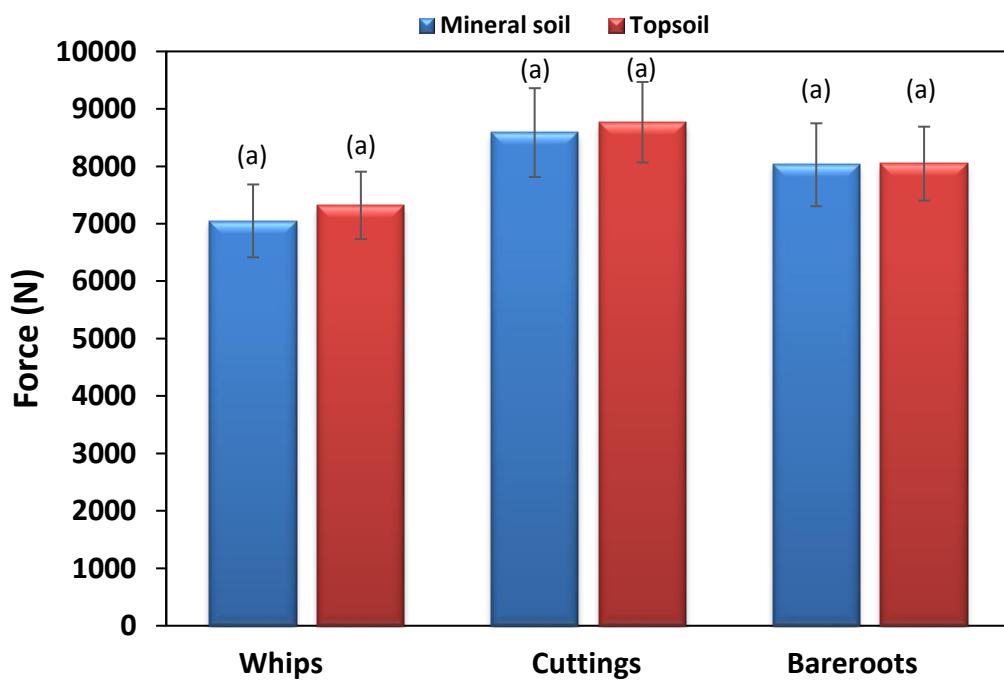


Figure 6.7 Comparison of the maximum resistance force for the three types of planting material (whips, cuttings, and bareroots) on topsoil and mineral soil, after four growing seasons (2016). Mean \pm SE, N =3. Mean values that differed significantly at P <0.05 are marked with different letters, a> b

Figure 6.8 shows the evaluation of the uprooting force relative to the displacement of the tree; all treatment curves had similar uprooting speeds. The trees were generally uprooted after 30 cm of displacement when the force reached approximately 8000 N

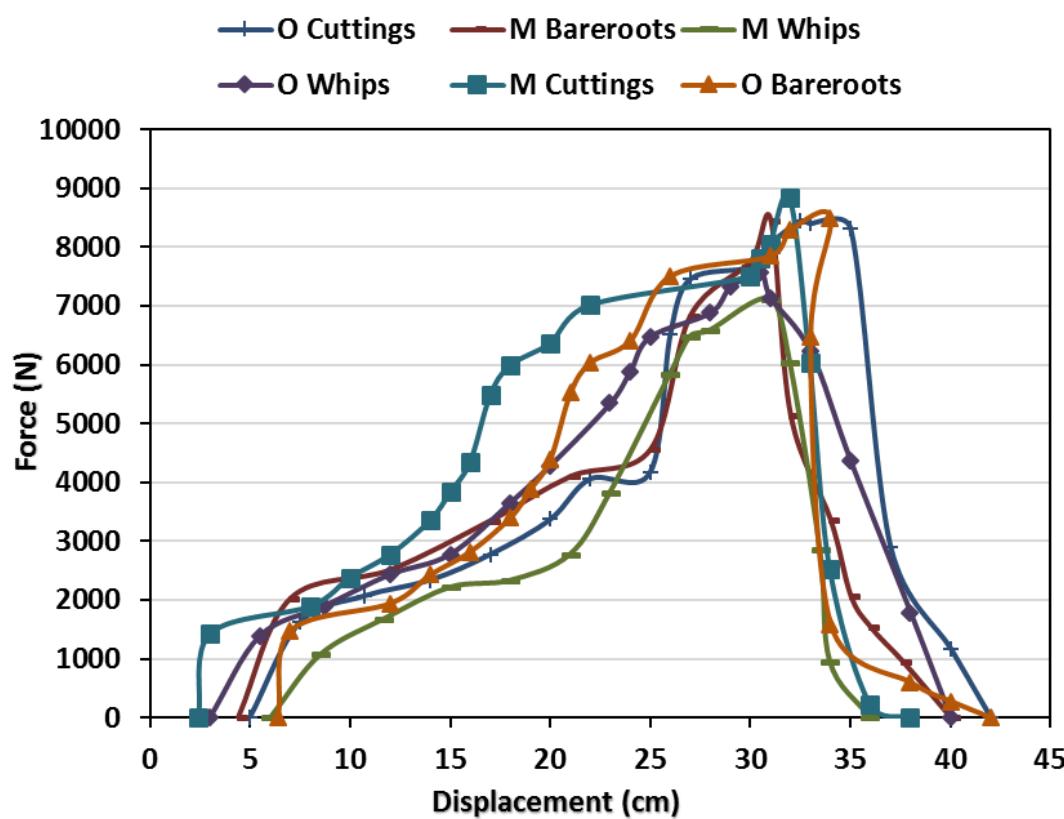


Figure 6.8 Effect of treatments (Topsoil: whips, cuttings, and bareroots; Mineral soil: whips, cuttings, and bareroots) on the uprooting force according to displacement after four growing seasons (2016). Mean \pm SE, N = 3

6.5 Discussion

To the best of our knowledge, this trial is one of a kind study that examined the effect of planting material and soil quality on the anchorage of trees planted on waste rock slopes. Tree stability can be greatly influenced by the distribution of biomass between the aboveground and belowground parts. Contrary to the authors' first hypothesis, there were no statistically significant differences between the six treatments in terms of aboveground biomass, belowground biomass, and root/shoot ratios. Prior experiments by DesRochers and Tremblay (2009) compared four planting materials (bareroots, rootstocks, whips, and cuttings) of hybrid poplars in a clayey soil. They observed significant differences in the root/shoot ratio that were attributed to the different planting types, but only in the first growing season. Thus, the difference between rooted and unrooted planting materials can disappear over successive growing seasons (Sidhu and Dhillon, 2007). At the end of growth monitoring in the present study (autumn 2016), the trees from cuttings were the same sizes as those from the bareroots and whips, despite their height being much smaller at the beginning of the experiment. This could be explained by a higher growth rate in the cuttings (Desrochers and Tremblay, 2009; McNabb and Vanderschaaf, 2005). Results from the present study also indicated similar mean diameters for the three tested planting materials after four growing seasons, despite the initial mean diameter of the whips being higher than that of the cuttings and bareroot seedlings. Similarly, previous studies did not find a positive relationship between initial dimensions of plants and growth (Robison and Raffa 1996, hybrid poplar; Haissig, 1984, *Pinus banksiana*). However, studies that examined other tree species, such as black spruce (*Picea mariana*), white spruce (*Picea glauca*), Olga Bay larch (*Larix olgensis*), douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii*), western hemlock (*Tsuga heterophylla*), and Sitka spruce (*Picea sitchensis*), have noted that initial plant size parameters, especially diameter, influence survival and growth performance

(Thiffault et al., 2014; Li et al. 2011; Jobidon et al. 2003; Newton et al. 1993). Cuttings with large initial diameters can contain more non-structural carbohydrates and thus provide a greater energy reserve, improving the likelihood of rooting success (Landhausser et al. 2012; Tschaplinski and Blake, 1989). However, it appears that the effect of carbohydrate reserves on rooting ability depends on the site-specific environmental conditions and on the tree species (Thiffault et al. 2014; Pinto et al. 2011).

The difference in root/shoot ratio has a significant effect on growth because of its implications for water uptake and water loss in trees (Grossnickle, 2000). The survival and growth of cuttings and whips were as high as bareroot seedlings despite the fact that they needed to develop new roots to access soil resources. Bareroot plants already have a root system at planting and therefore have rapid access to water and nutrients. However, bareroot plant roots could have poor contact with the soil (air pockets between root and soil) (Grossnickle, 2000). Moreover, bareroot plants have to support large aboveground parts and must regenerate new roots to facilitate water and nutrient uptake. The buried portion of the stem of poplar cuttings and whips can develop roots from their stems when conditions are appropriate (DeBell and Harrington, 1997; Hansen et al., 1993; Friend et al., 1991). Other studies have reported varying performances among planting material types (Douglas et al., 2016; MacDonald et al. 2015; Thiffault, 2004; Newton et al. 1993). Additionally, Duddles and Owston (1990) indicated that the site conditions could have more impact on growth and survival than the planting material type. The rate of survival and height growth of the tested hybrid poplar clone ($26 - 143 \text{ cm. yr}^{-1}$) were similar or superior to those observed for the same poplar clone in plantations on other sites with similar boreal conditions (40 cm. yr^{-1} , Benomar et al., 2012; Larchevêque et al., 2011). It appears that, with the use of a 50-cm-thick layer of overburden soil, hybrid poplar

planting could be appropriate for the revegetation of waste rock slopes under both short- and medium-term conditions.

Soil quality directly influences tree development and survival. Notably, the presence of organic matter influences many functions in the soil (Rezaei and Gilkes 2005; Doran and Parkin, 1994). Moreover, prior studies have shown a positive effect of soil thickness on tree growth and survival (Larchevêque and Pednault, 2016; Tordoff et al. 2000). Contrary to the authors' second hypothesis, there were no significant differences in the growth and survival of trees when the topsoil (and the organic matter) quantity increased. The development of the hybrid poplar tested in this study was equivalent in 50 cm of topsoil as in a combination of 40 cm of mineral soil and 10 cm of topsoil. This could be explained by the improvement of the quality of the mineral soil after the four years of planting. In particular, the establishment of herbaceous plants can constitute a source of organic matter by providing litter (Zhou et al. 2008; Li et al. 2006).

The anchorage of a tree is controlled by the architecture of its root system, as well as its interactions with the soil. Root architecture has an important influence on the tensile forces mobilized in the roots (Dupuy et al., 2005). In the present study, neither the planting material diameter nor the soil quality influenced the root architecture of the tested hybrid poplar. Both rooted (bareroots) and unrooted plants (cuttings and whips) developed coarse root system with similar architectures after four growing seasons. In particular, there was no difference observed between treatments in terms of the quantitative variables used to evaluate and describe the root system structures. Thiffault (2010) measured stability (resistance to winching) of large containerized and bareroot black spruce (*Picea mariana*) seedlings in the seventh growing season and characterized their root architecture. Their results showed no significant effects due to planting material on the trees' stabilities or root architectures. In light of the results of the present study, which showed that there was no significant difference

between the six treatments in terms of the maximum resistance to the uprooting, the third hypothesis was dismissed. Indeed, it is especially the lateral roots located in the first horizons of the soil that intervene in the anchoring (Ennos et al. 1993; Danjon et al. 2005). These roots trap a large soil-root plate whose volume will greatly reinforce the anchoring of the plant (Crook and Ennos 1993). A homogeneous distribution of these roots is essential to form the soil root plate around the stem to ensure anchorage. After four growing seasons however, the studied poplars were too young to observe a well-developed root-plate. Moreover, during a mechanical stress, if the 360° distribution of the roots is homogeneous, tension will be applied in a homogeneous way, which will increase the tree's resistance to an uprooting force (Danjon and Reubens, 2008).

The establishment of the root architecture during the development of the plant is a complex process (Pagès and Pellerin 1996). The physical properties of the soil (structure and texture) play a major role in the anchorage resistance of the plant. Depending on the nature and texture of the soil, the anchorage of the plant can be modified (Dupuy et al. 2007; Quine et al. 1991). Root development could be affected by constraints encountered in certain soils, such as rocks (Danjon et al. 1999; Quine et al. 1991). Research has shown that root systems are more mechanically resistant in clays than in sandy soils (Dupuy et al. 2007). Prior works also show that soil moisture conditions can affect plant stability. However, the effect of the degree of saturation of soil on plant stability depends on the type of soil and remains poorly understood (Kamimura et al. 2012). Contrary to the authors' fourth hypothesis, the results of this study showed a similar effect of both tested soils in terms of tree stability. For the studied hybrid poplar, there were no significant differences between the two soil qualities in terms of the number of roots, diameter of the roots, maximum rooting depth, the number of sink roots (in-depth). In the present study, it appears that the thickness of the soil above waste rocks, rather than its quality, could have

mostly controlled the root development and, therefore, the anchorage of the trees. Indeed, maximum rooting depths were lower than the soil thickness of 50 cm for all treatments (no coarse roots observed in the underlying waste rocks).

In line with the results of the maximum resistance to the uprooting, root architecture, shoot/root ratio, and plant size measurements showed no significant differences due to either planting material or soil quality. This was reflected in the two calculated root anchorage indexes. The use of these indexes appears to be an interesting option for evaluating the stability of trees without using lateral uprooting tests. The first index (*I1*) integrates the 180° distribution of the root system and could be very useful for evaluating the stability of older trees, as well as for species with a branched root system for which anchorage is achieved mainly by the distribution of the roots (Bailey et al. 2002). The second index (*I2*) also integrates the vertical distribution of roots and would be more interesting to use for species growing in deeper soils for which anchorage depends mainly on taproots (Danquechin Dorval et al. 2016).

6.6 Conclusion

This study demonstrated that the root anchorage of a four-year-old plantation of hybrid poplar was not affected by soil quality (variable topsoil thickness) or by planting material (variable shoot/root ratio) when 50 cm of overburden soil was used to cover waste rock slopes. Results indicated that there was no significant difference between treatments in terms of: the maximum resistance to uprooting, number of lateral roots, mean root diameter, root biomass, aboveground biomass, shoot/root ratio, maximum height, and basal diameter. This finding is interesting as it demonstrates that the performance of cuttings (in terms of stability, root development, aboveground growth, and survival) is as high as that of whips and bareroot plants, while the costs related to their production are lower. Moreover, in the short term, there was no significant difference between hybrid poplars planted

on a 50 cm topsoil layer or on a soil layer comprised of 10 cm of topsoil and 40 cm of mineral soil in terms of survival, growth, root development, and tree stability. Therefore, lower quantities of topsoil could be used, thus reducing the challenge that mining companies face in finding sufficient quantities of soil for the revegetation of sites.

In the future, it is believed that these results will be maintained. Four years after planting, the root architecture of hybrid poplars is already defined and, without change due to external environmental factors, the root distribution will only become more complex over time. However, it could be interesting to evaluate the effect of soil quality and planting material on native species and species with different root systems, or to examine greater soil thicknesses over waste rocks.

6.7 Acknowledgements

We thank the research technician and undergraduate students who helped in the fieldwork. This study was funded by the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC) and the Canadian Malartic Partnership.

6.8 Funding

This work was funded by the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC; grant number RDCPJ 462610-13) and the Canadian Malartic Partnership.

CHAPITRE 7

DISCUSSION GÉNÉRALE

7.1 Développement racinaire des peupliers hybrides plantés sur des pentes de stériles miniers

➤ Synthèse des résultats sur le développement racinaire

Le système racinaire joue un rôle crucial dans l'ancrage ainsi que l'alimentation hydrique et minérale des arbres. Notre objectif principal était de déterminer le design optimal d'une plantation de peupliers hybrides sur des pentes de stériles. En évaluant certains facteurs, nous voulons définir les agencements qui permettent d'assurer la stabilité des arbres et un développement racinaire adéquat ainsi que de garantir l'acquisition des ressources en eau et nutriments des arbres et leur survie en condition de stress hydrique.

Le système racinaire est composé des racines fines (<2 mm) et des racines grossières (> 4 mm). Les racines fines sont directement impliquées dans l'alimentation hydrique et minérale alors que les racines grossières assurent principalement l'ancrage et la fixation des arbres dans le sol. En accord avec nos hypothèses de base, nos résultats (chapitre 3 et 4) montrent que le niveau de la compétition a affecté à la fois l'acquisition des ressources du sol et la stabilité des arbres (Figure 7.1). En effet,

tous les traits morphologiques racinaires (SRL⁵, RLD⁶, SRA⁷, RTD⁸ et MS⁹) examinés ont été plus élevés chez les traitements 1x1m et 2x2h m par rapport aux deux autres traitements. Pour améliorer la capacité d'absorption dans des conditions de sécheresse, les plantes tolérantes sont capables d'augmenter le volume de sol exploré par unité de biomasse de racines fines en augmentant ces paramètres morphologiques, en particulier le SRL (Kong et al., 2019 ; Comas et al., 2013 ; Ostonen et al., 2007 ; Leuschner et al., 2004 ; Casper et Jackson, 1997). Les racines fines du peuplier hybride sont reconnues pour leur grande plasticité et pour leur capacité d'acclimatation aux diminutions de ressources en eau et nutriments (Friend et al., 1999). Un SRL plus élevé est associé à une longueur racinaire plus élevée pour une biomasse donnée et donc à un contact plus élevé avec les nutriments et l'eau diffus dans le sol. Toutefois, on trouve dans la littérature différentes stratégies d'acclimatation pour optimiser la nutrition hydrique et minérale en fonction des espèces (Wang et al., 2019 ; Comas et al., 2002). Notamment, la production de racines fines, le développement de poils absorbants.

Du côté des racines grossières, la compétition inter et intra-spécifique a influencé négativement les principales variables quantitatives décrivant le système racinaire. La disponibilité des nutriments et de l'eau joue un rôle majeur dans l'évolution et le développement des systèmes racinaires (Ingram et Malamy, 2010). L'intensification de la compétition augmente la demande des arbres pour les ressources limitées du sol, ce qui peut affecter le développement racinaire et donc la stabilité des arbres.

⁵ SRL : longueur spécifique racinaire = Longueur des racines/masse sèche racinaire cm/g

⁶ RLD : densité de longueur des racines Longueur des racines/volume de sol cm/cm³)

⁷ SRA : surface spécifique racinaire = surface/masse sèche racinaire cm²

⁸ RTD : densité des tissus racinaire = masse sèche racinaire/volume racinaire g/cm³)

⁹ MS : masse sèche

Les systèmes racinaires des peupliers dans les traitements 2×2 m et 4×4 m ont été plus ramifiés. En cas de contraintes mécaniques dans le sol, une densité de ramifications élevée permettra une meilleure distribution de cette contrainte (Dupuy, 2003). Ces deux traitements ont été également caractérisés par des diamètres racinaires moyens plus élevés et un nombre total de racines plus élevé. En effet, le nombre de racines a un impact majeur sur la stabilité des arbres, car la présence de racines supplémentaires augmente la force d'ancrage des plantes (Stokes et al., 2007).

- Architecture observée des peupliers hybrides plantés sur les pentes de stériles recouvertes avec du sol

Dans la plantation 1, des plançons de peupliers hybrides de 1,2 m ont été plantés directement dans le sol jusqu'à une profondeur de 30 cm. Après 4 saisons de croissance (chapitre 4), on a observé un système racinaire mixte avec plusieurs étages (charpenté) chez les peupliers hybrides plantés. Cette structure a été observée par d'autres auteurs (Dehoche, 1997 ; Dickmann et al., 2001 ; Dupuy, 2003). Dupuy (2003) a observé une structure herringbone chez des peupliers de 7 ans dans des parcelles forestières en France. Toutefois, même si elle est définie initialement par la génétique, l'architecture racinaire peut changer en fonction de plusieurs facteurs environnementaux et il est difficile d'associer une structure spécifique à un groupe d'espèces dans toutes les conditions (Drénou, 2003).

Nos résultats montrent que le système racinaire des arbres plantés se caractérise par une racine verticale dominante, avec des racines latérales distribuées sur ce pivot tous les 16-20 cm. Pour chaque arbre, le diamètre de pivot était constant verticalement. Les racines latérales du premier plan ont été les plus grosses, les plus étendues et les plus ramifiées. Les racines latérales avaient une faible conicité dans les premiers 50 cm de longueur. Le diamètre des racines latérales diminue rapidement après une longueur de 50 cm.

Cette architecture pourrait être modifiée dans le temps. Notamment, avec la croissance et le développement des peupliers hybrides, la taille du pivot deviendra plus petite et le système racinaire aura tendance à adopter une architecture traçante, avec des racines latérales bien étendues. À maturité une plaque sol-racine peut se former. La plaque sol-racine est un paramètre et indicateur important de la stabilité des arbres qui ont une plaque sol-racine. À mesure que les arbres vieillissent, la taille du système racinaire devient nécessairement comparativement plus petite que la taille des parties aériennes (Ennos, 1993). Par conséquent, les arbres sont principalement ancrés par le poids de la plaque sol-racines (Achim et Nicoll, 2009 ; Lundström et al., 2007).

En effet, l'ancrage des arbres dans le sol évolue avec le temps. Notamment, les parties aériennes ainsi que le système racinaire des arbres se développent et deviennent plus complexes. Les racines deviennent plus longues et plus grosses et donc leur capacité de s'ancrer dans le sol augmente. Toutefois, peu d'informations sont disponibles sur les changements du système racinaire dans le temps. En effet, les études réalisées sur le système racinaire des arbres sont limitées généralement à un seul stade de développement. Dans la littérature, on trouve plus de données sur des espèces comme le pin maritime, qui est une espèce très étudiée par plusieurs chercheurs (Yang et al., 2018 ; Danquechin Dorval et al. 2016 ; Danjon et al., 2013 ; Danjon et al., 2005 ; Danjon et al. 1999).

En comparant les traitements, les systèmes racinaires des peupliers hybrides plantés dans les parcelles 2×2 m et 4x4 m sont composé de plusieurs grosses racines latérales ramifiées. Alors que les systèmes racinaires des peupliers hybrides dans les parcelles les plus densément plantées (1×1 m) avaient moins de racines, avec parfois une seule racine dominante d'un côté (absence de l'autre côté, asymétrie).

L'architecture racinaire observée dans la plantation 2 (chapitre 4) était similaire à celle observée dans la plantation 1. Ainsi, le type de matériel de plantation et la

qualité de sol n'ont pas influencé l'architecture racinaire des arbres plantés dans cette recherche. Toutefois, à long terme, le développement racinaire des arbres pourrait être affecté sur le sol minéral et affecter ainsi négativement la stabilité des arbres.

➤ Comparaison de l'effet de la compétition inter et intra-spécifique sur le développement racinaire

Au niveau racinaire, nos résultats montrent que les racines fines sont plus sensibles à la compétition que les racines grossières. En effet, des résultats semblables ont été obtenus au niveau de la réponse des racines fines à la contrainte hydrique générée par la compétition herbacée et la compétition intra-spécifique. Par contre, au niveau des racines grossières, la comparaison de la compétition inter et intra-spécifique révèle que l'effet de l'espacement entre les arbres sur la stabilité des arbres était plus important que celui de la compétition herbacée (tableau 7.1). Selon nos résultats, la compétition herbacée affecte certains traits morphologiques du système racinaire alors que la compétition entre les arbres affecte la taille et l'architecture du système racinaire. En effet, la biomasse racinaire n'était pas affectée par la compétition herbacée alors qu'elle était plus faible pour les peupliers dans les parcelles 1 × 1 m. Contrairement à la compétition intra-spécifique, la compétition herbacée a eu un effet limitatif sur le nombre de racines latérales grossières et le nombre des ramifications. De plus, contrairement à la compétition intra-spécifique, la présence des herbacées n'avait pas un grand effet sur la symétrie du système racinaire des arbres. La symétrie bilatérale du système racinaire peut avoir un grand effet sur la stabilité des arbres. Ainsi, en absence d'une racine principale d'un côté, la contrainte mécanique ne sera pas appliquée d'une façon homogène, ce qui augmente le risque d'arrachement et de rupture des racines (Danjon et Reubens, 2008 ; Coutts et al., 1999). L'effet différentiel de la compétition inter- versus intra-spécifique sur l'architecture racinaire pourrait être dû à la compétition pour la lumière qui s'ajoute à la compétition pour les ressources du sol dans les parcelles 1 × 1 m. Dans la

littérature, on trouve que pour des densités plus élevées, la croissance en hauteur est encouragée au détriment de la croissance en diamètre à cause de la compétition accrue pour la lumière (Benomar et al., 2012 ; Brodie et DeBell, 2004). Il apparaît que ça se fait également au détriment de la croissance au niveau racinaire, ce qui peut affecter à la fois la taille des racines et leur agencement dans l'espace comme le soulignent nos résultats. Toutefois, dans d'autres conditions environnementales (caractéristique du sol, climat, etc.) ou avec des plants de petite taille, la compétition herbacée pourrait avoir une influence plus élevée et affecter plus négativement la stabilité des arbres.

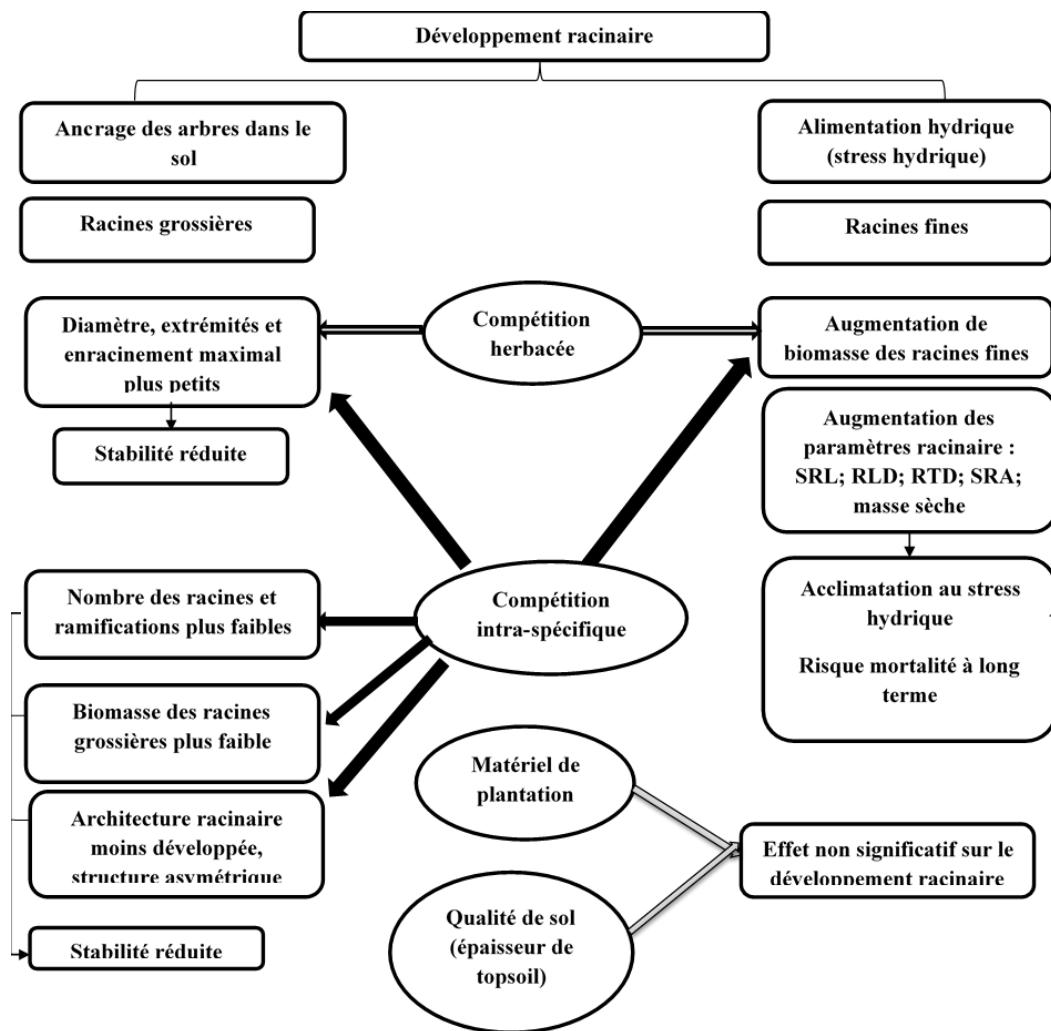


Figure 7.1 Effet des facteurs étudiés sur le développement racinaire des peupliers hybrides plantés sur des pentes de stériles miniers

Tableau 7.1 Comparaison de l'effet de la compétition inter et intra-spécifique sur l'architecture racinaire et la stabilité des peupliers hybrides

		Compétition intra-spécifique	Compétition herbacée
Paramètres affectés négativement (diminution)	Hauteur maximale		✓
	Diamètre basal	✓	✓
	Biomasse aérienne, Biomasse aérienne / Biomasse	✓	✓
	Densité racinaire, Impact racinaire	✓	✓
	Diamètre moyen des racines	✓	✓
	Enracinement maximal	✓	✓
	Nombre des extrémités des racines principales	✓	✓
	Indice d'ancrage racinaire	✓	✓
	Biomasse racinaire	✓	-
	Nombre total des racines	✓	-
	Nombre de ramifications	✓	-
	Symétrie du système racinaire	✓	-

7.2 Effet de la compétition sur l'exposition au stress hydrique des peupliers hybrides

➤ Niveau de stress hydrique et tolérance des peupliers hybrides

Le niveau de stress hydrique observé dans cette étude était inférieur aux seuils associés à une cavitation irréversible (Fichot et al., 2015). En effet, selon nos résultats (chapitre 3), les teneurs en eau volumique du sol superficiel étaient généralement supérieures au point de flétrissement permanent égal à 20 % (TEV varient entre 18 % et 38 %), sauf pour le traitement 1×1 m où ces teneurs ont été proches de 20 % certaines semaines. De plus, quel que soit le traitement, les valeurs du potentiel hydrique foliaire enregistrées dans notre étude étaient inférieures au seuil de stress hydrique rapporté par d'autres auteurs (Larchevêque et al., 2016 ; Barchet et al., 2014). Même si le stress hydrique survenu sur les pentes de stériles étudiées peut-être classé comme un stress hydrique modéré, la contrainte hydrique était suffisante pour induire des réponses chez les peupliers hybrides (figure 7.2). Il apparaît que l'utilisation d'une couche de 50 cm de sol superficiel a permis d'assurer une alimentation hydrique adéquate aux peupliers hybrides plantés. Grâce à leur texture granulométrie fine, les sols argileux de la ceinture d'argile du nord du Québec (territoire de l'Abitibi-Témiscamingue Nord-du-Québec) ont une grande capacité de rétention d'eau. Ils sont riches en nutriments (Rompré et Carrier, 1997). Toutefois, les résultats pourront différer en fonction du type de sol. On s'attendrait à avoir une contrainte plus sévère par exemple sur un sol sableux dont la capacité de rétention d'eau serait plus faible qu'un sol argileux.

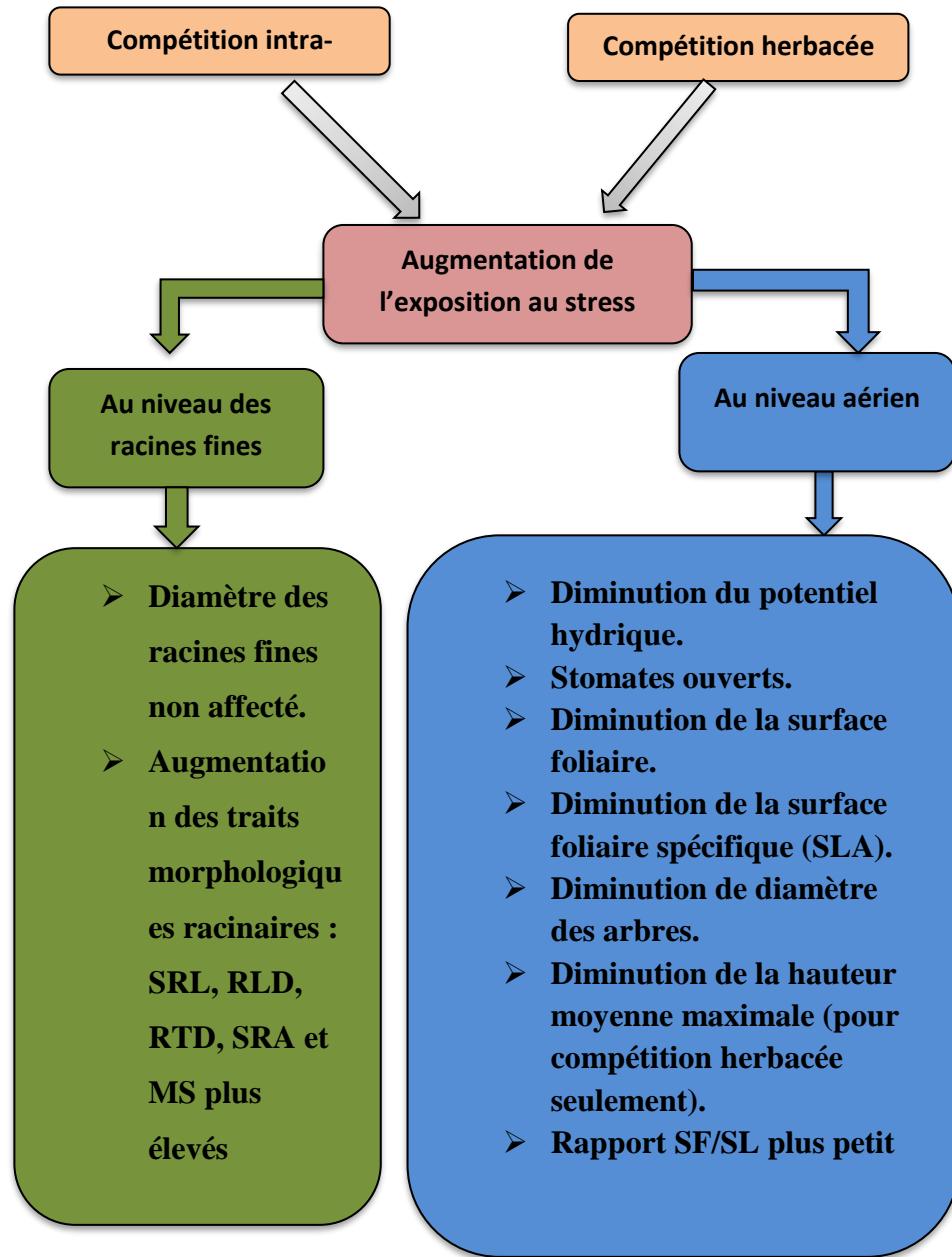


Figure 7.2 Réponse du peuplier au stress hydrique engendré par la compétition inter- et intra-spécifique

➤ Effet de la compétition sur l'exposition des peupliers hybrides au stress hydrique

Les peupliers hybrides de cette étude ont montré un comportement anisohydrique (Tardieu et Simonneau, 1998). En effet, les arbres plantés ont répondu à la contrainte hydrique générée par la compétition intra et interspécifique par une diminution de potentiel hydrique foliaire. De plus, les résultats du ratio isotopique ne montrent pas de différence significative en fonction du traitement. Il semble ainsi que les peupliers ont conservé leurs stomates ouverts même à faible potentiel hydrique. Ce comportement a été observé par d'autres auteurs chez le peuplier hybride (Zhang et al., 2020 ; Niemczyk et al., 2019 ; Larchevêque et al., 2016 ; Attia et al., 2015 ; Larchevêque et al., 2011). La stratégie anisohydrique est caractérisée par le maintien des échanges gazeux, en particulier du flux de vapeur d'eau et de CO₂ pour la fixation de carbone. Le maintien de la production primaire via la photosynthèse se reflète par une perte d'eau continue par transpiration alors que l'absorption d'eau au niveau des racines est de plus en plus difficile. Donc, le potentiel hydrique foliaire diminue au fur et à mesure que le stress hydrique s'intensifie. Cette stratégie peut apparaître favorable en conditions de contraintes hydriques modérées. Des chercheurs soutiennent en effet que dans ces conditions, un comportement anisohydrique est plus résistant (Zhang et al., 2020 ; McDowell et al. 2008). Mais en cas d'un déficit hydrique plus sévère et/ou plus durable, les plantes peuvent être exposées au risque de cavitation (potentiel hydrique de xylème très bas) et flétrissement par épuisement des réserves en eau du sol (McDowell et al., 2008). À l'inverse, d'autres chercheurs ont observé un comportement isohydrique dans lequel les peupliers hybrides ont fermé leurs stomates en réponse à la contrainte hydrique et conservent un potentiel hydrique foliaire stable (Zhang et al., 2020 ; Attia et al., 2015 ; Thérioux Rancourt et al., 2015 ; Barchet et al., 2014). Il s'agit d'une stratégie dite «économise en eau» qui présente l'avantage du maintien du statut hydrique

végétal et permet d'éviter ainsi des chutes de potentiel hydrique menant ultimement à la cavitation. Mais elle peut pénaliser la fixation de carbone, ce qui peut résulter en un arrêt complet de croissance (Amigues et al., 2006 ; McDowell et al., 2008).

La réponse des stomates aux conditions de stress hydrique dépend en premier lieu de l'espèce. D'autres facteurs influencent les stomates, notamment les concentrations des hormones comme l'acide abscissique (ABA) (Tardieu et Simonneau, 1998 ; Garcia-Fomer et al., 2016) et le déficit de pression de vapeur (Grossiord et al., 2020). En outre, dans la pratique, les plantes peuvent combiner plus qu'une stratégie pour faire face au manque de ressources en eau (Klein, 2014 ; Tardieu et Tuberosa, 2010 ; Chaves et al., 2003). Lorsque le stress hydrique est très sévère, la demande en eau augmente, et les plantes peuvent passer d'un comportement anisohydrique à isohydrique pour assurer une certaine sécurité hydrique de la plante (Zhang et al., 2020 ; Klein, 2014). Les peupliers hybrides peuvent avoir différentes stratégies sous différentes conditions environnementales. De plus, des différences existent non seulement entre les espèces, mais au sein d'une même espèce, c'est-à-dire pour des génotypes de peupliers différents (Zhang et al., 2020; Arshad et al., 2019; Larchevêque et al. 2011).

➤ Acclimatation des peupliers hybrides au stress hydrique

Malgré le milieu de plantation où l'alimentation en eau est limitée dans les traitements où la compétition était plus élevée, il n'y a pas eu de choc de plantation. Le taux élevé de survie après quatre saisons de croissance indique que le peuplier hybride testé montre une capacité élevée de s'acclimater sur les pentes de stériles miniers. Des taux de croissance similaires ou meilleurs par rapport à d'autres plantations de peuplier hybride dans des conditions boréales semblables ont été observés dans cette étude (Benomar et al., 2012 ; Larchevêque et al., 2011). Dans leur étude en Alberta, Niemczyk et al. (2019) ont comparé 45 clones de peuplier

hybride âgés de 10 ans et le même hybride que celui utilisé dans notre étude, soit *Populus balsamifera* × *Populus maximowiczii*, a montré la meilleure adaptation au stress hydrique. Même si les peupliers sont considérés parmi les plantes ligneuses les plus vulnérables à la sécheresse (Monclús et al., 2006 ; Nahar et al., 2015), plusieurs études ont montré que les peupliers présentent des adaptations pour tolérer le manque d'eau (Attia et al., 2015 ; Desrochers et al., 2007 ; Rood et al., 2003). Ainsi, les peupliers hybrides pourraient être bien adaptés à la revégétalisation des pentes de stériles miniers.

Le clone de peuplier hybride testé dans cette étude a pu s'acclimater aux conditions de contrainte hydrique. En effet, les plants ont répondu à la compétition accrue liée à un espacement plus serré ($1 \times 1\text{m}$) et à la présence d'un couvert herbacé dense par une augmentation de biomasse racinaire fine (Ostonen et al., 2007). Toutefois un investissement plus important dans le système racinaire a un coût au niveau de la croissance aérienne (Jones, 1993). Pour faire face au manque d'eau, les arbres utilisent un couplage de stratégies aériennes et racinaires. Les traits racinaires étudiés dans cette recherche (chapitre 3) montrent que les peupliers ont développé une stratégie d'acquisition des ressources en eau du sol en développant plus de longueur racinaire pour un même investissement en énergie (augmentation du SRL), ce qui permet d'avoir une plus grande surface d'échange racine-sol par unité de biomasse racinaire. Alors qu'au niveau aérien les arbres ont plutôt suivi une stratégie plus conservatrice des ressources en eau, avec des SLA plus faibles et une plus faible production de biomasse. Les traitements $1 \times 1\text{m}$ et $2 \times 2\text{ h m}$ avaient les SLA les plus faibles. Les modifications apportées à la SLA dans des conditions limitantes d'eau reflètent une sorte de modulation de la structure des feuilles. Il s'agit d'un mécanisme de résistance souvent utilisé par certains clones de peuplier, qui vise principalement à diminuer les pertes d'eau à travers la diminution de la surface foliaire exposée à la lumière et au CO₂ par unité de biomasse (Delmotte et Brignolas, 2003).

De plus, le rapport entre la surface foliaire totale et la longueur racinaire totale (LR/SF) plus élevé chez les arbres les plus stressés indique une augmentation de la capacité d'acquisition de l'eau tout en diminuant simultanément la perte d'eau par la transpiration. Ce qui est considéré par plusieurs auteurs comme un critère de résistance à la sécheresse. Par ailleurs, il y a d'autres mécanismes d'acclimatation identifiés dans la littérature et qui n'ont pas été évalués dans cette étude, notamment : abscission des feuilles, efficacité accrue de l'utilisation d'eau, ajustement stomatique (Larchevêque et al., 2011 ; Monclus et al., 2006). Avec le temps, la taille des arbres sera plus grande et donc les demandes en eau seront plus importantes. Ainsi, le stress hydrique serait probablement plus sévère dans les traitements où le niveau de compétition est élevé ($1\times 1\text{m}$ et $2\times 2\text{ h m}$), ce qui peut menacer la survie et le développement des peupliers hybrides plantés dans ces parcelles.

7.3 Effet des facteurs étudiés sur l'ancrage des arbres

La force maximale de résistance à l'arrachement a été observée pour les arbres du traitement $2\times 2\text{ m}$, dont les paramètres de l'architecture racinaire ont été optimaux pour assurer l'ancrage. Inversement, la force minimale a été notée dans les parcelles avec un espacement plus serré ($1\times 1\text{ m}$) et dont l'architecture racinaire était négativement affectée par la compétition entre les arbres. Nos résultats confirment d'autres études qui ont souligné le rôle majeur de l'architecture racinaire dans l'ancrage et la stabilité des arbres (Dupuy et al., 2005 ; Ennos, 2000 ; Stokes et al., 2000 ; Stokes et al., 1996). En effet l'agencement des racines dans l'espace constitue le principal facteur de la résistance à l'arrachement de l'arbre, en particulier pour les jeunes arbres. (Stokes et al., 1996).

En considérant trois types de matériel de plantation (racines nues, plançons et boutures), nous nous sommes basés sur le fait que la différence de taille de la tige ainsi que le rapport aérien/souterrain peuvent engendrer des effets différents au

niveau de la croissance, de la survie et de la stabilité des arbres. Nos hypothèses ont été rejetées puisqu'il n'y avait pas de différence entre les trois types de matériel de plantation pour les variables que nous avons évaluées dans cette étude (chapitre 5). La survie et la croissance des boutures et des plançons étaient aussi élevées que les plants à racines nues malgré le fait qu'ils doivent développer de nouvelles racines pour accéder aux ressources du sol. Les plants à racines nues ont déjà un système racinaire à la plantation et ont donc un accès rapide aux ressources en eau et en nutriments. Cependant, les racines des plants à racines nues pourraient avoir un mauvais contact avec le sol (Grossnickle, 2000). De plus, les plants à racines nues doivent supporter de grandes parties aériennes et doivent régénérer de nouvelles racines pour faciliter l'absorption d'eau et de nutriments. Les boutures et les plançons peuvent développer des racines à partir de leurs tiges lorsque les conditions sont appropriées (DeBell et Harrington, 1997 ; Hansen et al., 1993 ; Friend et al., 1991). D'autres études ont rapporté par contre des performances différentes entre les différents types de matériaux de plantations (Douglas et al., 2016 ; MacDonald et al. 2015 ; Thiffault, 2004 ; Newton et al., 1993). Duddles et Owston (1990) ont indiqué que le site a plus d'effet sur la croissance et la survie que le type de matériel de plantation.

D'après nos résultats sur l'effet de la qualité de sol (chapitre 5), il apparaît que l'augmentation de la quantité de sol superficiel n'a pas influencé la survie, ni la croissance et la stabilité des arbres. En effet, nos résultats ont indiqué qu'il n'y avait pas de différence significative entre les traitements sur la résistance maximale au déracinement, le nombre de racines latérales, le diamètre moyen des racines, la biomasse racinaire, la biomasse aérienne, le rapport tiges/racines, la hauteur maximale et le diamètre basal. Le développement des peupliers hybrides testés dans cette étude était équivalent sur 50 cm de topsoil et sur 40 cm de sol minéral combinés à seulement 10 cm de sol superficiel. Ces résultats pourraient être expliqués par l'amélioration de la qualité du sol minéral après les quatre années de plantation. En

particulier, l'implantation de plantes herbacées peut constituer une source de matière organique en fournissant de la litière (Zhou et al., 2008). Toutefois, à long terme et avec la croissance des arbres, les besoins en nutriments de ces derniers augmentent. Donc la qualité du sol minéral pourrait devenir limitante pour un développement racinaire adéquat.

Les tests d'arrachement sont très utilisés pour mesurer la résistance des arbres au déracinement/renversement (Stokes, 1999). Pour les essais d'arrachement trouvés dans la littérature, les chercheurs ont mis le point d'attachement en général au milieu de la tige de l'arbre (Coutts, 1983 ; Stokes, 1999). Ainsi, dans ces études il était souvent question d'analyser la stabilité et la résistance de l'arbre en entier vis-à-vis du vent. Dans ce cas, en appliquant une force d'arrachement latérale sur l'arbre, on peut avoir un bris au niveau de la tige de l'arbre, si la force nécessaire pour déraciner et arracher le système racinaire est supérieure à celle nécessaire pour casser la tige. De plus, ce type d'essai s'applique difficilement pour de jeunes arbres où la tige est souple et a tendance à plier plutôt que d'exercer une contrainte sur les racines. Dans notre étude, on s'intéressait davantage à caractériser l'ancrage de jeunes arbres à l'aide d'un essai où le cisaillement était la principale contrainte mécanique appliquée à l'arbre. Notre objectif n'était pas de reproduire l'effet du vent sur la stabilité des arbres. On voulait plutôt comparer la stabilité et l'ancrage des arbres de différents designs de plantation sur des pentes de stériles miniers pour sélectionner le/les agencements à prioriser pour la revégétalisation des pentes de stériles. Ainsi, pour les tests d'arrachement réalisés, le câble utilisé pour les essais de déracinement latéral a été attaché le plus bas possible de la tige, soit à la base de l'arbre. Par conséquent, la réponse obtenue correspond à la résistance maximale du système racinaire à une force de cisaillement.

Le vent peut affecter la structure et le fonctionnement des arbres (Gardiner et al. 2005; Hale et al. 2004 ; Nicoll et al. 1995). Le vent exerce des forces sur l'arbre dans

la partie aérienne et la taille de l'arbre influence la force imposée. En fait, la résistance d'un arbre aux dommages causés par le vent est contrôlée par les conditions environnementales, le système racinaire, la hauteur et le diamètre des peuplements d'arbres (Scott et Mitchell 2005 ; Hale et al. 2004 ; Coutts 1986). Selon, nos résultats portant sur l'évaluation de l'effet de la compétition (chapitre 4), les arbres dans les traitements qui avaient la force de résistance la plus élevée sont également caractérisés par les meilleures performances en termes de croissance aérienne. En effet, le diamètre basal, le DHP et les biomasses aériennes ont été plus faibles pour les parcelles avec un niveau plus élevé de compétition (1×1 et 2×2 h) par rapport aux deux autres traitements.

Plusieurs auteurs ont souligné l'effet positif que peuvent jouer les racines des arbres sur la stabilisation des ouvrages en pentes (Danjon et al., 2008 ; Reubens et al., 2007). Toutefois, le déracinement de l'arbre à cause du vent (chablis) peut avoir des effets très importants sur la stabilité de ces ouvrages (Zanetti et al., 2011). En effet, le développement des racines à l'intérieur de la pente peut entraîner une modification importante dans la structure de l'ouvrage en cas de chablis. Ces modifications vont dépendre de plusieurs facteurs, notamment, l'espèce, la disponibilité d'eau et le type d'architecture. Ainsi, il est primordial de tenir compte de l'ancrage des arbres au moment de la revégétalisation des pentes de stériles miniers.

CHAPITRE 8

CONCLUSIONS RECOMMANDATIONS ET PERSPECTIVES

8.1 Principaux résultats et contributions de l'étude

Le développement racinaire est un élément peu étudié et considéré lors de la revégétalisation des sites miniers. Ainsi, en examinant l'effet de certains facteurs importants à considérer lors de la revégétalisation, cette recherche peut aider à sélectionner le meilleur design pour une plantation avec des arbres sur des pentes de stériles miniers en assurant la survie et la croissance des arbres ainsi que leur stabilité (figure 8.1).

Deux plantations de peuplier hybride ont fait l'objet de cette recherche.

- Plantation 1 (chapitres 4 et 5) : où on a évalué l'effet de deux types de compétition (intra et inter-spécifique) sur le système racinaire du peuplier hybride, incluant des investigations sur racines fines (après trois ans de plantations) et sur racines grossières (après quatre ans de plantation), dans des plantations à partir de plançons, sur 50 cm de sol superficiel recouvrant des pentes de roches stériles de 33 % en zone boréale.
- Plantation 2 (chapitre 6) : où on a étudié le système racinaire structurel de différents matériels de plantation de peuplier hybride (plants à racines nues, plançons et boutures) sur deux sols de qualité différente (sol 1 : 50 cm de sol superficiel; sol 2 : 10 de sol superficiel+40 de sol minéral).

Cette recherche met en évidence la possibilité d'utiliser le peuplier hybride, une plante à croissance rapide, pour la revégétalisation des sites miniers. La survie des deux clones de peupliers hybrides plantés dans les deux plantations était élevée pour tous les traitements. De plus, le clone utilisé dans la plantation 1 a montré une acclimatation aux conditions des pentes de stérile exposées au manque d'eau.

À long terme, les peupliers seront probablement remplacés naturellement par des arbres indigènes de la région. De ce fait, il serait important de considérer cela dans la stratégie de revégétalisation et restauration du site minier pour s'assurer de la stabilité des ouvrages à long terme, les peupliers seront probablement remplacés naturellement par des arbres indigènes de la région. De ce fait, il serait important de considérer cela dans la stratégie de revégétalisation et restauration du site minier pour s'assurer de la stabilité des ouvrages à long terme. Bien que le transfert des résultats à d'autres sites miniers doive être fait avec précaution, les résultats seront probablement applicables pour des régions avec un climat et des caractéristiques édaphiques semblables.

Chapitre 4

Les résultats de ce chapitre ont servi à relever les conséquences de la diminution de l'espacement entre les arbres et de la compétition herbacée sur l'exposition au stress hydrique des peupliers hybrides plantés.

Les peupliers hybrides testés dans ce projet de recherche se sont acclimatés aux conditions de stress hydrique en investissant dans le développement des racines fines. Notamment, les traitements avec un niveau élevé de compétition 1x1 et 2x2 m ont augmenté leur longueur racinaire par volume de sol et leur longueur par unité de masse racinaire.

Au niveau aérien, la réponse des arbres plantés à l'intensification de la compétition résultant de la diminution de l'espacement (1x1) et de l'ensemencement herbacé

(2x2h) a été caractérisée par une diminution de potentiel hydrique foliaire et de surface foliaire, ainsi qu'une diminution de l'investissement dans la croissance en diamètre et en hauteur des peupliers hybrides.

Les deux espacements de 2x2 et 4x 4 m entre les arbres ont permis d'avoir une croissance plus équilibrée entre les parties aériennes et souterraines et sont donc recommandés pour la revégétalisation des pentes de stériles miniers avec des peupliers.

Chapitre 5

Ce chapitre présente l'effet de la compétition herbacée et de la compétition intra-spécifique sur le développement racinaire des peupliers hybrides ainsi que leur ancrage dans le sol. Les résultats de cette section rejoignent ceux d'autres chercheurs qui soulignent le rôle important de l'architecture dans la stabilité des arbres. La compétition a affecté négativement le développement racinaire et donc la stabilité des arbres plantés.

La résistance maximale à la force de déracinement a été observée pour le traitement de 2×2 m. Les deux indices de stabilité calculés dans cette recherche étaient plus élevés pour les traitements 2×2 m et 4×4 m par rapport aux deux autres traitements. De plus, les traitements 2×2 m et 4×4 m, sans ensemencement herbacé sont caractérisés par une architecture qui permet d'avoir un meilleur ancrage des arbres dans le sol et seraient donc à privilégier pour la revégétalisation des pentes de stériles miniers. Dans ce chapitre, nos hypothèses formulées au départ dans cette recherche par rapport à l'effet du type de matériel de plantation et de la qualité du sol ont été rejetées. En effet, les résultats n'ont pas révélé de différence significative entre les traitements pour les différentes variables évaluées, notamment, la résistance maximale au déracinement, le nombre de racines latérales, le diamètre moyen des racines, la biomasse racinaire, la biomasse aérienne, le rapport de biomasse

aérienne/souterraine, la hauteur maximale et le diamètre basal. De plus, après quatre saisons de croissance, l'architecture des peupliers hybrides plantés n'était pas affectée ni par la qualité de sol ni par le matériel de plantation.

La disponibilité du sol superficiel pour la revégétalisation constitue un grand défi pour les compagnies minières. Les travaux effectués dans cette étude ont démontré qu'il est possible de valoriser le mort-terrain minéral pour planter des arbres et ne pas se limiter uniquement au sol superficiel. Ainsi, selon les résultats de cette recherche, Il n'y avait pas de différence significative entre les peupliers hybrides plantés sur une couche arable de 50 cm ou sur un sol avec 10 cm de terre végétale et 40 cm de sol minéral en termes de survie, de croissance, de développement racinaire et de stabilité des arbres. Donc une plus petite quantité de sols superficiels pourrait être utilisée pour la revégétalisation du site.

Les résultats ont également permis de vérifier l'efficacité de l'utilisation de boutures de 50 cm de long, qui sont moins chères, par rapport à des plançons plus longs et des plants à racines nues.

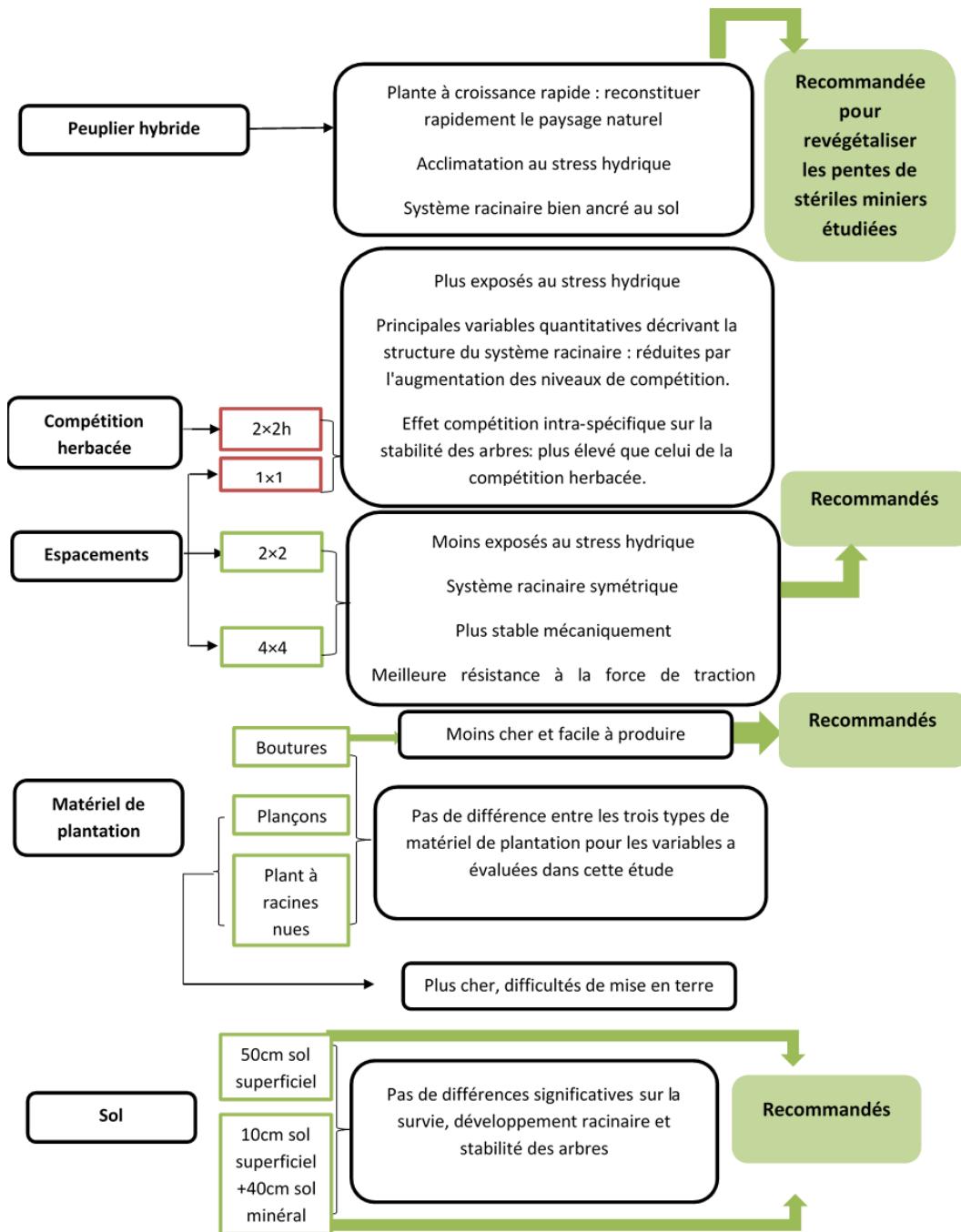


Figure 8.1 Sommaire des résultats de l'étude

8.2 Limites de l'étude et recommandations

Une des limites de cette étude et de me pas pouvoir suivre le développement des arbres à long terme et d'arrêter le suivi à la quatrième saison de croissance à cause de la contrainte de temps. Notamment il serait utile de suivre la réaction des arbres avec le temps et voir si les résultats seront maintenus. À long terme, le niveau de compétition pourra être plus élevé dans les traitements où la compétition était plus importante, soit le 1x1m et 2x2h m, ce qui pourra affecter négativement la pérennité des arbres à cause de l'augmentation des besoins pour les ressources en eau et nutriments avec l'augmentation de taille des arbres.

Une autre limite est qu'on n'a pas pu évaluer l'effet des facteurs étudiés (Compétition, matériel de plantation et qualité de sol) sur plus qu'une seule espèce. Toutefois, les peupliers hybrides peuvent être utilisés comme plantes modèles pour étudier l'implantation des arbres sur les rejets miniers.

De plus, mis à part les suivis de croissance et survie, où tous les arbres plantés ont été considérés, les arbres échantillonnés pour les différents suivis ont été dans un seul endroit de la pente, soit en bas de la pente pour les tests d'arrachement et les tranchées d'observation ou au milieu de la pente pour le reste. Il serait plus intéressant de prendre des échantillons à la fois au milieu, en haut et en bas de la pente. Le stress hydrique serait par exemple plus sévère en haut de la pente et l'inverse en bas de la pente et donc l'effet de la compétition sur l'exposition des arbres à la contrainte hydrique pourrait être différente. De plus la symétrie bilatérale du système racinaire ne sera probablement pas la même pour des arbres échantillonnés au centre versus ceux échantillonnés en bas et haut de la pente. En effet, la symétrie du système racinaire est affectée par la disponibilité des ressources en eau et nutriments. Ainsi, le système racinaire est généralement asymétrique en haut et en bas de la pente.

Finalement, les arbres utilisés dans les dispositifs expérimentaux de cette thèse sont des peupliers hybrides semi-exotiques. Le peuplier hybride est un objet d'étude intéressant pour des expériences car il peut être considéré comme une plante modèle qui réagit de manière très sensible aux variations de niveaux de ressources dans son environnement. C'est aussi une plante qui se bouture et dont on peut établir des plantations clonales qui répondent de manière homogène à des variations de niveaux de facteurs. Mais la végétalisation des sites miniers à grande échelle devrait se faire avec des essences indigènes.

Des recherches supplémentaires seraient nécessaires pour avoir plus d'informations sur certains aspects soulevés par ce projet. Ci-dessous quelques recommandations pour des recherches futures :

- L'étude de l'architecture et de la distribution racinaire d'autres espèces plantées dans des sites miniers est essentielles pour apporter les connaissances nécessaires à l'élaboration d'un design de revégétalisation des pentes de stériles miniers. En particulier, l'étude d'espèces indigènes (Par ex. l'épinette noire (*Picea mariana*), le peuplier faux-tremble (*Populus tremuloïdes*), le pin gris (*Pinus banksiana*)) permettrait d'anticiper l'installation possible de ces espèces par la colonisation naturelle.
- Il est également recommandé de tester dans des recherches futures d'autres types de sol superficiel afin de voir l'influence de ce facteur sur la tolérance des arbres à une contrainte hydrique liée à la pente et à la nature des stériles, et aussi sur l'architecture racinaire et la stabilité des arbres. Notamment, sur un sol sableux avec peu de matière organique, l'effet de la compétition pourra affecter plus le développement racinaire et donc l'ancre des arbres plantés. De plus, l'intensité de stress hydrique serait probablement plus élevée ce qui peut menacer la survie et la croissance des arbres.

- Cette étude a porté sur de jeunes arbres et par contrainte de temps il est difficile de suivre les arbres jusqu'à maturité. Il y a un manque de connaissances sur les facteurs qui influencent l'architecture racinaire des arbres de la forêt boréale et leur stabilité dans les pentes. IL serait nécessaire d'aller chercher ces connaissances pour pouvoir mettre en perspective les résultats obtenus en contexte de pentes de stériles minières. La comparaison de telles études avec les résultats obtenus dans cette recherche permettra de simuler et d'approcher des résultats à long terme. De plus, ce type d'information serait utile pour déterminer l'effet de l'espèce et de l'âge sur le développement racinaire.
- L'utilisation d'autres techniques d'analyse architecturales automatique du système racinaire (Reubens et al., 2007; Drénou, 2006) devrait être envisagée afin d'améliorer notre compréhension de l'architecture racinaire et son rôle dans la stabilité des arbres. Une autre étape qui permettrait de mieux compléter notre étude serait de faire une modélisation du développement de l'architecture racinaire (Dupuy, 2003) des peupliers hybrides dans le temps pour voir comment les arbres dans les différents traitements testés vont réagir à long terme en termes d'ancrage des arbres dans le sol.
- On a observé un développement des racines jusqu'au stériles miniers dans cette étude. Toutefois on n'a pas pu vérifier si cela peut contribuer à la stabilisation ou non de la couverture de sol par-dessus. La stabilité du sol devrait peut-être étudiée de manière complémentaire à celle des arbres.
- Enfin, il serait intéressant de comparer l'effet des facteurs étudiés sur la pente de dans notre étude (33%) avec d'autres pentes plus et/ou moins abrupte. Les

pentes naturelles des haldes à stériles sont plus élevées que celle testé dans ce projet. En effet, le drainage d'eau serait plus important sur une plus forte pente ce qui peut affecter l'alimentation hydrique des arbres, leur survie et le développement des racines.

BIBLIOGRAPHIE

- Achim, A., & Nicoll, B. C. (2009). Modelling the anchorage of shallow-rooted trees. *Forestry*, 82(3), 273-284.
- Agriculture and Agri-Food Canada. (1998). The Canadian system of soil classification, 3rd ed. <http://sis.agr.gc.ca/cansis/taxa/cssc3/index.html> [accessed 29 Oct. 2018].
- Agriculture and Agri-Food Canada. (2014). Length of Growing Season in Quebec, Baseline: 1971-2000. [http://www.agr.gc.ca/eng/science-and-innovation/agricultural-practices/climate/future-outlook/climate-change-scenarios/length-of-growingseason-in-quebec/?id=1363104198111](http://www.agr.gc.ca/eng/science-and-innovation/agricultural-practices/climate/future-outlook/climate-change-scenarios/length-of-growing-season-in-quebec/?id=1363104198111) [accessed 05 December 2019].
- Akburak, S. (2020). Variations of element concentrations in roots of different tree species. *Cerne*, 26, 118-129.
- Almeida-Rodriguez, A. M., Cooke, J. E., Yeh, F., & Zwiazek, J. J. (2010). Functional characterization of drought-responsive aquaporins in *Populus balsamifera* and *Populus simonii* × *balsamifera* clones with different drought resistance strategies. *Physiologia Plantarum*, 140(4), 321-333.
- Amichev, B. Y., Johnston, M., & Van Rees, K. C. (2010). Hybrid poplar growth in bioenergy production systems: biomass prediction with a simple process-based model (3PG). *Biomass and Bioenergy*, 34(5), 687-702.
- Amigues J. P., Debaeke P., Itier B., Lemaire G., Seguin B., Tardieu F., Thomas A. (2006). Adapter l'agriculture à un risque accru de manque d'eau [Adapting agriculture to a higher risk of water shortage]. Synthesis report, France: INRA. p. 72
- Amlin, N. M., & Rood, S. B. (2003). Drought stress and recovery of riparian cottonwoods due to water table alteration along Willow Creek, Alberta. *Trees*, 17(4), 351-358.

- Angstmann, J. L., Ewers, B. E., & Kwon, H. (2012). Size-mediated tree transpiration along soil drainage gradients in a boreal black spruce forest wildfire chronosequence. *Tree Physiology*, 32(5), 599-611.
- Arango-Velez, A., González, L. M. G., Meents, M. J., El Kayal, W., Cooke, B. J., Linsky, J., & Cooke, J. E. (2014). Influence of water deficit on the molecular responses of *Pinus contorta* × *Pinus banksiana* mature trees to infection by the mountain pine beetle fungal associate, *Grosmannia clavigera*. *Tree Physiology*, 34(11), 1220-1239.
- Arango-Velez, A., Zwiazek, J. J., Thomas, B. R., & Tyree, M. T. (2011). Stomatal factors and vulnerability of stem xylem to cavitation in poplars. *Physiologia Plantarum*, 143(2), 154-165.
- Archer, J., & Smith, P. (1972). The relation between bulk density, available water capacity, and air capacity of soils. *Journal of Soil Science*, 23(4), 475-480.
- Arshad, M., Biswas, K., Bisgrove, S., Schroeder, W., Thomas, B., Mansfield, S., Plant, A. (2019). Differences in drought resistance in nine North American hybrid poplars. *Trees*, 33(4), 1111-1128.
- Asensio, V., Vega, F. A., Andrade, L., & Covelo, E. F. (2011). Tree vegetation to improve physico-chemical properties in bare mine soils. *Fresenius Environmental Bulletin*, 20(12a), 3295-3303.
- Association minière du Canada. (2020). Initiative Vers le développement minier durable. <https://mining.ca/fr/vers-le-developpement-minier-durable/>
- Ashby, W. C. (1997). Soil ripping and herbicides enhance tree and shrub restoration on stripmines. *Restoration Ecology*, 5(2), 169-177.
- Atger, C., & Edelin, C. (1994). Stratégies d'occupation du milieu souterrain par les systèmes racinaires des arbres. *Revue d'Ecologie la Terre et la Vie*, 49(4), 343-356.
- Attia, Z., Domec, J.-C., Oren, R., Way, D. A., & Moshelion, M. (2015). Growth and physiological responses of isohydric and anisohydric poplars to drought. *Journal of Experimental Botany*, 66(14), 4373-4381.

- Aubertin, M., Bussière, B., & Bernier, L. (2002). Environnement et gestion des résidus miniers. *Presses Internationales de Polytechnique, Corporation de l'École Polytechnique de Montréal, Montréal*.
- Aubrey, D. P., & Teskey, R. O. (2018). Stored root carbohydrates can maintain root respiration for extended periods. *New Phytologist*, 218(1), 142-152.
- Babi, K., Guittonny, M., Larocque, G. R., & Bussière, B. (2019). Effects of spacing and herbaceous hydroseeding on water stress exposure and root development of poplars planted in soil-covered waste rock slopes. *Ecoscience*, 26(2), 149-163.
- Baddeley, J. A., & Watson, C. A. (2005). Influences of root diameter, tree age, soil depth and season on fine root survivorship in *Prunus avium*. *Plant and Soil*, 276(1), 15-22.
- Bailey, P. H., Currey, J., & Fitter, A. (2002). The role of root system architecture and root hairs in promoting anchorage against uprooting forces in *Allium cepa* and root mutants of *Arabidopsis thaliana*. *Journal of Experimental Botany*, 53(367), 333-340.
- Bakker, M. R., Turpault, M. P., Huet, S., & Nys, C. (2008). Root distribution of *Fagus sylvatica* in a chronosequence in western France. *Journal of Forest Research*, 13(3), 176-184.
- Balandier, P., Collet, C., Miller, J. H., Reynolds, P., & Zedaker, S. (2006). Designing forest vegetation management strategies based on the mechanisms and dynamics of crop tree competition by neighbouring vegetation. *Forestry*, 79(1), 3-27.
- Balleux, P., & Van Lerberghe, P. (2001). *Boisement des terres agricoles: guide technique*: Forêt privée française.
- Barchet, G. L., Dauwe, R., Guy, R. D., Schroeder, W. R., Soolanayakanahally, R. Y., Campbell, M. M., & Mansfield, S. D. (2014). Investigating the drought-stress response of hybrid poplar genotypes by metabolite profiling. *Tree Physiology*, 34(11), 1203-1219.
- Barigah, T., Saugier, B., Mousseau, M., Guittet, J., & Ceulemans, R. (1994). *Photosynthesis, leaf area and productivity of 5 poplar clones during their establishment year*. Paper presented at the Annales des sciences forestières.

- Bassman, J. H., & Zwier, J. C. (1991). Gas exchange characteristics of *Populus trichocarpa*, *Populus deltoides* and *Populus trichocarpa* × *P. deltoides* clones. *Tree Physiology*, 8(2), 145-159.
- Bauhus, J., & Messier, C. (1999). Soil exploitation strategies of fine roots in different tree species of the southern boreal forest of eastern Canada. *Canadian Journal of Forest Research*, 29(2), 260-273.
- Beaulieu, M., & contaminés, Q. S. d. l. (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.
- Bell, H. L., Dawson, C.J., Wright, C.J. (1991). Tree stability. In Hodge: Research for practical arboriculture, York, 2-4 April 1990.
- Bengough, A. G., McKenzie, B., Hallett, P., & Valentine, T. (2011). Root elongation, water stress, and mechanical impedance: a review of limiting stresses and beneficial root tip traits. *Journal of Experimental Botany*, 62(1), 59-68.
- Beniken, L., Beqqali, M., Dahan, R., Benkirane, R., Omari, F. E., Benazouz, A., Gaboun, F. (2011). Évaluation de la résistance de dix porte-greffes d'agrumes résistants à la tristeza vis-à-vis du déficit hydrique. *Fruits*, 66(6), 373-384.
- Benomar, L., DesRochers, A., & Larocque, G. R. (2012). The effects of spacing on growth, morphology and biomass production and allocation in two hybrid poplar clones growing in the boreal region of Canada. *Trees*, 26(3), 939-949.
- Ben-Yehoshua, S., & Rodov, V. (2002). Transpiration and water stress. In *Postharvest physiology and pathology of vegetables* (pp. 143-197): CRC Press.
- Benzaazoua, M., Bussière, B., Demers, I., Plante, B., Pepin, G., Aubertin, M., . . . Lessard, G. (2013). Comportement géochimique et hydrogéologique des stériles de la mine Lac Tio. *Déchets Sciences et Techniques*, 64, 14-23.
- Berhongaray, G., King, J., Janssens, I., & Ceulemans, R. (2013). An optimized fine root sampling methodology balancing accuracy and time investment. *Plant and Soil*, 366(1), 351-361.

- Bischetti, G. B., Chiaradia, E. A., Simonato, T., Speziali, B., Vitali, B., Vullo, P., & Zocco, A. (2007). Root strength and root area ratio of forest species in Lombardy (Northern Italy). In *Eco-and Ground Bio-Engineering: The use of vegetation to improve slope stability* (pp. 31-41): Springer.
- Blackwell, P. G., Rennolls, K., & Coutts, M. P. (1990). A root anchorage model for shallowly rooted Sitka spruce. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 63(1), 73-91.
- Blevins, D. P., Prescott, C. E., Allen, H. L., & Newsome, T. A. (2005). The effects of nutrition and density on growth, foliage biomass, and growth efficiency of high-density fire-origin lodgepole pine in central British Columbia. *Canadian Journal of Forest Research*, 35(12), 2851-2859.
- Block, R. M., Knight, J. D., Booth, N. W., & Van Rees, K. C. (2009). Nursery stock type, nitrogen fertilization and shoot pruning effects on the growth of juvenile hybrid poplar in Saskatchewan. *Canadian Journal of Plant Science*, 89(2), 289-301.
- Bockstette, S. Roots in reconstructed soils-how land reclamation practices affect the development of tree root systems. (2018). PhD thesis, Department of Renewable Energy, University of Alberta, Canada, 108 pp.
- Bockstette, S. W., Pinno, B. D., Dyck, M. F., & Landhäusser, S. M. (2017). Root competition, not soil compaction, restricts access to soil resources for aspen on a reclaimed mine soil. *Botany*, 95(7), 685-695.
- Böhm, W. (1979). Root Ecology and Root Physiology. In *Methods of Studying Root Systems* (pp. 1-1): Springer.
- Böhm, W. (2012). *Methods of studying root systems* (Vol. 33): Springer Science & Business Media.
- Bouchard, H., Guittionny, M., & Brais, S. (2018). Early recruitment of boreal forest trees in hybrid poplar plantations of different densities on mine waste rock slopes. *Forest Ecology and Management*, 429, 520-533.
- Bouyoucos, G. J. (1962). Hydrometer method improved for making particle size analyses of soils 1. *Agronomy Journal*, 54(5), 464-465.

- Boyter, M., Brummer, J., & Leininger, W. (2009). Growth and metal accumulation of Geyer and mountain willow grown in topsoil versus amended mine tailings. *Water, Air, and Soil Pollution*, 198(1), 17-29.
- Bradshaw, A., & Johnson, M. (1992). *Revegetation of metalliferous mine waste: the range of practical techniques used in Western Europe*. Paper presented at the International conference Minerals, metals and the environment.
- Brignolas, F., Thierry, C., Guerrier, G., & Boudouresque, É. (2000). Compared water deficit response of two *Populus x euramericana* clones, *Luisa Avanzo* and *Dorskamp*. *Annals of Forest Science*, 57(3), 261-266.
- Brodie, C., & Debelle, D. (2004). Evaluation of field performance of poplar clones using selected competition indices. *New Forests*. 27, 201–214.
- Burger, J., Zipper, C. (2002). How to restore forests on surface mined land. *Virginia Cooperative Extension Publication*, 4(60), 1-23. Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg.
- Burton, A. J., Zogg, G. P., Pregitzer, K. S., & Zak, D. R. (1997). Effect of measurement CO₂ concentration on sugar maple root respiration. *Tree Physiology*, 17(7), 421-427.
- Bussière, B. (2010). Acid mine drainage from abandoned mine sites: problematic and reclamation approaches. In *Advances in Environmental Geotechnics* (pp. 111-125): Springer.
- Bussière, B., & Guittionny, M. (2020). *Hard Rock Mine Reclamation: From Prediction to Management of Acid Mine Drainage*: CRC Press.
- Bussotti, F., Pollastrini, M., Holland, V., & Brueggemann, W. (2015). Functional traits and adaptive capacity of European forests to climate change. *Environmental and Experimental Botany*, 111, 91-113.
- Calvaruso, C., Kirchen, G., Saint-André, L., Redon, P.-O., & Turpault, M.-P. (2017). Relationship between soil nutritive resources and the growth and mineral nutrition of a beech (*Fagus sylvatica*) stand along a soil sequence. *Catena*, 155, 156-169.

- Campbell, C., Mackie-Dawson, L., Reid, E., Pratt, S., Duff, E., & Buckland, S. (1994). Manual recording of minirhizotron data and its application to study the effect of herbicide and nitrogen fertiliser on tree and pasture root growth in a silvopastoral system. *Agroforestry Systems*, 26(2), 75-87.
- Canada Government. (2017). Canadian climate normals 1981–2010 station data. https://climate.weather.gc.ca/climate_normals/results_1981_2010_e.html?stnID=5720&lang=f&dCode=5&dispBack=1 (accessed 05 December 2019).
- Canadian Agricultural Services Coordinating Committee. Soil Classification Working Group, Soil Classification Working Group, National Research Council Canada, Canada. Agriculture, & Agri-Food Canada. Research Branch. (1998). The Canadian system of soil classification (No. 1646). NRC Research Press.
- Carroll, C., Merton, L., & Burger, P. (2000). Impact of vegetative cover and slope on runoff, erosion, and water quality for field plots on a range of soil and spoil materials on central Queensland coal mines. *Soil Research*, 38(2), 313-328.
- Casselman, C. N., Fox, T. R., Burger, J. A., Jones, A. T., & Galbraith, J. M. (2006). Effects of silvicultural treatments on survival and growth of trees planted on reclaimed mine lands in the Appalachians. *Forest Ecology and Management*, 223(1-3), 403-414.
- Celik, I., Ortas, I., & Kilic, S. (2004). Effects of compost, mycorrhiza, manure and fertilizer on some physical properties of a Chromoxerert soil. *Soil and Tillage Research*, 78(1), 59-67.
- Cervera, M. T., Storme, V., Soto, A., Ivens, B., Van Montagu, M., Rajora, O., & Boerjan, W. (2005). Intraspecific and interspecific genetic and phylogenetic relationships in the genus *Populus* based on AFLP markers. *Theoretical and Applied Genetics*, 111(7), 1440-1456.
- Ceulemans, R., Impens, I., & Steenackers, V. (1988). Genetic variation in aspects of leaf growth of *Populus* clones, using the leaf plastochron index. *Canadian Journal of Forest Research*, 18(8), 1069-1077.
- Charnet, F. (2003). L'enracinement des arbres et les propriétés physiques des sols. *Forêt-Entreprise*, 154, 37-43.

- Chaves, M. M. Maroco, JP, Pereira, jS. (2003). Understanding plant responses to drought-from genes to the whole plants. *Functional Plant Biology*, 30, 239-264.
- Chen, S., Wang, S., Altman, A., & Hüttermann, A. (1997). Genotypic variation in drought tolerance of poplar in relation to abscisic acid. *Tree Physiology*, 17(12), 797-803.
- Cheng, Y., Han, Y., Wang, Q., & Wang, Z. (2006). Seasonal dynamics of fine root biomass, root length density, specific root length, and soil resource availability in a Larix gmelinii plantation. *Frontiers of Biology in China*, 1(3), 310-317.
- Christersson, L. (2010). Wood production potential in poplar plantations in Sweden. *Biomass and Bioenergy*, 34(9), 1289-1299.
- Clark Ashby, W. (1995). Hybrid *Populus* in reclamation. *International Journal of Surface Mining and Reclamation*, 9(2), 69-71.
- Cochavi, A., Cohen, I. H., & Rachmilevitch, S. (2020). The role of different root orders in nutrient uptake. *Environmental and Experimental Botany*, 179, 104212.
- Coleman, M., Tolsted, D., Nichols, T., Johnson, W. D., Wene, E. G., & Houghtaling, T. (2006). Post-establishment fertilization of Minnesota hybrid poplar plantations. *Biomass and Bioenergy*, 30(8-9), 740-749.
- Coll, L., Messier, C., Delagrange, S., & Berninger, F. (2007). Growth, allocation and leaf gas exchanges of hybrid poplar plants in their establishment phase on previously forested sites: effect of different vegetation management techniques. *Annals of Forest Science*, 64(3), 275-285.
- Comas, L., Becker, S., Cruz, V. M. V., Byrne, P. F., & Dierig, D. A. (2013). Root traits contributing to plant productivity under drought. *Frontiers in Plant Science*, 4, 442.
- Condit, R., Hubbell, S. P., & Foster, R. B. (1995). Mortality rates of 205 neotropical tree and shrub species and the impact of a severe drought. *Ecological Monographs*, 65(4), 419-439.

- Conesa, M., De La Rosa, J., Domingo, R., Banon, S., & Pérez-Pastor, A. (2016). Changes induced by water stress on water relations, stomatal behaviour and morphology of table grapes (cv. Crimson Seedless) grown in pots. *Scientia Horticulturae*, 202, 9-16.
- Cooke, J., & Johnson, M. (2002). Ecological restoration of land with particular reference to the mining of metals and industrial minerals: A review of theory and practice. *Environmental Reviews*, 10(1), 41-71.
- Coutts, M. (1983). Development of the structural root system of Sitka spruce. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 56(1), 1-16.
- Coutts, M. (1986). Components of tree stability in Sitka spruce on peaty gley soil. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 59(2), 173-197.
- Coutts, M., Nielsen, C., & Nicoll, B. (1999). The development of symmetry, rigidity and anchorage in the structural root system of conifers. *Plant and Soil*, 217(1), 1-15.
- Coutts, M., Walker, C., & Burnand, A. (1990). Effects of establishment method on root form of lodgepole pine and Sitka spruce and on the production of adventitious roots. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 63(2), 143-159.
- Craine, J. M. (2006). Competition for nutrients and optimal root allocation. *Plant and Soil*, 285(1), 171-185.
- Craufurd, P., Wheeler, T., Ellis, R., Summerfield, R., & Williams, J. (1999). Effect of temperature and water deficit on water-use efficiency, carbon isotope discrimination, and specific leaf area in peanut. *Crop Science*, 39(1), 136-142.
- CROOK, M. J., & Ennos, A. (1993). The mechanics of root lodging in winter wheat, *Triticum aestivum L.* *Journal of Experimental Botany*, 44(7), 1219-1224.
- Crow, P., & Houston, T. (2004). The influence of soil and coppice cycle on the rooting habit of short rotation poplar and willow coppice. *Biomass and Bioenergy*, 26(6), 497-505.

- Curt, T., Bouchaud, M., Lucot, E., Bardouillet, C., & Bouquet, F. (1998). Influence des conditions géopédologiques sur le système racinaire et la croissance en hauteur du Douglas dans les monts du Beaujolais. *Ingénieries EauAgriculture Territoires*, (16), p-29.
- Curt, T., Lucot, E., & Bouchaud, M. (2001). Douglas-fir root biomass and rooting profile in relation to soils in a mid-elevation area (Beaujolais Mounts, France). *Plant and Soil*, 233(1), 109-125.
- Czapowskyj, M. M. (1978). *Hybrid poplar on two anthracite coal-mine spoils: 10-year results* (Vol. 267): Department of Agriculture, Forest Service, Northeastern Forest Experiment.
- Daft, M., Clelland, D., & Gardner, I. C. (1985). Symbiosis with endomycorrhizas and nitrogen-fixing organisms. *Proceedings of the Royal Society of Edinburgh, Section B: Biological Sciences*, 85(3-4), 283-298.
- Danjon, F., Bert, D., Godin, C., & Trichet, P. (1999). Structural root architecture of 5-year-old *Pinus pinaster* measured by 3D digitising and analysed with AMAPmod. *Plant and Soil*, 217(1), 49-63.
- Danjon, F., & Fourcaud, T. (2009). L'arbre et son enracinement. *Innovations Agronomiques*, 6, 17-37.
- Danjon, F., Fourcaud, T., & Bert, D. (2005). Root architecture and wind-firmness of mature *Pinus pinaster*. *New Phytologist*, 168(2), 387-400.
- Danjon, F., & Reubens, B. (2008). Assessing and analyzing 3D architecture of woody root systems, a review of methods and applications in tree and soil stability, resource acquisition and allocation. *Plant and Soil*, 303(1), 1-34.
- Danjon, F., Sinoquet, H., Godin, C., Colin, F., & Drechsler, M. (1999). Characterisation of structural tree root architecture using 3D digitising and AMAPmod software. *Plant and Soil*, 211(2), 241-258.
- Danquechin Dorval, A., Meredieu, C., & Danjon, F. (2016). Anchorage failure of young trees in sandy soils is prevented by a rigid central part of the root system with various designs. *Annals of Botany*, 118(4), 747-762.
- Das, D., & Chaturvedi, O. (2008). Root biomass and distribution of five agroforestry tree species. *Agroforestry Systems*, 74(3), 223-230.

- Davis, V., Burger, J. A., Rathfon, R., & Zipper, C. E. (2017). Selecting tree species for reforestation of Appalachian mined lands. In: Adams, Mary Beth, ed. *The Forestry Reclamation Approach: guide to successful reforestation of mined lands.* Gen. Tech. Rep. NRS-169. Newtown Square, PA: US Department of Agriculture, Forest Service, Northern Research Station: 7-1-7-10., 1-10.
- De Baets, S., Poesen, J., Gyssels, G., & Knapen, A. (2006). Effects of grass roots on the erodibility of topsoils during concentrated flow. *Geomorphology*, 76(1-2), 54-67.
- DeBell, D. S., Clendenen, G. W., Harrington, C. A., & Zasada, J. C. (1996). Tree growth and stand development in short-rotation *Populus* plantings: 7-year results for two clones at three spacings. *Biomass and Bioenergy*, 11(4), 253-269.
- Dehoche, Y. (1997). L'enracinement des peupliers. *Forêt-Entreprise*. 139, 50-56.
- Denis, S., Bremand, F., & Hebert, Y. (2000). An experimental study on the mechanical behaviour of the maize root system: analysis of the soil/root bond and determination of rigidity modulus. In *The supporting roots of trees and woody plants: Form, Function and Physiology* (pp. 295-304). Springer, Dordrecht.
- DesRochers, A., & Lieffers, V. J. (2001). Root biomass of regenerating aspen (*Populus tremuloides*) stands of different densities in Alberta. *Canadian Journal of Forest Research*, 31(6), 1012-1018.
- DesRochers, A., Thomas, B. R., & Butson, R. (2004). Reclamation of roads and landings with balsam poplar cuttings. *Forest Ecology and Management*, 199(1), 39-50.
- DesRochers, A., & Tremblay, F. (2009). The effect of root and shoot pruning on early growth of hybrid poplars. *Forest Ecology and Management*, 258(9), 2062-2067.
- DesRochers, A., Van Den Driessche, R., & Thomas, B. R. (2007). The interaction between nitrogen source, soil pH, and drought in the growth and physiology of three poplar clones. *Botany*, 85(11), 1046-1057.
- Dexter, A. R. (1988). Advances in characterization of soil structure. *Soil and Tillage Research*, 11(3-4), 199-238.

- Dexter, A. R. (2004). Soil physical quality: Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma*, 120(3-4), 201-214.
- DiFazio, S. P., Slavov, G. T., & Joshi, C. P. (2011). *Populus: a premier pioneer system for plant genomics. joshi C, Difazio SP, Kole C, editors. Genetics, genomics and breeding of poplar*. Enfield, NH: Science Publishers, 1-28.
- Di Iorio, A., Lasserre, B., Scippa, G. S., & Chiatante, D. (2005). Root system architecture of *Quercus pubescens* trees growing on different sloping conditions. *Annals of Botany*, 95(2), 351-361.
- Dickmann, D. I. (2001). An overview of the genus *Populus*. *Poplar culture in north America*(Part A), 1e42.
- Dickmann, D. I., Isebrands, J. G., Eckenwalder, J. E., & Richardson, J. (2002). *Poplar culture in north America*: NRC Research Press.
- Domenicano, S., Coll, L., Messier, C., & Berninger, F. (2011). Nitrogen forms affect root structure and water uptake in the hybrid poplar. *New Forests*, 42(3), 347-362.
- Doran, J.W. & Parkin, T.B. (1994). Defining and Assessing Soil Quality. In: Doran, J.W., Coleman, D.C., Bezdicek, D.F. and Stewart, B.A., Eds., Defining Soil Quality for a Sustainable Environment, *Soil Science Society of America Journal*, (35)3, 1-21.
- Douglas, G. B., McIvor, I. R., & Lloyd-West, C. M. (2016). Early root development of field-grown poplar: effects of planting material and genotype. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 46(1), 1-14.
- Douglas, G. B., McIvor, I. R., Potter, J. F., & Foote, L. G. (2010). Root distribution of poplar at varying densities on pastoral hill country. *Plant and Soil*, 333(1), 147-161.
- Drénou, C. (2006). *Les racines: face cachée des arbres: Forêt privée française*.
- Drénou, C. (2003). Typologie et variations de l'enracinement des arbres adultes. *Forêt-Entreprise*, 153, 27-33.

- Duddles, R. E., & Owston, P. W. (1990). *Performance of conifer stock types on national forests in the Oregon and Washington Coast Ranges*. Paper presented at the eds), Target Seedling Symposium: Proceedings, Combined Meeting of the Western Forest Nursery Association.
- Dupont, S., & Patton, E. G. (2012). Influence of stability and seasonal canopy changes on micrometeorology within and above an orchard canopy: The CHATS experiment. *Agricultural and Forest Meteorology*, 157, 11-29.
- Dupuy, L. (2003). *Modélisation de l'ancrage racinaire des arbres forestiers*. These de l'Université de Bordeaux I, France, no. 2788. http://archives.disvu.u-bordeaux1.fr/pdf/2003/DUPUY_LIONEL_2003.pdf
- Dupuy, L., Fourcaud, T., & Stokes, A. (2005). A numerical investigation into factors affecting the anchorage of roots in tension. *European Journal of Soil Science*, 56(3), 319-327.
- Dupuy, L., Fourcaud, T., & Stokes, A. (2007). A numerical investigation into the influence of soil type and root architecture on tree anchorage. In *Eco-and ground bio-engineering: The use of vegetation to improve slope stability* (pp. 175-189): Springer.
- Ennos, A., Crook, M., & Grimshaw, C. (1993). A comparative study of the anchorage systems of Himalayan balsam Impatiens glandulifera and mature sunflower Helianthus annuus. *Journal of Experimental Botany*, 44(1), 133-146.
- Environment Canada. (2011). Pollution and waste - Mining. <https://www.ec.gc.ca/pollution/default.asp?lang=En&n=C6A98427-1>.
- Environment Canada. (2010). National climate archives. [Accessed 2016 Apr 7]. <http://climate.weatheroffice.ec.gc.ca/index.html>.
- Evanylo, G., Abaye, A., Dundas, C., Zipper, C., Lemus, R., Sukkariyah, B., & Rockett, J. (2005). Herbaceous vegetation productivity, persistence, and metals uptake on a biosolids-amended mine soil. *Journal of Environmental Quality*, 34(5), 1811-1819.
- Fahey, T. J., & Hughes, J. W. (1994). Fine root dynamics in a northern hardwood forest ecosystem, Hubbard Brook Experimental Forest, NH. *Journal of Ecology*, 533-548.

- Falkiner, R. A., Nambiar, E. K. S., Polglase, P. J., Theiveyanathan, S., & Stewart, L. G. (2006). Root distribution of *Eucalyptus grandis* and *Corymbia maculata* in degraded saline soils of south-eastern Australia. *Agroforestry Systems*, 67(3), 279-291.
- Fan, H., Ma, Y., Wan, J., Wang, Y., Li, Z., & Chen, Y. (2020). Adsorption properties and mechanisms of novel biomaterials from banyan aerial roots via simple modification for ciprofloxacin removal. *Science of The Total Environment*, 708, 134630.
- Farquhar, G. D., Ehleringer, J. R., & Hubick, K. T. (1989). Carbon isotope discrimination and photosynthesis. *Annual Review of Plant Biology*, 40(1), 503-537.
- Fernández, J., Moreno, F., Cabrera, F., Arrue, J., & Martín-Aranda, J. (1991). Drip irrigation, soil characteristics and the root distribution and root activity of olive trees. *Plant and Soil*, 133(2), 239-251.
- Fernandez, R. T., Perry, R. L., & Ferree, D. C. (1995). Root distribution patterns of nine apple rootstock in two contrasting soil types. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 120(1), 6-13.
- Festin, E. S., Tigabu, M., Chileshe, M. N., Syampungani, S., & Odén, P. C. (2019). Progresses in restoration of post-mining landscape in Africa. *Journal of Forestry Research*, 30(2), 381-396.
- Fields-Johnson, C. W., Burger, J. A., Evans, D. M., & Zipper, C. E. (2014). Ripping improves tree survival and growth on unused reclaimed mined lands. *Environmental Management*, 53(6), 1059-1065.
- Fitter, A. (1991). The ecological significance of root system architecture: an economic approach. *Plant Root Growth: An Ecological Perspective*, 229-243.
- Fortier, J., Gagnon, D., Truax, B., & Lambert, F. (2010). Nutrient accumulation and carbon sequestration in 6-year-old hybrid poplars in multiclinal agricultural riparian buffer strips. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 137(3-4), 276-287.

- Fortier, J., Truax, B., Gagnon, D. (2008). Peuplier hybride en zone riveraine – Améliorer l'agroenvironnement tout en produisant du bois [Hybrid poplar in riparian zones – improving the agroenvironment while producing wood]. Québec (Canada): *Agriculture et Agroalimentaire Canada* ; p. 12.
- Fortier, J., Truax, B., Gagnon, D., & Lambert, F. (2013). Root biomass and soil carbon distribution in hybrid poplar riparian buffers, herbaceous riparian buffers and natural riparian woodlots on farmland. *SpringerPlus*, 2(1), 1-19.
- Fourcaud, T., Zhang, X., Stokes, A., Lambers, H., & Körner, C. (2008). Plant growth modelling and applications: the increasing importance of plant architecture in growth models. *Annals of Botany*, 101(8), 1053-1063.
- Foussadier, R. (2003). Les systèmes racinaires des arbres de la ripisylve: effets des contraintes physiques et exemples. In: H. Piégay, Pautou, G., Ruffinoni, C. (Eds.), *Les forêts riveraines des cours d'eau, écologie, fonctions et gestion* (pp. 124–133). Paris: Institut pour le Développement Forestier.
- Franks, P. J., Drake, P. L., & Froend, R. H. (2007). Anisohydric but isohydrodynamic: seasonally constant plant water potential gradient explained by a stomatal control mechanism incorporating variable plant hydraulic conductance. *Plant, Cell & Environment*, 30(1), 19-30.
- Fraser, A. I. (1962). The soil and roots as factors in tree stability. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 34(2), 117-127.
- Friend, A. L., Mobley, J. A., Ryan, E. A., & Bradshaw Jr, H. (1999). Root growth plasticity of hybrid poplar in response to soil nutrient gradients. *Journal of Sustainable Forestry*, 10(1-2), 133-140.
- Friend, A. L., Scarascia-Mugnozza, G., Isebrands, J., & Heilman, P. E. (1991). Quantification of two-year-old hybrid poplar root systems: morphology, biomass, and ¹⁴C distribution. *Tree Physiology*, 8(2), 109-119.
- Gale, M., & Grigal, D. (1987). Vertical root distributions of northern tree species in relation to successional status. *Canadian Journal of Forest Research*, 17(8), 829-834.

- Garcia-Forner, N., Adams, H. D., Sevanto, S., Collins, A. D., Dickman, L. T., Hudson, P. J., . . . Martínez-Vilalta, J. (2016). Responses of two semiarid conifer tree species to reduced precipitation and warming reveal new perspectives for stomatal regulation. *Plant, Cell & Environment*, 39(1), 38-49.
- Gardiner, B., Marshall, B., Achim, A., Belcher, R., & Wood, C. (2005). The stability of different silvicultural systems: a wind-tunnel investigation. *Forestry*, 78(5), 471-484.
- Garrett, H. (2009). *North American agroforestry*: American Society of Agronomy.
- Gärtner, H., & Denier, C. (2006). Application of a 3D Laser scanning device to acquire the structure of whole root systems-A pilot study. *TRACE—Tree Rings in Archaeology, Climatology and Ecology*, 4, 288-294.
- Gaspard, D. T. (2020). *Les greffes racinaires naturelles chez deux clones de peuplier hybride*. Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue,
- Gebre, G. M., Tschaplinski, T. J., Tuskan, G. A., & Todd, D. E. (1998). Clonal and seasonal differences in leaf osmotic potential and organic solutes of five hybrid poplar clones grown under field conditions. *Tree Physiology*, 18(10), 645-652.
- George, E., & Marschner, H. (1996). Nutrient and water uptake by roots of forest trees. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*, 159(1), 11-21.
- Giehl, R. F., Gruber, B. D., & von Wirén, N. (2014). It's time to make changes: modulation of root system architecture by nutrient signals. *Journal of Experimental Botany*, 65(3), 769-778.
- Gilman, E. F. (1990). Tree root growth and development. II. Response to culture, management and planting. *Journal of Environmental Horticulture*, 8(4), 220-227.
- Gilroy, S., & Jones, D. L. (2000). Through form to function: root hair development and nutrient uptake. *Trends in plant science*, 5(2), 56-60.
- Gindaba, J., Rozanov, A., & Negash, L. (2004). Response of seedlings of two *Eucalyptus* and three deciduous tree species from Ethiopia to severe water stress. *Forest Ecology and Management*, 201(1), 119-129.

- Girardin, M. P., Flannigan, M. D., Tardif, J. C., & Bergeron, Y. (2008). Climatologie, météorologie et feux de forêt. *Aménagement écosystique en forêt boréale. Presses de l'Université du Québec, Quebec City, Quebec, Canada*, 83-107.
- Girouard, R. (1995). Root form and stability of outplanted trees: results of a 1989 survey. *Arboricultural Journal*, 19(2), 121-146.
- Godin, C. (2000). Representing and encoding plant architecture: a review. *Annals of Forest Science*, 57(5), 413-438.
- Godin, C., Costes, E., & Sinoquet, H. (1999). A method for describing plant architecture which integrates topology and geometry. *Annals of Botany*, 84(3), 343-357.
- Goehring, J. (2015). Competition impacts on hybrid poplar and implications for alternative establishment systems.
- Gouvernement du Québec. (2012). Directive 019 sur l'industrie minière. Ministère du développement durable, environnement et parcs, Gouvernement du Québec, mars 2012.
- Gray, D. H., & Leiser, A. T. (1982). *Biotechnical slope protection and erosion control*: Van Nostrand Reinhold Company Inc.
- Gray, G. R. A. (2000). Root distribution of hybrid poplar in a temperate agroforestry intercropping system. M.Sc. Thesis. Department of Environmental Biology, University of Guelph, 114 pp.
- Gregory, P. (2006). Roots: Growth, Activity and Interactions with Soils. In: Wiley-Blackwell Press: Hoboken, NJ, USA.
- Grenke, J. S., Macdonald, S. E., Thomas, B. R., Moore, C. A., & Bork, E. W. (2016). Relationships between understory vegetation and hybrid poplar growth and size in an operational plantation. *The Forestry Chronicle*, 92(4), 469-476.
- Groot, J. R., Traoré, M., & Koné, D. (1998). Description du système racinaire de trois espèces fourragères en zone soudano-sahélienne: Andropogon gayanus, Vigna unguiculata et Stylosanthes hamata. *Biotechnology, Agronomy, Society and Environment*, 2(2), 106-119.

- Grossiord, C., Buckley, T. N., Cernusak, L. A., Novick, K. A., Poulter, B., Siegwolf, R. T., . . . McDowell, N. G. (2020). Plant responses to rising vapor pressure deficit. *New Phytologist*, 226(6), 1550-1566.
- Grossnickle, S. C. (2000). *Ecophysiology of northern spruce species: the performance of planted seedlings*: NRC Research Press.
- Grossnickle, S. C. (2005). Importance of root growth in overcoming planting stress. *New Forests*, 30(2), 273-294.
- Gruber, B. D., Giehl, R. F., Friedel, S., & von Wirén, N. (2013). Plasticity of the *Arabidopsis* root system under nutrient deficiencies. *Plant Physiology*, 163(1), 161-179.
- Guet, J., Fichot, R., Lédée, C., Laurans, F., Cochard, H., Delzon, S., . . . Brignolas, F. (2015). Stem xylem resistance to cavitation is related to xylem structure but not to growth and water-use efficiency at the within-population level in *Populus nigra* L. *Journal of Experimental Botany*, 66(15), 4643-4652.
- Guittonny-Larchevêque, M., Bussière, B., & Pednault, C. (2016). Tree-substrate water relations and root development in tree plantations used for mine tailings reclamation. *Journal of Environmental Quality*, 45(3), 1036-1045.
- Guittonny-Larchevêque, M., & Lortie, S. (2017). Above-and Belowground Development of a Fast-Growing Willow Planted in Acid-Generating Mine Technosol. *Journal of Environmental Quality*, 46(6), 1462-1471.
- Guittonny-Larchevêque, M., & Pednault, C. (2016). Substrate comparison for short-term success of a multispecies tree plantation in thickened tailings of a boreal gold mine. *New Forests*, 47(5), 763-781.
- Gyssels, G., & Poesen, J. (2003). The importance of plant root characteristics in controlling concentrated flow erosion rates. *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group*, 28(4), 371-384.
- Gyssels, G., Poesen, J., Bochet, E., & Li, Y. (2005). Impact of plant roots on the resistance of soils to erosion by water: a review. *Progress in physical Geography*, 29(2), 189-217.

- Haissig, B. E. (1984). Carbohydrate accumulation and partitioning in *Pinus banksiana* seedlings and seedling cuttings. *Physiologia Plantarum*, 61(1), 13-19.
- Hakamada, R., Hubbard, R. M., Ferraz, S., Stape, J. L., & Lemos, C. (2017). Biomass production and potential water stress increase with planting density in four highly productive clonal *Eucalyptus* genotypes. *Southern Forests: a Journal of Forest Science*, 79(3), 251-257.
- Hale, S. E., Levy, P. E., & Gardiner, B. A. (2004). Trade-offs between seedling growth, thinning and stand stability in Sitka spruce stands: a modelling analysis. *Forest Ecology and Management*, 187(1), 105-115.
- Halofsky, J. E., & McCormick, L. H. (2005). Effects of unseeded areas on species richness of coal mines reclaimed with municipal biosolids. *Restoration Ecology*, 13(4), 630-638.
- Hamanishi, E. T., Raj, S., Wilkins, O., Thomas, B. R., Mansfield, S. D., Plant, A. L., & Campbell, M. M. (2010). Intraspecific variation in the *Populus balsamifera* drought transcriptome. *Plant, Cell & Environment*, 33(10), 1742-1755.
- Hansen, E., Netzer, D., & Toldsted, D. (1993). Guideline for Establishing Poplar Plantations in the North-West US. In: Department of Agriculture, Forest Service, *North Central Forest Experiment Station*: St. Paul, MN, USA. 6 p.
- Harper, J. L., Jones, M., and Sackville Hamilton, N. R. (1991). "The evolution of roots and the problems of analyzing their behaviour," in *Plant Root Growth: An Ecological Perspective*, ed D. Atkinson (Oxford: Blackwell Scientific Publications), 3-22.
- Hartmann, H., Ziegler, W., & Trumbore, S. (2013). Lethal drought leads to reduction in nonstructural carbohydrates in Norway spruce tree roots but not in the canopy. *Functional Ecology*, 27(2), 413-427.
- Headlee, W. L., Zalesny Jr, R. S., & Hall, R. B. (2019). Coarse root biomass and architecture of hybrid aspen 'Crandon' (*Populus alba* L. \times *P. grandidentata* Michx.) grown in an agroforestry system in central Iowa, USA. *Journal of Sustainable Forestry*, 38(1), 18-30.

- Hendricks, J. J., Hendrick, R. L., Wilson, C. A., Mitchell, R. J., Pecot, S. D., & Guo, D. (2006). Assessing the patterns and controls of fine root dynamics: an empirical test and methodological review. *Journal of Ecology*, 94(1), 40-57.
- Hendrick, R. L., & Pregitzer, K. S. (1992). The demography of fine roots in a northern hardwood forest. *Ecology*, 73(3), 1094-1104.
- Henkel-Johnson, D., Macdonald, S. E., Bork, E. W., & Thomas, B. R. (2016). Influence of weed composition, abundance, and spatial proximity on growth in young hybrid poplar plantations. *Forest Ecology and Management*, 362, 55-68.
- Henkel-Johnson, D. C. (2014). Factors regulating tree-herb competition in young hybrid poplar plantations. Department of Renewable Resources, MSc. University of Alberta, Edmonton, Canada. https://era.library.ualberta.ca/files/6d56zz12s#.VolWU_krJD8.
- Herasymuk, G. M. (1996). *Hydrogeology of a sulphide waste rock dump*. University of Saskatchewan,
- Hilman, B., Muhr, J., Helm, J., Kuhlmann, I., & Trumbore, S. (2020). *Respiration and C dynamics in Poplar roots*. Paper presented at the EGU General Assembly Conference Abstracts.
- Hobbs, R. J., Saunders, D. A., & Arnold, G. W. (1992). Integrated landscape management: A Western Australian perspective. *Biological Conservation*.
- Hodge, A. (2004). The plastic plant: root responses to heterogeneous supplies of nutrients. *New Phytologist*, 162(1), 9-24.
- Hodge, A., Berta, G., Doussan, C., Merchan, F., & Crespi, M. (2009). Plant root growth, architecture and function. *Plant and Soil*, 321(1), 153-187.
- Hodge, S. (1991). *Research for practical arboriculture. Proceedings*. Paper presented at the Seminar Research for Practical Arboriculture2-4 Abr 1990New York, NY (EUA).
- Hu, Y., & Thomas, B. R. (2019). Hormones and heterosis in hybrid balsam poplar (*Populus balsamifera L.*). *Forests*, 10(2), 143.

- Hutchings, M., & John, E. (2003). Distribution of roots in soil, and root foraging activity. In *Root Ecology* (pp. 33-60): Springer.
- Ingram, P. A., & Malamy, J. E. (2010). Root system architecture. *Advances in Botanical Research*, 55, 75-117.
- Isebrands, J. G., & Karnosky, D. F. (2001). Environmental benefits of poplar culture. *Poplar Culture in North America*, (Part A), 207-218.
- Jaffré, T., Latham, M., & Schmid, M. (1977). Aspects de l'influence de l'extraction du minerai de nickel sur la végétation et les sols en Nouvelle-Calédonie. *Cah ORSTOM Sér Biologie*, 12, 307-321.
- James, K., Hallam, C., & Spencer, C. (2013). Measuring tilt of tree structural root zones under static and wind loading. *Agricultural and Forest Meteorology*, 168, 160-167.
- James, K. R., Haritos, N., & Ades, P. K. (2006). Mechanical stability of trees under dynamic loads. *American journal of Botany*, 93(10), 1522-1530.
- Jobidon, R., Roy, V., & Cyr, G. (2003). Net effect of competing vegetation on selected environmental conditions and performance of four spruce seedling stock sizes after eight years in Québec (Canada). *Annals of Forest Science*, 60(7), 691-699.
- Johansson, K., Nilsson, U., & Allen, H. L. (2007). Interactions between soil scarification and Norway spruce seedling types. *New Forests*, 33(1), 13-27.
- Joslin, J., & Henderson, G. (1987). Organic matter and nutrients associated with fine root turnover in a white oak stand. *Forest Science*, 33(2), 330-346.
- Jourdan, C., Silva, E. V., Gonçalves, J. L. M., Ranger, J., Moreira, R. M., & Laclau, J. P. (2008). Fine root production and turnover in Brazilian Eucalyptus plantations under contrasting nitrogen fertilization regimes. *Forest Ecology and Management*, 256(3), 396-404.
- Jura-Morawiec, J., Monroy, P., Marrero, A., & Tulik, M. (2021). Aerial Root Structure and Its Significance for Function in Dracaena draco. *Journal of Plant Growth Regulation*, 40, 486-493.

- Jutras, S., Thiffault, N., & Munson, A. (2007). Comparing large bareroot and container stock: water stress as influenced by peat and soil water availability. *Tree Planter's Notes*, 52(1), 15-18.
- Kabba, B. S., Knight, J. D., & Van Rees, K. C. (2007). Growth of hybrid poplar as affected by dandelion and quackgrass competition. *Plant and Soil*, 298(1), 203-217.
- Kagambèga, F. W., Nana, R., Bayen, P., Thiombiano, A., & Boussim, J. I. (2019). Tolérance au déficit hydrique de cinq espèces prioritaires pour le reboisement au Burkina Faso. *Biotechnology Agronomy Society and Environment*, 23(4), 245-256.
- Kalliokoski, T., Nygren, P., & Sievänen, R. (2008). Coarse root architecture of three boreal tree species growing in mixed stands. *Silva Fennica*, 42, 189-210.
- Kamimura, K., Kitagawa, K., Saito, S., & Mizunaga, H. (2012). Root anchorage of hinoki (*Chamaecyparis obtuse* (Sieb. Et Zucc.) Endl.) under the combined loading of wind and rapidly supplied water on soil: analyses based on tree-pulling experiments. *European Journal of Forest Research*, 131(1), 219-227.
- Kano-Nakata, M., Nakamura, T., Mitsuya, S., & Yamauchi, A. (2019). Plasticity in root system architecture of rice genotypes exhibited under different soil water distributions in soil profile. *Plant Production Science*, 22(4), 501-509.
- Kaufmann, M. R. (1968). Evaluation of the pressure chamber technique for estimating plant water potential of forest tree species. *Forest Science*, 14(4), 369-374.
- Kayal, W. E., Cooke, B. J., Linsky, J., Arango-Velez, A., Galindo González, L. M., Cooke, J. E., Lusebrink, I. (2013). Influence of water deficit on the molecular responses of *Pinus contorta* × *Pinus banksiana* mature trees to infection by the mountain pine beetle fungal associate, *Grosmannia clavigera*. *Tree Physiology*, 34(11), 1220-1239.
- Kellermeier, F., Armengaud, P., Seditas, T. J., Danku, J., Salt, D. E., & Amtmann, A. (2014). Analysis of the root system architecture of *Arabidopsis* provides a quantitative readout of crosstalk between nutritional signals. *The Plant Cell*, 26(4), 1480-1496.

- Khaleel, R., Reddy, K., & Overcash, M. (1981). Changes in soil physical properties due to organic waste applications: a review. *Journal of Environmental Quality*, 10(2), 133-141.
- Khuder, H., Stokes, A., Danjon, F., Gouskou, K., & Lagane, F. (2007). Is it possible to manipulate root anchorage in young trees? *Plant and Soil*, 294(1), 87-102.
- Klein, T. (2014). The variability of stomatal sensitivity to leaf water potential across tree species indicates a continuum between isohydric and anisohydric behaviours. *Functional Ecology*, 28(6), 1313-1320.
- Kong, D., Wang, J., Wu, H., Valverde-Barrantes, O. J., Wang, R., Zeng, H., . . . Feng, Y. (2019). Nonlinearity of root trait relationships and the root economics spectrum. *Nature Communications*, 10(1), 1-9.
- L'huillier, L., Jaffré, T., & Wulff, A. (2010). Mines et Environnement en Nouvelle-Calédonie: *les milieux sur substrats ultramafiques et leur restauration*. Edition IAC, Noumea, Nouvelle Calédonie.
- Landhäuser, S. M., Rodriguez-Alvarez, J., Marenholtz, E. H., & Lieffers, V. J. (2012). Effect of stock type characteristics and time of planting on field performance of aspen (*Populus tremuloides Michx.*) seedlings on boreal reclamation sites. *New Forests*, 43(5), 679-693.
- Larchevêque, M., Desrochers, A., Bussière, B., Cartier, H., & David, J. S. (2013). Revegetation of Non-Acid-Generating, Thickened Tailings with Boreal Trees: A Greenhouse Study. *Journal of Environmental Quality*, 42(2), 351-360.
- Larchevêque, M., Desrochers, A., Bussière, B., & Cimon, D. (2014). Planting trees in soils above non-acid-generating wastes of a boreal gold mine. *Ecoscience*, 21(3-4), 217-231.
- Larcheveque, M., Desrochers, A., & Larocque, G. R. (2011). Comparison of manure compost and mineral fertilizer for hybrid poplar plantation establishment on boreal heavy clay soils. *Annals of Forest Science*, 68(4), 849-860.
- Larchevêque, M., Maurel, M., Desrochers, A., & Larocque, G. R. (2011). How does drought tolerance compare between two improved hybrids of balsam poplar and an unimproved native species? *Tree Physiology*, 31(3), 240-249.

- Larocque, G. R. (1999). Performance and morphological response of the hybrid poplar DN-74 (*Populus deltoides x nigra*) under different spacings on a 4-year rotation. *Annals of Forest Science*, 56(4), 275-287.
- Lebourgeois, F., & Jabiol, B. (2002). Enracinements comparés du Chêne sessile, du Chêne pédonculé et du Hêtre. Réflexions sur l'autécologie des essences. *Revue Forestière Française*, 54, 17-42
- Levy, G. (1968). Importance des propriétés du sol pour l'enracinement de *Picea excelsa* et de *Pinus sylvestris*. In *Annales des Sciences Forestières*, 25(3), 157-188.
- Li, G., Liu, Y., Zhu, Y., Yang, J., Sun, H., Jia, Z., & Ma, L. (2011). Influence of initial age and size on the field performance of *Larix olgensis* seedlings. *New Forests*, 42(2), 215-226.
- Li, X., Jia, X., & Dong, G. (2006). Influence of desertification on vegetation pattern variations in the cold semi-arid grasslands of Qinghai-Tibet Plateau, Northwest China. *Journal of Arid Environments*, 64(3), 505-522.
- Liu, F., & Stützel, H. (2004). Biomass partitioning, specific leaf area, and water use efficiency of vegetable amaranth (*Amaranthus spp.*) in response to drought stress. *Scientia Horticulturae*, 102(1), 15-27.
- Liu, X., Duan, S., Li, A., Xu, N., Cai, Z., & Hu, Z. (2009). Effects of organic carbon sources on growth, photosynthesis, and respiration of *Phaeodactylum tricornutum*. *Journal of Applied Phycology*, 21(2), 239-246.
- Liu, Y., Wang, G., Yu, K., Li, P., Xiao, L., & Liu, G. (2018). A new method to optimize root order classification based on the diameter interval of fine root. *Scientific Reports*, 8(1), 1-11.
- Liu, Z., & Dickmann, D. I. (1996). Effects of water and nitrogen interaction on net photosynthesis, stomatal conductance, and water-use efficiency in two hybrid poplar clones. *Physiologia Plantarum*, 97(3), 507-512.
- Logbo, J., Diouf, M., Ngaryo, F., Ameglio, T., & Akpo, L. E. (2013). Effet du stress hydrique sur l'architecture racinaire de jeunes plants d'*Acacia tortilis* (Forsk.), de *Balanites aegyptiaca* (L) Del., et de *Zizyphus mauritiana* Lam. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 7(3), 1011-1033.

- Lorenzo, H., & Arias, P. (2005). A methodology for rapid archaeological site documentation using ground-penetrating radar and terrestrial photogrammetry. *Geoarchaeology: An International Journal*, 20(5), 521-535.
- Lu, W., Wang, X., & Wang, F. (2019). Adaptive minirhizotron for pepper roots observation and its installation based on root system architecture traits. *Plant Methods*, 15(1), 1-14.
- Ludovici, K. H. (2004). Tree roots and their interaction with soil. In J. Burley, J. Evans, & J. A. Youngquist (Eds.), *Encyclopedia of forest sciences* (pp. 1195–1201). Oxford: Elsevier.
- Lundström, T., Jonas, T., Stöckli, V., & Ammann, W. (2007). Anchorage of mature conifers: resistive turning moment, root–soil plate geometry and root growth orientation. *Tree Physiology*, 27(9), 1217-1227.
- Lüttenschwager, D., Ewald, D., & Alia, L. A. (2016). Consequences of moderate drought stress on the net photosynthesis, water-use efficiency and biomass production of three poplar clones. *Acta Physiologiae Plantarum*, 38(1), 27.
- Macdonald, S. E., Landhäusser, S. M., Skousen, J., Franklin, J., Frouz, J., Hall, S. Quideau, S. (2015). Forest restoration following surface mining disturbance: challenges and solutions. *New Forests*, 46(5), 703-732.
- Mackie-Dawson, L. A., & Atkinson, D. (1991). Methodology for the study of roots in field experiments and the interpretation of results. *Plant Root Growth: An Ecological Perspective*, 25-47.
- Marcelis, L. F., Heuvelink, E., & Goudriaan, J. (1998). Modelling biomass production and yield of horticultural crops: a review. *Scientia Horticulturae*, 74(1-2), 83-111.
- Marinari, S., Masciandaro, G., Ceccanti, B., & Grego, S. (2000). Influence of organic and mineral fertilisers on soil biological and physical properties. *Bioresource Technology*, 72(1), 9-17.
- Marino, P. C., & Gross, K. L. (1998). Competitive effects of conspecific and herbaceous (weeds) plants on growth and branch architecture of *Populus x euramericana* cv. *Eugenei*. *Canadian Journal of Forest Research*, 28(3), 359-367.

- Marron, N., Dreyer, E., Boudouresque, E., Delay, D., Petit, J.-M., Delmotte, F. M., & Brignolas, F. (2003). Impact of successive drought and re-watering cycles on growth and specific leaf area of two *Populus × canadensis* (Moench) clones, 'Dorskamp' and 'Luisa_Avanzo'. *Tree Physiology*, 23(18), 1225-1235.
- Martínez-Vilalta, J., Poyatos, R., Aguadé, D., Retana, J., & Mencuccini, M. (2014). A new look at water transport regulation in plants. *New Phytologist*, 204(1), 105-115.
- McClaugherthy, C. A., Aber, J. D., & Melillo, J. M. (1982). The role of fine roots in the organic matter and nitrogen budgets of two forested ecosystems. *Ecology*, 63(5), 1481-1490.
- Mc Nabb, K., & VanderSchaaf, C. (2005). Growth of graded sweetgum 3 years after root and shoot pruning. *New Forests*, 29(3), 313-320.
- McCleery, W. T., Mohd-Radzman, N. A., & Grieneisen, V. A. (2017). Root branching plasticity: collective decision-making results from local and global signalling. *Current Opinion in Cell Biology*, 44, 51-58.
- McCormack, M. L., Dickie, I. A., Eissenstat, D. M., Fahey, T. J., Fernandez, C. W., Guo, D., . . . Jackson, R. B. (2015). Redefining fine roots improves understanding of below-ground contributions to terrestrial biosphere processes. *New Phytologist*, 207(3), 505-518.
- McDowell, N., Pockman, W. T., Allen, C. D., Breshears, D. D., Cobb, N., Kolb, T., . . . Williams, D. G. (2008). Mechanisms of plant survival and mortality during drought: why do some plants survive while others succumb to drought? *New Phytologist*, 178(4), 719-739.
- McGill, D. W., Ford, V. L., & McNeel, J. F. (2004). *Early development of a species test established on surface mines thirty years post-reclamation*. In: Proceedings of joint conference of 21st annual meeting of the American Society of Mining and Reclamation, 25th West Virginia surface mine drainage task force symposium, Morgantown, 1227-1238.
- McIvor, I., Douglas, G., & Benavides, R. (2009). Coarse root growth of Veronese poplar trees varies with position on an erodible slope in New Zealand. *Agroforestry Systems*, 76(1), 251-264.

- MDDELCC. (2016). Le secteur minier au Québec, Enjeux environnementaux et cadre normatif pour les rejets liquides.
- Meidner, H., & Sheriff, D. W. (1976). *Water and plants*: Blackie and Son Ltd., London, UK.
- Mench, M., Bussiere, S., Boisson, J., Castaing, E., Vangronsveld, J., Ruttens, A., . . . Manceau, A. (2003). Progress in remediation and revegetation of the barren Jales gold mine spoil after in situ treatments. *Plant and Soil*, 249(1), 187-202.
- Mendez, M. O., Glenn, E. P., & Maier, R. M. (2007). Phytostabilization potential of quailbush for mine tailings: growth, metal accumulation, and microbial community changes. *Journal of Environmental Quality*, 36(1), 245-253.
- Ménétrier, J. (2008). Le peuplier hybride au Québec: une révolution, une évolution. *Naturaliste Canadien*, 132, 46-54.
- Mensah, A. K., Mahiri, I. O., Owusu, O., Mireku, O. D., Wireko, I., & Kissi, E. A. (2015). Environmental impacts of mining: a study of mining communities in Ghana. *Applied Ecology and Environmental Sciences*, 3(3), 81-94.
- MENV. (2003). Guide de caractérisation des terrains, Ministère de l'Environnement.
<http://www.environnement.gouv.qc.ca/sol/terrains/guide/guidecaracterisation.pdf> (accessed 2 septembre 2020).
- Messier, C., Coll, L., Poitras-Larivière, A., Bélanger, N., & Brisson, J. (2009). Resource and non-resource root competition effects of grasses on early- versus late-successional trees. *Journal of Ecology*, 97(3), 548-554.
- Meunier, S., Ruel, J.-C., Laflamme, G., & Achim, A. (2002). Résistance comparée de l'épinette blanche et du sapin baumier au renversement. *Canadian Journal of Forest Research*, 32(4), 642-652.
- Miller, A. T., Allen, H. L., & Maier, C. A. (2006). Quantifying the coarse-root biomass of intensively managed loblolly pine plantations. *Canadian Journal of Forest Research*, 36(1), 12-22.

- Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles. (2003). Vegetation Zones and Bioclimatic Domains in Québec. <http://www.mern.gouv.qc.ca/english/publications/forest/publications/zone-a.pdf> [accessed 10 December 2019].
- Mitchell, C., Stevens, E., & Watters, M. (1999). Short-rotation forestry—operations, productivity and costs based on experience gained in the UK. *Forest Ecology and Management*, 121(1-2), 123-136.
- Mohammed, G.H., McLeod, G.R., Menes, P.A., Timmer, V.R. (2001). A comparison of bareroot and container stock. In: Wagner RG, Columbo SJ (eds). Regenerating the Canadian forest: principles and practices for Ontario. Fitzhenry & Whiteside, Markham, 343–348.
- Monclus, R., Dreyer, E., Villar, M., Delmotte, F. M., Delay, D., Petit, J. M., . . . Brignolas, F. (2006). Impact of drought on productivity and water use efficiency in 29 genotypes of *Populus deltoides* × *Populus nigra*. *New Phytologist*, 169(4), 765-777.
- Moore, J. R. (2000). Differences in maximum resistive bending moments of *Pinus radiata* trees grown on a range of soil types. *Forest Ecology and Management*, 135(1-3), 63-71.
- Moore, J. R., & Maguire, D. A. (2004). Natural sway frequencies and damping ratios of trees: concepts, review and synthesis of previous studies. *Trees*, 18(2), 195-203.
- Morris, E. C., Griffiths, M., Golebiowska, A., Mairhofer, S., Burr-Hersey, J., Goh, T., Lynch, J. P. (2017). Shaping 3D root system architecture. *Current Biology*, 27(17), R919-R930.
- Mosseler, A., Major, J., & Labrecque, M. (2014). Growth and survival of seven native willow species on highly disturbed coal mine sites in eastern Canada. *Canadian Journal of Forest Research*, 44(4), 340-349.
- Mou, P., Mitchell, R. J., & Jones, R. H. (1997). Root distribution of two tree species under a heterogeneous nutrient environment. *Journal of Applied Ecology*, 645-656.
- Mulia, R., & 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(1), 71-85.

- Munoz-Marquez Trujillo, R. A. (2005). Future climate change impacts on the boreal forest in northwestern Ontario. Implications for the forestry sector and the local community. Ph. D. Thesis University of Waterloo, Ontario, 252p.
- Nadeau, L., & Pluth, D. (1997). Spatial distribution of lodgepole pine and white spruce seedling roots 10 years after deep tillage of a Gray Luvisol. *Canadian Journal of Forest Research*, 27(10), 1606-1613.
- Nagarajah, S. (1987). Effects of soil texture on the rooting patterns of Thompson Seedless vines on own roots and on Ramsey rootstock in irrigated vineyards. *American Journal of Enology and Viticulture*, 38(1), 54-59.
- Nahar, K., Hasanuzzaman, M., Alam, M., & Fujita, M. (2015). Glutathione-induced drought stress tolerance in mung bean: coordinated roles of the antioxidant defence and methylglyoxal detoxification systems. *AoB Plants*, 7.
- Newton, M., Cole, E., & White, D. (1993). Tall planting stock for enhanced growth and domination of brush in the Douglas-fir region. *New Forests*, 7(2), 107-121.
- Nguyen, C. (2003). Rhizodeposition of organic C by plants: mechanisms and controls. *Agronomie*, 23(5-6), 375-396.
- Nguyen, P. V., Dickmann, D. I., Pregitzer, K. S., & Hendrick, R. (1990). Late-season changes in allocation of starch and sugar to shoots, coarse roots, and fine roots in two hybrid poplar clones. *Tree Physiology*, 7(1-2-3-4), 95-105.
- Nichols, P. W., Morris, E. C., & Keith, D. A. (2010). Testing a facilitation model for ecosystem restoration: does tree planting restore ground layer species in a grassy woodland? *Austral Ecology*, 35(8), 888-897.
- Nicoll, B., Berthier, S., Achim, A., Gouskou, K., Danjon, F., & Van Beek, L. (2006). The architecture of *Picea sitchensis* structural root systems on horizontal and sloping terrain. *Trees*, 20(6), 701-712.
- Nicoll, B., Easton, E., Milner, A., Walker, C., & Coutts, M. (1995). Wind stability factors in tree selection: distribution of biomass within root systems of *Sitka spruce* clones. *Wind and Trees*, 276-292.

- Nicoll, B. C., Gardiner, B. A., Rayner, B., & Peace, A. J. (2006). Anchorage of coniferous trees in relation to species, soil type, and rooting depth. *Canadian Journal of Forest Research*, 36(7), 1871-1883.
- Nicoll, B. C., & Ray, D. (1996). Adaptive growth of tree root systems in response to wind action and site conditions. *Tree Physiology*, 16(11-12), 891-898.
- Niemczyk, M., Hu, Y., & Thomas, B. R. (2019). Selection of poplar genotypes for adapting to climate change. *Forests*, 10(11), 1041.
- Nilsson, U., & Albrektson, A. (1994). Growth and self-thinning in two young Scots pine stands planted at different initial densities. *Forest Ecology and Management*, 68(2-3), 209-215.
- Nunes, M. R., Karlen, D. L., Denardin, J. E., & Cambardella, C. A. (2019). Corn root and soil health indicator response to no-till production practices. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 285, 106607.
- Oades, J. M. (1984). Soil organic matter and structural stability: mechanisms and implications for management. *Plant and Soil*, 76(1), 319-337.
- Ostonen, I., Püttsepp, Ü., Biel, C., Alberton, O., Bakker, M., Lõhmus, K., . . . Pronk, A. (2007). Specific root length as an indicator of environmental change. *Plant Biosystems*, 141(3), 426-442.
- Otto, S., Loddo, D., & Zanin, G. (2010). Weed-poplar competition dynamics and yield loss in Italian short-rotation forestry. *Weed Research*, 50(2), 153-162.
- Padilla, F. M., Aarts, B. H., Roijendijk, Y. O., de Caluwe, H., Mommer, L., Visser, E. J., & de Kroon, H. (2013). Root plasticity maintains growth of temperate grassland species under pulsed water supply. *Plant and Soil*, 369(1), 377-386.
- Pagès, L., & Pellerin, S. (1996). Study of differences between vertical root maps observed in a maize crop and simulated maps obtained using a model for the three-dimensional architecture of the root system. *Plant and Soil*, 182(2), 329-337.
- Pallardy, S., & Kozlowski, T. (1981). Water relations of *Populus* clones. *Ecology*, 62(1), 159-169.

- Pang, W., Crow, W., Luc, J., McSorley, R., Giblin-Davis, R., Kenworthy, K., & Kruse, J. (2011). Comparison of water displacement and WinRHIZO software for plant root parameter assessment. *Plant Disease*, 95(10), 1308-1310.
- Paré, D., Rochon, P., & Brais, S. (2002). Assessing the geochemical balance of managed boreal forests. *Ecological Indicators*, 1(4), 293-311.
- Parrotta, J. A., Turnbull, J. W., & Jones, N. (1997). Catalyzing native forest regeneration on degraded tropical lands. *Forest Ecology and Management*, 99(1-2), 1-7.
- Payan, J. C., & Salançon, E. (2002). Définition de la contrainte hydrique: incidences sur les caractéristiques de la vendange. *Le Progrès Agricole et Viticole*, 119(13), 296-300.
- Peltola, H., Kellomäki, S., Hassinen, A., & Granander, M. (2000). Mechanical stability of Scots pine, Norway spruce and birch: an analysis of tree-pulling experiments in Finland. *Forest Ecology and Management*, 135(1-3), 143-153.
- Peregoedova, A. (2012). *Étude expérimentale des propriétés hydrogéologiques des roches stériles à une échelle intermédiaire de laboratoire*. Thèse de doctorat. École Polytechnique de Montréal, 229p.
- Péret, B., Clément, M., Nussaume, L., & Desnos, T. (2011). Root developmental adaptation to phosphate starvation: better safe than sorry. *Trends in Plant Science*, 16(8), 442-450.
- Peterson, C. J. (2007). Consistent influence of tree diameter and species on damage in nine eastern North America tornado blowdowns. *Forest Ecology and Management*, 250(1-2), 96-108.
- Phillips, C. J., Marden, M., & Suzanne, L. M. (2014). Observations of root growth of young poplar and willow planting types. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 44(1), 1-12.
- Pinkard, E., & Neilsen, W. (2003). Crown and stand characteristics of *Eucalyptus nitens* in response to initial spacing: implications for thinning. *Forest Ecology and Management*, 172(2-3), 215-227.

- Pinno, B. D., & Bélanger, N. (2009). Competition control in juvenile hybrid poplar plantations across a range of site productivities in central Saskatchewan, Canada. *New Forests*, 37(2), 213-225.
- Pinto, J. R., Dumroese, R. K., Davis, A. S., & Landis, T. D. (2011). Conducting seedling stocktype trials: a new approach to an old question. *Journal of Forestry*, 109(5), 293-299.
- Plante, B., Schudel, G., & Benzaazoua, M. (2021). Generation of acid mine drainage. In Hard Rock Mine Reclamation: From Prediction to Management of Acid Mine Drainage (pp. 1-20). CRC Press.
- Plomion, C., Lalanne, C., Claverol, S., Meddour, H., Kohler, A., Bogeat-Triboulot, M. B., ... & Bonneau, M. (2006). Mapping the proteome of poplar and application to the discovery of drought-stress responsive proteins. *Proteomics*, 6(24), 6509-6527.
- Plourde, A., Krause, C., & Lord, D. (2009). Spatial distribution, architecture, and development of the root system of *Pinus banksiana* Lamb. in natural and planted stands. *Forest ecology and management*, 258(9), 2143-2152.
- Powell, G. W., & Bork, E. W. (2004). Above-and below-ground effects from alfalfa and marsh reedgrass on aspen seedlings. *Forest Ecology and Management*, 199(2-3), 411-422.
- Puri, S., Singh, V., Bhushan, B., & Singh, S. (1994). Biomass production and distribution of roots in three stands of *Populus deltoides*. *Forest Ecology and Management*, 65(2-3), 135-147.
- Quebec Government. (2016). Annexe 2 – Guide d'intervention– Protection des sols et réhabilitation des terrains contaminés [Annex 2 – intervention guide soil protection and rehabilitation of contaminated fields]. <http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/sol/terrains/guide-intervention/annexe2.pdf>.
- Quick, W., Chaves, M., Wendler, R., David, M., Rodrigues, M., Passaharinho, J., . . . Stitt, M. (1992). The effect of water stress on photosynthetic carbon metabolism in four species grown under field conditions. *Plant, Cell & Environment*, 15(1), 25-35.
- Quine, C., Burnand, A., Coutts, M., & Reynard, B. (1991). Effects of mounds and

- stumps on the root architecture of Sitka spruce on a peaty gley restocking site. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 64(4), 385-401.
- Rahardjo, H., Harnas, F., Indrawan, I., Leong, E., Tan, P., Fong, Y., & Ow, L. (2014). Understanding the stability of Samanea saman trees through tree pulling, analytical calculations and numerical models. *Urban Forestry & Urban Greening*, 13(2), 355-364.
- Raimbault, P. (1991). Quelques observations sur les systèmes racinaires des arbres de parcs et d'alignements: diversité architecturale et convergence dans le développement. *L'arbre. Biologie et Développement*. Ed. C. Edelin. *Naturalia Monspeliensis*, Montpellier, 85-96.
- Rao, M., Muraya, P., & Huxley, P. (1993). Observations of some tree root systems in agroforestry intercrop situations, and their graphical representation. *Experimental Agriculture*, 29(2), 183-194.
- Remaury, A., Guittonny, M., & Rickson, J. (2019). The effect of tree planting density on the relative development of weeds and hybrid poplars on revegetated mine slopes vulnerable to erosion. *New Forests*, 50(4), 555-572.
- Réseau Ligniculture Québec. (2011). Le Guide de Populiculture au Québec - Un guide pratique sur la culture du peuplier hybride: Réseau Ligniculture Québec, 124 p.
- Reubens, B., Poesen, J., Danjon, F., Geudens, G., & Muys, B. (2007). The role of fine and coarse roots in shallow slope stability and soil erosion control with a focus on root system architecture: a review. *Trees*, 21(4), 385-402.
- Ray, D., & Nicoll, B. C. (1998). The effect of soil water-table depth on root-plate development and stability of Sitka spruce. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 71(2), 169-182.
- Rey, F., Ballais, J.-L., Marre, A., & Rovéra, G. (2004). Rôle de la végétation dans la protection contre l'érosion hydrique de surface. *Comptes rendus Géoscience*, 336(11), 991-998.
- Rezaei, S. A., & Gilkes, R. J. (2005). The effects of landscape attributes and plant community on soil chemical properties in rangelands. *Geoderma*, 125(1-2), 167-176.

- Ridolfi, M., & Dreyer, E. (1997). Responses to water stress in an ABA-unresponsive hybrid poplar (*Populus koreana* × *trichocarpa* cv. *Peace*) III. Consequences for photosynthetic carbon assimilation. *New Phytologist*, 135(1), 31-40.
- Riemenschneider, D., & Bauer, E. (1997). Quantitative genetic analysis of adventitious root forming ability in *Populus trichocarpa* (TORR ET. GRAY). In *Biology of Root Formation and Development* (pp. 193-201): Springer.
- RNCAN. (2019). Les minéraux et l'économie. Ottawa : Gouvernement du Canada, ministère des Ressources naturelles. <https://www.rncan.gc.ca/nos-ressources-naturelles/mineraux-exploitation-miniere/faits-sur-les-mineraux-les-metaux/les-mineraux-et-leconomie/20604#indigenous>.
- Robison, D. J., & Raffa, K. F. (1996). Importance of cutting diameter and method of production on early growth hybrid poplar. *Tree Planters Notes*, 47, 76-80.
- Rodrigues, M. I., Bravo, J. P., Sasaki, F. T., Severino, F. E., & Maia, I. G. (2013). The tonoplast intrinsic aquaporin (TIP) subfamily of *Eucalyptus grandis*: characterization of EgTIP2, a root-specific and osmotic stress-responsive gene. *Plant Science*, 213, 106-113.
- Rodríguez, F., Pemán, J., & Aunós, Á. (2010). A reduced growth model based on stand basal area. A case for hybrid poplar plantations in northeast Spain. *Forest Ecology and Management*, 259(10), 2093-2102.
- Rompré, M., & Carrier, D. (1997). *Étude pédologique des sols défrichés de l'Abitibi-Témiscamingue*: Centre de recherche et d'expérimentation en sols, Ministère de l'agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, 133p.
- Rood, S. B., Braatne, J. H., & Hughes, F. M. (2003). Ecophysiology of riparian cottonwoods: stream flow dependency, water relations and restoration. *Tree Physiology*, 23(16), 1113-1124.
- Ruffinoni, C., & Gazelle, F. (1997). Ripsylves et forêts alluviales. Restauration et gestion des ripsylves. *Forêt Entreprise*, 116, 43-49.

- Rytter, R.-M., & Hansson, A.-C. (1996). Seasonal amount, growth and depth distribution of fine roots in an irrigated and fertilized *Salix viminalis L.* plantation. *Biomass and Bioenergy*, 11(2-3), 129-137.
- Sainju, U., & Good, R. (1993). Vertical root distribution in relation to soil properties in New Jersey Pinelands forests. *Plant and Soil*, 150(1), 87-97.
- Sands, R., & Mulligan, D. R. (1990). Water and nutrient dynamics and tree growth. *Forest Ecology and Management*, 30(1-4), 91-111.
- Sani, L., Lisci, R., Moschi, M., Sarri, D., Rimediotti, M., Vieri, M., & Tofanelli, S. (2012). Preliminary experiments and verification of controlled pulling tests for tree stability assessments in Mediterranean urban areas. *Biosystems Engineering*, 112(3), 218-226.
- Schenk, H. J. (2006). Root competition: beyond resource depletion. *Journal of Ecology*, 94(4), 725-739.
- Schmid, I., & Kazda, M. (2002). Root distribution of Norway spruce in monospecific and mixed stands on different soils. *Forest Ecology and Management*, 159(1-2), 37-47.
- Schultz, R. C., Isenhart, T. M., Simpkins, W. W., & Colletti, J. P. (2004). Riparian forest buffers in agroecosystems—lessons learned from the Bear Creek Watershed, central Iowa, USA. *Agroforestry Systems*, 61(1), 35-50.
- Schuurman, J. (1965). Influence of soil density on root development and growth of oats. *Plant and Soil*, 22(3), 352-374.
- Scott, R. E., & Mitchell, S. J. (2005). Empirical modelling of windthrow risk in partially harvested stands using tree, neighbourhood, and stand attributes. *Forest Ecology and Management*, 218(1-3), 193-209.
- Sellier, D., Brunet, Y., & Fourcaud, T. (2008). A numerical model of tree aerodynamic response to a turbulent airflow. *Forestry*, 81(3), 279-297.
- Sena, K. L. (2014). Influence of spoil type on afforestation success and hydrochemical function on a surface coal mine in eastern Kentucky. Thesis, University of Kentucky, Lexington, KY.
- Sharma, J. P., Singh, N. B., & Thakur, S. (2014). Nursery Growth Performance of Newly Developed Superior Clones of Poplar (*Populus deltoides Bartr. Ex Marsh*). *Journal of Tree Sciences*, 33(2), 7-16.

- Sheedy, G. (1996). La stabilité des plantations: résultats des évaluations réalisées en 1989 et en 1994 dans six plantations de pin gris de l'Abitibi. Note de recherche forestière no. 69. Direction de la recherche forestière, Québec, 10 p.
- Sidhu, D., & Dhillon, G. (2007). Field performance of ten clones and two sizes of planting stock of *Populus deltoides* on the Indo-gangetic plains of India. *New Forests*, 34(2), 115-122.
- Siemens, J. A., & Zwiazek, J. J. (2003). Effects of water deficit stress and recovery on the root water relations of trembling aspen (*Populus tremuloides*) seedlings. *Plant Science*, 165(1), 113-120.
- Silva, F. C. E., Shvaleva, A., Maroco, J., Almeida, M., Chaves, M., & Pereira, J. (2004). Responses to water stress in two *Eucalyptus globulus* clones differing in drought tolerance. *Tree Physiology*, 24(10), 1165-1172.
- Silva, J. S., & Rego, F. C. (2003). Root distribution of a Mediterranean shrubland in Portugal. *Plant and Soil*, 255(2), 529-540.
- Skousen, J., Ziemkiewicz, P., & Venable, C. (2006). Tree recruitment and growth on 20-year-old, unreclaimed surface mined lands in West Virginia. *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, 20(2), 142-154.
- Snowdon, P., Raison, R., Keith, H., Ritson, P., Grierson, P., Adams, M., Montagu, K., Bi, H., Burrows, W., Eamus, D. (2002). Protocol for sampling tree and stand biomass. National Carbon Accounting System Technical Report No. 14. Australian Greenhouse Office, Canberra.
- Society for Ecological Restoration Science & Policy Working Group. (2002). The SER primer on ecological restoration. <http://www.ser.org/>.
- Son, D., Compaoré, E., Bonkoungou, S., & Sangaré, S. (2011). Effet du stress hydrique sur la croissance et la production du sésame (*Sesamum indicum*). *Journal of Applied Biosciences*, 37, 2460-2467.
- Souch, C., & Stephens, W. (1998). Growth, productivity and water use in three hybrid poplar clones. *Tree Physiology*, 18(12), 829-835.

- Stape, J. L., Binkley, D., Ryan, M. G., Fonseca, S., Loos, R. A., Takahashi, E. N., . . Ferreira, J. M. d. A. (2010). The Brazil Eucalyptus Potential Productivity Project: Influence of water, nutrients and stand uniformity on wood production. *Forest Ecology and Management*, 259(9), 1684-1694.
- Stokes, A. (2002). Biomechanics of tree root anchorage. *Plant roots: the hidden half*. 3rd edn. Marcel Dekker, New York, 175-186.
- Stokes, A. (1999). Strain distribution during anchorage failure of Pinus pinaster Ait. at different ages and tree growth response to wind-induced root movement. *Plant and Soil*, 217(1), 17-27.
- Stokes, A., Ball, J., Fitter, A., Brain, P., & Coutts, M. (1996). An experimental investigation of the resistance of model root systems to uprooting. *Annals of Botany*, 78(4), 415-421.
- Stokes, A., Fitter, A., & Courts, M. (1995). Responses of young trees to wind and shading: effects on root architecture. *Journal of Experimental Botany*, 46(9), 1139-1146.
- Stokes, A., Spanos, I., Norris, J. E., & Cammeraat, E. (2007). *Eco-and Ground Bio-engineering: the Use of Vegetation to Improve Slope Stability: Proceedings of the First International Conference on Eco-engineering 13-17 September 2004* (Vol. 103): Springer Science & Business Media.
- Stone, E. L., & Kalisz, P. J. (1991). On the maximum extent of tree roots. *Forest Ecology and Management*, 46(1-2), 59-102.
- Strong, W., & La Roi, G. (1985). Root density-soil relationships in selected boreal forests of central Alberta, Canada. *Forest Ecology and Management*, 12(3-4), 233-251.
- Strong, W. L. (2000). Vegetation development on reclaimed lands in the Coal Valley Mine of western Alberta, Canada. *Canadian Journal of Botany*, 78(1), 110-118.
- Styczen M, Morgan R. (1995). Engineering properties of vegetation. In: Morgan RPC, Rickson RJ, editors. *Slope stabilization and erosion control: a bioengineering approach*. New York: Springer; p. 5–58.

- Sudmeyer, R., Speijers, J., & Nicholas, B. (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(12), 1333-1346.
- Sylvain, Z. A., & Mosseler, A. (2017). Use of shrub willows (*Salix spp.*) to develop soil communities during coal mine restoration. *Canadian Journal of Forest Research*, 47(12), 1687-1694.
- Tardieu, F. (1996). Drought perception by plants do cells of droughted plants experience water stress? *Plant Growth Regulation*, 20(2), 93-104.
- Tardieu, F., Reymond, M., Hamard, P., Granier, C., & Muller, B. (2000). Spatial distributions of expansion rate, cell division rate and cell size in maize leaves: a synthesis of the effects of soil water status, evaporative demand and temperature. *Journal of Experimental Botany*, 51(350), 1505-1514.
- Tardieu, F., & Simonneau, T. (1998). Variability among species of stomatal control under fluctuating soil water status and evaporative demand: modelling isohydric and anisohydric behaviours. *Journal of Experimental Botany*, 49(330), 419-432.
- Tardieu, F., & Tuberosa, R. (2010). Dissection and modelling of abiotic stress tolerance in plants. *Current Opinion in Plant Biology*, 13(2), 206-212.
- Taylor, H., Upchurch, D., & McMichael, B. (1990). Applications and limitations of rhizotrons and minirhizotrons for root studies. *Plant and Soil*, 129(1), 29-35.
- Tejada, M., & Gonzalez, J. (2007). Influence of organic amendments on soil structure and soil loss under simulated rain. *Soil and Tillage Research*, 93(1), 197-205.
- Terry, N., & Banuelos, G. S. (2020). Phytoremediation of contaminated soil and water: CRC Press LLC, Boca Raton, FL, USA. <http://dx.doi.org/10.1.1.467.809>
- Théroux Rancourt, G., Éthier, G., & Pepin, S. (2015). Greater efficiency of water use in poplar clones having a delayed response of mesophyll conductance to drought. *Tree Physiology*, 35(2), 172-184.

- Thiffault, N. (2004). Stock type in intensive silviculture: a (short) discussion about roots and size. *The Forestry Chronicle*, 80(4), 463-468.
- Thiffault, N. (2010). Stabilité mécanique et caractéristiques racinaires de plants de fortes dimensions de *Picea mariana* produits en récipients ou à racines nues. *The Forestry Chronicle*, 86(4), 469-476.
- Thiffault, N., Jobidon, R., & Munson, A. D. (2014). Comparing large containerized and bareroot conifer stock on sites of contrasting vegetation composition in a non-herbicide scenario. *New Forests*, 45(6), 875-891.
- Thomas, S. M., Whitehead, D., Adams, J. A., Reid, J. B., Sherlock, R. R., & Leckie, A. C. (1996). Seasonal root distribution and soil surface carbon fluxes for one-year-old *Pinus radiata* trees growing at ambient and elevated carbon dioxide concentration. *Tree Physiology*, 16(11-12), 1015-1021.
- Toillon, J., Fichot, R., Dallé, E., Berthelot, A., Brignolas, F., & Marron, N. (2013). Planting density affects growth and water-use efficiency depending on site in *Populus deltoides* × *P. nigra*. *Forest Ecology and Management*, 304, 345-354.
- Tordoff, G., Baker, A., & Willis, A. (2000). Current approaches to the revegetation and reclamation of metalliferous mine wastes. *Chemosphere*, 41(1-2), 219-228.
- Trubat, R., Cortina, J., & Vilagrosa, A. (2006). Plant morphology and root hydraulics are altered by nutrient deficiency in *Pistacia lentiscus* (L.). *Trees*, 20(3), 334.
- Tschaplinski, T., & Blake, T. (1989). Correlation between early root production, carbohydrate metabolism, and subsequent biomass production in hybrid poplar. *Canadian Journal of Botany*, 67(7), 2168-2174.
- Tschaplinski, T., & Blake, T. (1989). Water relations, photosynthetic capacity, and root/shoot partitioning of photosynthate as determinants of productivity in hybrid poplar. *Canadian Journal of Botany*, 67(6), 1689-1697.
- Van Oosten, C. (2000). Activities related to poplar and willow cultivation and utilization in Canada: report to the 21st Session of the International Poplar Commission Portland, Oregon, USA, September 24-28, 2000.

- Vidal-Beaudet, L., Galopin, G., & Grosbellet, C. (2018). Effect of organic amendment for the construction of favourable urban soils for tree growth. *European Journal of Horticultural Science*, 83(3), 173-186.
- Vogelsang, C., Grung, M., Jantsch, T. G., Tollesen, K. E., & Liltved, H. (2006). Occurrence and removal of selected organic micropollutants at mechanical, chemical and advanced wastewater treatment plants in Norway. *Water Research*, 40(19), 3559-3570.
- Volney, W. J. A., & Hirsch, K. G. (2005). Disturbing forest disturbances. *The Forestry Chronicle*, 81(5), 662-668.
- Wada, Y., Van Beek, L., Vivioli, D., Dürr, H. H., Weingartner, R., & Bierkens, M. F. (2011). Global monthly water stress: 2. Water demand and severity of water stress. *Water Resources Research*, 47(7).
- Wang, C., Bond-Lamberty, B., & Gower, S. T. (2003). Carbon distribution of a well-and poorly-drained black spruce fire chronosequence. *Global Change Biology*, 9(7), 1066-1079.
- Wang, G., & Zhou, D. (2009). Fine root characteristic changes of pioneer community with plant succession in abandoned croplands in the Loess Gully Region, China. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 29(2), 356-364.
- Welham, C., Van Rees, K., Seely, B., & Kimmins, H. (2007). Projected long-term productivity in Saskatchewan hybrid poplar plantations: weed competition and fertilizer effects. *Canadian Journal of Forest Research*, 37(2), 356-370.
- Whipps, J. M. (2004). Prospects and limitations for mycorrhizas in biocontrol of root pathogens. *Canadian Journal of Botany*, 82(8), 1198-1227.
- White, R. G., & Kirkegaard, J. A. (2010). The distribution and abundance of wheat roots in a dense, structured subsoil—implications for water uptake. *Plant, Cell & Environment*, 33(2), 133-148.
- Widana, A. (2019). The Impacts of Mining Industry: Socio-Economics and Political Impacts. Available at SSRN 3423562.
- Wiehle, M., Eusemann, P., Thevs, N., & Schnittler, M. (2009). Root suckering patterns in *Populus euphratica* (Euphrates poplar, *Salicaceae*). *Trees*, 23(5), 991-1001.

- Wilkins, O., Waldron, L., Nahal, H., Provart, N. J., & Campbell, M. M. (2009). Genotype and time of day shape the *Populus* drought response. *The Plant Journal*, 60(4), 703-715.
- Woodruff, D. R., Bond, B. J., Ritchie, G. A., & Scott, W. (2002). Effects of stand density on the growth of young Douglas-fir trees. *Canadian Journal of Forest Research*, 32(3), 420-427.
- Worlanyo, A. S., & Jiangfeng, L. (2021). Evaluating the environmental and economic impact of mining for post-mined land restoration and land-use: A review. *Journal of Environmental Management*, 279, 111623.
- Wu, Q., Wu, J., Zheng, B., & Guo, Y. (2018). Optimizing soil-coring strategies to quantify root-length-density distribution in field-grown maize: virtual coring trials using 3-D root architecture models. *Annals of Botany*, 121(5), 809-819.
- Wu, R., & Stettler, R. (1994). Quantitative genetics of growth and development in *Populus*. I. A three-generation comparison of tree architecture during the first 2 years of growth. *Theoretical and Applied Genetics*, 89(7), 1046-1054.
- Xia, H. (2004). Ecological rehabilitation and phytoremediation with four grasses in oil shale mined land. *Chemosphere*, 54(3), 345-353.
- Yan, Y., Fang, S., Tian, Y., Deng, S., Tang, L., & Chuong, D. N. (2015). Influence of tree spacing on soil nitrogen mineralization and availability in hybrid poplar plantations. *Forests*, 6(3), 636-649.
- Yang, M., Défossez, P., Danjon, F., & Fourcaud, T. (2014). Tree stability under wind: simulating uprooting with root breakage using a finite element method. *Annals of Botany*, 114(4), 695-709.
- Yang, M., Défossez, P., Danjon, F., & Fourcaud, T. (2018). Analyzing key factors of roots and soil contributing to tree anchorage of *Pinus* species. *Trees*, 32(3), 703-712.
- Yim, J.-E., & Kim, I.-S. (2002). Morphological and cellular characteristics of aerial roots in the epiphytic American ivy (*Parthenocissus* sp.). *Applied Microscopy*, 32(4), 329-337.
- York, L. M., Nord, E., & Lynch, J. (2013). Integration of root phenes for soil resource acquisition. *Frontiers in Plant Science*, 4, 355.

- Zalesny, J. A., Zalesny Jr, R. S., Wiese, A. H., & Hall, R. B. (2007). Choosing tree genotypes for phytoremediation of landfill leachate using phyto-recurrent selection. *International Journal of Phytoremediation*, 9(6), 513-530.
- Zandalinas, S. I., Mittler, R., Balfagón, D., Arbona, V., & Gómez-Cadenas, A. (2018). Plant adaptations to the combination of drought and high temperatures. *Physiologia Plantarum*, 162(1), 2-12.
- Zeng, H. (2006). Influence of clear-cutting on the risk of wind damage at forest edges: A gis-based integrated models approach. *University of Joensuu, Faculty of Forestry. Dissertationes Forestales*, 16.
- Zeng, H., Peltola, H., Talkkari, A., Venäläinen, A., Strandman, H., Kellomäki, S., & Wang, K. (2004). Influence of clear-cutting on the risk of wind damage at forest edges. *Forest Ecology and Management*, 203(1-3), 77-88.
- Zhang, L., Liu, L., Zhao, H., Jiang, Z., & Cai, J. (2020). Differences in near isohydric and anisohydric behavior of contrasting poplar hybrids (i-101 (*populus alba l.*) \times 84k (*populus alba l.* \times *populus glandulosa uyeki*)) under drought-rehydration treatments. *Forests*, 11(4), 402.
- Zhang, X., Zang, R., & Li, C. (2004). Population differences in physiological and morphological adaptations of *Populus davidiana* seedlings in response to progressive drought stress. *Plant Science*, 166(3), 791-797.
- Zhou, R.-L., Li, Y.-Q., Zhao, H.-L., & Drake, S. (2008). Desertification effects on C and N content of sandy soils under grassland in Horqin, northern China. *Geoderma*, 145(3-4), 370-375.
- Zipper, C. E., Burger, J. A., Skousen, J. G., Angel, P. N., Barton, C. D., Davis, V., & Franklin, J. A. (2011). Restoring forests and associated ecosystem services on Appalachian coal surface mines. *Environmental Management*, 47(5), 751-765.
- Zsuffa, L., Giordano, E., Pryor, L. D., & Stettler, R. F. (1996). Trends in poplar culture: some global and regional perspectives. *Biology of Populus and its Implications for Management and Conservation*, (Part II), 515-539.