

SIMON BOUDREULT

**Effets des propriétés physiques et chimiques des
substrats sur la croissance et le développement de plants
d'épinette blanche en récipient après une saison de
culture**

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

DÉPARTEMENT DES SOLS ET DE GÉNIE AGROALIMENTAIRE
FACULTÉ DES SCIENCES DE L'AGRICULTURE ET DE L'ALIMENTATION
UNIVERSITÉ LAVAL
QUÉBEC

2010

Résumé

Au Québec, chaque année, des millions de plants forestiers produits en récipient sont rejetés à cause de leur système racinaire déficient. Afin de vérifier l'effet du substrat sur cette problématique, le premier objectif était de caractériser les propriétés physiques et chimiques des substrats utilisés par huit pépinières forestières. La masse volumique apparente (MVA), la granulométrie des particules, la teneur en air (θ_a), la conductivité hydraulique saturée (Ks), le coefficient d'efficacité des pores (γ) et un indice de diffusivité relative des gaz ($D_s D_0^{-1}$) ont été mesurés. Le pH, la conductivité électrique (CE), et la capacité d'échange cationique effective (CEC_{eff}) des substrats, ainsi que leurs contenus en éléments nutritifs (N-NH₄, N-NO₂₋₃, P, K, Ca, Mg) ont été mesurés. De plus, les variables de croissance des plants ont été évaluées après une saison de croissance. Les pépinières ont présenté d'importantes variations au niveau de la croissance des plants et des propriétés du substrat. θ_a et Ks mesurées à la fin de la saison de croissance étaient corrélées négativement avec (i) la masse sèche de la partie aérienne des plants et (ii) le diamètre au collet. La MVA était toutefois corrélée positivement avec la masse racinaire. L'aération des substrats n'a pas limité la croissance des plants malgré des valeurs de $D_s D_0^{-1}$ faibles pour certains substrats (<0.005).

Le second objectif visait à vérifier, au cours de deux années de production (2008 et 2009), les effets des propriétés physiques et chimiques sur la croissance et le développement des plants d'épinette blanche (1+0) cultivés dans plusieurs substrats composés de tourbe grossière et fine (<0.5 mm), de perlite et de vermiculite. Les substrats ont affecté les variables de croissance. En 2008, l'augmentation de la porosité d'air (θ_a) a eu un effet négatif sur la croissance alors qu'en 2009, la croissance était affectée par une réduction du coefficient d'efficacité des pores (γ) dans les substrats. Selon les résultats de cette étude, la valeur optimale de $D_s D_0^{-1}$ recommandée pour la culture de l'épinette blanche en récipient serait comprise entre 0.003 et 0.016 et θ_a située entre 0.07 et 0.14 cm³ cm⁻³.

Table des matières

<u>RÉSUMÉ</u>	
<u>TABLE DES MATIÈRES REMERCIEMENTS</u>	i
<u>LISTE DES TABLEAUX</u>	iii
<u>LISTE DES FIGURES</u>	v
<u>REMERCIEMENT</u>	vii
<u>INTRODUCTION GÉNÉRALE</u>	1
CONTEXTE DE LA RECHERCHE	1
HYPOTHÈSES DE RECHERCHE	3
<u>CHAPITRE 1. REVUE DE LITTÉRATURE</u>	4
1.1 L'INSUFFISANCE RACINAIRE, UNE PROBLÉMATIQUE AUX CAUSES MULTIPLES	4
1.2 SPÉCIFICITÉS ET EXIGENCES DE L'ÉPINETTE BLANCHE (PICEA GLAUCA (MOENCH) VOSS)	5
1.3 LES PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DES SUBSTRATS	6
1.4 LES ADDITIFS : LA VERMICULITE ET LA PERLITE	9
1.5 LES PROPRIÉTÉS CHIMIQUES	10
1.6 ÉVOLUTION DES PROPRIÉTÉS DU SUBSTRAT DURANT LA PÉRIODE DE CROISSANCE	12
1.7 CONCLUSION	12

**CHAPITRE 2. CARACTÉRISATION DES PROPRIÉTÉS PHYSIQUES ET
CHIMIQUES DES SUBSTRATS D'EMPOTAGE UTILISÉS PAR 8
PÉPINIÈRES FORESTIÈRES DU QUÉBEC : EFFETS SUR LA CROISSANCE
ET LE DÉVELOPPEMENT DES PLANTS D'ÉPINETTE BLANCHE (1+0) 14**

2.1	RÉSUMÉ	14
2.2	INTRODUCTION	15
2.3	MATÉRIEL ET MÉTHODES	16
2.3.1	DESCRIPTION DES SITES D'ÉTUDE	16
2.3.2	RÉGIES DE CULTURE	17
2.3.3	ANALYSE DES PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DES SUBSTRATS	17
2.3.4	ANALYSE DES PROPRIÉTÉS CHIMIQUES DES SUBSTRATS	22
2.3.5	ÉVALUATION DES PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DES SUBSTRATS, DE LA CROISSANCE ET DU DÉVELOPPEMENT DES PLANTS (1+0)	23
2.3.6	ÉVALUATION DE LA TENEUR EN ÉLÉMENTS MINÉRAUX DES TISSUS	23
2.3.7	ANALYSES STATISTIQUES	23
2.4	RÉSULTATS	24
2.5	DISCUSSION	25
2.6	CONCLUSION	30
2.7	TABLEAUX ET FIGURES	31

**CHAPITRE 3. EFFETS DES PROPRIÉTÉS PHYSIQUES ET CHIMIQUES DES
SUBSTRATS SUR LA CROISSANCE ET LE DÉVELOPPEMENT DE SEMIS
D'ÉPINETTE BLANCHE PRODUITS EN PÉPINIÈRE FORESTIÈRE 40**

3.1	RÉSUMÉ	40
3.2	INTRODUCTION	41
3.3	MÉTHODOLOGIE	42
3.3.1	FABRICATION DES SUBSTRATS	42

3.3.2	RÉGIES DE CULTURE	43
3.3.3	CARACTÉRISATION DES PROPRIÉTÉS PHYSIQUES ET CHIMIQUES	44
3.3.4	CROISSANCE DES PLANTS ET CONTENU EN ÉLÉMENTS MINÉRAUX	44
3.3.5	ANALYSES STATISTIQUES	45
3.4	RÉSULTATS	45
3.4.1	ESSAI 2008	45
3.4.2	ESSAI 2009	48
3.4.3	ANALYSES DE RÉGRESSION MULTIPLE	50
3.5	DISCUSSION	51
3.6	CONCLUSION	56
3.7	TABLEAUX ET FIGURES	57
	<u>CONCLUSION GÉNÉRALE</u>	<u>70</u>
	<u>RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES</u>	<u>72</u>
	<u>ANNEXE 1</u>	<u>80</u>

Liste des tableaux

Tableau 1.1 Exemples de CEC et de pH pour plusieurs ingrédients employés pour la confection de substrats artificiels.	12
Tableau 2.1 Dose en éléments majeurs appliqués par plant durant la période de culture étudiée, localisation géographique des pépinières à l'étude, degrés-jours de croissance et dates de semis en 2008 des plants d'épinette blanche selon la pépinière de provenance.	31
Tableau 2.2 Composition du substrat, type de mélangeur employé et moyennes des propriétés physico-chimiques des substrats (n=5) à l'état frais selon la pépinière de provenance au printemps 2008.....	31

Tableau 2.3 Valeur moyenne (n=3) des variables morphologiques des plants d'épinette blanche (1+0) selon leur pépinière de provenance (M_AER = Masse sèche aérienne, M_RAC = Masse sèche des racines, H = Hauteur, D = Diamètre et H/D = Rapport hauteur (cm) / diamètre (mm)).....	33
Tableau 2.4 Concentration en éléments nutritifs (N, P, K, Ca et Mg) (g kg^{-1}) dans les racines et la partie aérienne.....	34
Tableau 2.5 Moyenne des diamètres moyens pondérés des particules (MWD) et contenu en particules de diamètre situé entre 1 et 4 mm et inférieur à 0.5 mm des substrats à l'état frais..	35
Tableau 2.6 Propriétés physiques moyennes des substrats à l'état frais : la conductivité hydraulique saturée (K_s), la masse volumique apparente (MVA), la porosité totale (TP), la teneur en air à capacité en pot (θ_a), l'eau facilement utilisable (EFU), l'estimation du coefficient d'efficacité des pores (γ) et la diffusivité relative des gaz ($D_s D_0^{-1}$).....	37
Tableau 2.7 Coefficients de corrélation de Pearson ^a entre les valeurs moyennes des variables morphologiques et les propriétés physiques des substrats.....	38
Tableau 3.1 Composition des substrats ($\% \text{ v v}^{-1}$) pour les essais effectués en 2008 et 2009.	57
Tableau 3.2 Hauteur (H), diamètre au collet racinaire (D), et masse sèche de la partie aérienne (M_AER) et racinaire (M_RAC) des plants après une saison de croissance (1+0) pour les essais effectués en 2008 et 2009.....	58
Tableau 3.3 Contenu en éléments nutritifs (N P, K, Ca et Mg) en mg par plant pour les parties racinaire et aérienne.	59
Tableau 3.4 Propriétés physiques des substrats au début et à la fin de la saison de croissance (MVA = masse volumique apparente, MWD = diamètre moyen pondéré des particules, 0_0.5mm = % de particules inférieures à 0.5 mm, 1_4mm = % dont la dimension est située entre 1 et 4 mm. EFU = eau facilement utilisable, EU = eau utilisable).....	60
Tableau 3.5 Propriétés chimiques des substrats au début et à la fin de la saison de croissance. Essais 2008 et 2009. (1/2)	62

Tableau 3.6 Propriétés chimiques des substrats au début et à la fin de la saison de croissance. Essais 2008 et 2009. (2/2)	63
--	----

Liste des figures

Figure 2.1 Insertion horizontale de la sonde TDR dans le récipient	32
Figure 2.2 Fraction pondérale des classes granulométriques des substrats. Erreur ! Signet non défini. 35	
Figure 2.3 Courbe de désorption de l'eau des substrats à l'état frais.	36
Figure 2.4 Augmentation de la masse sèche des racines en fonction de l'augmentation de la masse volumique apparente.	39
Figure 2.5 Effet de la teneur en air sur la masse sèche aérienne	39
Figure 3.1 Distribution de la fréquence cumulative du potentiel matriciel des substrats au cours de la saison de croissance 2008 (mesures réalisées entre les jours 220 et 283).	66
Figure 3.2 Distribution de la fréquence cumulative du potentiel matriciel des substrats au cours de la saison de croissance 2009 (mesures réalisées entre les jours 166 et 255).	66
Figure 3.3 Distribution de fréquence cumulative de la teneur en air (θ_a) des six substrats étudiés en 2009. La porosité d'air fut calculée à partir du potentiel matriciel mesuré durant la période de croissance.	67
Figure 3.4 Distribution de fréquence cumulative de $D_s D_0^{-1}$ des substrats étudiés en 2009. La diffusivité relative des gaz fut calculée à partir du potentiel matriciel mesuré durant la période de croissance.	67
Figure 3.5 Effet de la teneur en air du substrat mesurée après confection sur la masse racinaire des plants d'épinette blanche en 2008.	68

Figure 3.6 Effet du coefficient d'efficacité des pores mesuré après confection sur la masse des racines de l'épinette blanche en 2009.68

Figure 3.7 Effet de $D_3D_0^{-1}$ estimée en 2008 et 2009 sur la masse racinaire standardisée de l'épinette blanche. Une courbe de rendement maximum, tracée selon la méthode des points de bordure, a été utilisée pour déterminer la zone de $D_3D_0^{-1}$ la plus susceptible d'offrir une croissance racinaire maximale.69

Remerciements

En premier lieu, j'aimerais remercier mon directeur de recherche Steeve Pepin ainsi que mes codirecteurs Jean Caron et Mohammed S. Lamhamedi. Votre soutien lors de la réalisation de mes travaux fut très apprécié. J'ai trouvé très motivant de travailler dans une équipe multidisciplinaire aussi qualifiée. J'ai beaucoup appris dans chacun de vos champs d'études respectifs et vous m'avez donné le goût de la recherche. Je remercie l'organisme subventionnaire, Le Fonds québécois de la recherche sur la nature et les technologies pour l'appui financier apporté sans quoi rien n'eut été possible. Je remercie également Luc Godin de Pampev et l'équipe de production de plant de la pépinière Pampev. Un merci tout particulier à Luc Godin, Bertrand Fecteau et Isabelle Villeneuve pour l'accueil et le support apporté lors de l'installation du dispositif à la pépinière Pampev et les travaux subséquents.

Je remercie les auxiliaires de recherche avec qui j'ai travaillé lors de ces deux années : Marie-Ève Giroux, Andrée-Ann Prince et Anne-Isabelle Bonifassi. Vous avez accompli un excellent travail. Votre soutien et les discussions que nous avons partagées ont certainement permis l'avancement de ce projet. Je remercie aussi Carole Boily pour l'aide apportée et Mario Renaud et Pascal Desjardins de la Direction de la recherche forestière du Ministère des Ressources naturelles et de la Faune pour leur soutien technique. Un gros merci aussi à plusieurs étudiants du CRH, dont mon collègue Ian Paiement avec qui j'ai pu partager et enrichir ma formation. Je remercie finalement mes proches pour leur appui constant au cours de ces deux années. Marie-Hélène, pour son amour, son humour, son soutien. Merci, à mes parents qui ont su faire grandir en moi la curiosité et l'intérêt pour l'horticulture. Votre jardin en Gaspésie fut mon premier laboratoire.

Introduction générale

Contexte de la recherche

La production de plants forestiers au Québec est gérée par le ministère des Ressources naturelles et de la Faune (MRNF) et vise à permettre l'approvisionnement en plants forestiers de qualité aux compagnies forestières, bénéficiaires de contrat d'approvisionnement et d'aménagement forestier (CAAF) pour le reboisement du territoire public. Le MRNF fournit aussi les plants forestiers aux organismes du secteur de la forêt privée et aux propriétaires de boisés privés de plus de quatre hectares. L'objectif visé par le ministère est d'améliorer la forêt, d'assurer le maintien de la ressource ligneuse et le maintien ou la création d'emplois reliés à ce secteur. Sur le territoire du Québec, 24 pépinières (6 publiques et 18 privées) sont chargées de la production des plants. L'objectif annuel de production en 2008 était de l'ordre de 150 millions de plants dont 98 % de résineux et 2 % de feuillus (MRNF, 2009). Les plants résineux sont principalement produits en récipients multi-cavités alors que les feuillus sont plutôt des plants à racines nues. Le volume des cavités des récipients employés varie (25, 50, 110, 200 et > 300 cm³) selon la dimension désirée du plant qui est fixée par les conditions du site de reboisement (MRNF, 2009).

En 2007, plus de 34 millions de plants résineux de fortes dimensions (PFD) (cavité >300 cm³) ont été mis en terre. L'utilisation de ces plants a débuté suite à l'engagement du gouvernement dans le développement de nouvelles approches d'aménagement forestier dans la Stratégie de protection des forêts (1994). Possédant une bonne résistance à la concurrence végétale, l'utilisation du PFD se voulait une nouvelle approche pour remplacer l'emploi de phytocides dans le contrôle des espèces compétitrices. Le PFD est un plant âgé d'environ deux ans au moment de sa livraison. La première année de production est réalisée sous tunnel et les conditions de culture sont contrôlées (irrigation, fertilisation, température et photopériode). À la fin de la première saison de croissance, les plants sont placés à l'extérieur où ils passent l'hiver puis leur deuxième saison de croissance. Là encore, les conditions de culture sont contrôlées (irrigation et fertilisation) bien que les conditions soient alors plus variables et sujettes à la rigueur du climat québécois.

Les plants livrés aux différents utilisateurs doivent répondre à 24 critères de qualité morphologique et physiologique précis, définis par la Direction générale des pépinières et des stations piscicoles (DGPSP) du MRNF. Au Québec, ces critères de qualité sont reconnus comme

étant généralement élevés, de façon à assurer la survie et une croissance optimale des plants sur les sites de reboisement. Parmi ces critères, l'insuffisance racinaire (critère 01) est celui qui a constitué la principale cause de disqualification de plants (PFD) d'épinette blanche lors des inventaires de qualification automnale et à la livraison (respectivement 15 et 6.5 % des plants) entre 2005 et 2009 (Tourigny, 2009). L'insuffisance racinaire se caractérise par une trop faible quantité de racines vivantes et s'évalue principalement par le degré de colonisation de la carotte de tourbe. Le système racinaire doit être suffisamment développé pour permettre l'extraction complète de la carotte et pour résister aux manipulations normales qui sont inhérentes à la mise en terre du plant (DGPSP, 2009). Le rejet d'un nombre important de plants entraîne une réduction de la rentabilité des pépinières privées. Cette problématique entraîne aussi un gaspillage des ressources comme l'eau, les engrais et le substrat de culture.

Plusieurs études ont été réalisées dans le but d'accroître la croissance racinaire des plants d'épinette blanche. Tant au niveau de l'irrigation et de la fertilisation des plants (Lamhamedi *et al.*, 1997; Girard *et al.*, 2001; Lamhamedi *et al.*, 2006) qu'au niveau de la génétique des familles de provenance des plants (Carles *et al.*, 2007). Ces travaux ont mené à une amélioration notable de la croissance des plants. Toutefois, l'insuffisance racinaire demeure la principale cause de rejet des plants. Les travaux de recherche relatifs à ce mémoire se penchent sur les effets des propriétés physiques et chimiques des substrats utilisés par les pépinières forestières du Québec sur la croissance et le développement de l'épinette blanche après une saison de croissance.

Le premier chapitre consiste en une revue de littérature qui dresse un portrait des principales propriétés physiques et chimiques des substrats artificiels employés et de leurs effets sur la croissance et le développement des plants forestiers et horticoles. La deuxième partie (chapitre 2) avait pour objectif de caractériser les propriétés physiques et chimiques des substrats employés par huit pépinières forestières du Québec au cours de l'année de culture 2008. Le troisième chapitre décrit une expérience en conditions contrôlées visant la culture des plants d'épinette blanche produits en récipient 25-310 pendant une saison de croissance (plants 1 +0), dans plusieurs substrats de mousse de tourbe de sphaigne composés de tourbes grossière et fine (<0.5 mm), de perlite et de vermiculite. Les effets des constituants des substrats sur les propriétés physiques et chimiques du substrat d'emportage ont été évalués. De plus, les effets de ces propriétés du substrat sur la croissance des plants ont été évalués.

L'originalité de ce travail réside en la détermination *in situ* du coefficient d'efficacité des pores et de la diffusivité relative des gaz qui n'ont jamais été mesurés dans les substrats utilisés pour la culture de plants forestiers en récipient. Ces indices d'aération ont démontré leur supériorité comme indice de qualité des substrats (Allaire *et al.*, 1996; Nkongolo et Caron, 2006a). De plus, les résultats présentés dans ce mémoire sont tirés d'expériences menées à une échelle opérationnelle et sont donc hautement représentatifs des conditions de culture présentes dans l'industrie québécoise de la production de plants.

Hypothèses de recherche

Les hypothèses de recherche ayant été utilisées dans le cadre de ce travail sont les suivantes :

1. Il existe une variabilité au niveau des propriétés physiques et chimiques des substrats d'empotage utilisés par les pépinières forestières pour la culture de l'épinette blanche en récipient 25-310.
2. La confection de substrats avec différentes composantes [tourbes plus ou moins humifiées, particules fines (<0.5 mm) et grossières (>0.5 mm), perlite et vermiculite] entraîne une modification des propriétés physiques et chimiques de ceux-ci.
3. Les variations des propriétés physiques et chimiques des substrats, principalement les propriétés physiques, ont un effet sur la croissance et le développement des plants d'épinette blanche (1+0) produits en récipient 25-310.
4. La croissance racinaire peut être améliorée par optimisation des propriétés physiques et chimiques du substrat d'empotage.

Chapitre 1. Revue de littérature

1.1 L'insuffisance racinaire, une problématique aux causes multiples

Les causes de l'insuffisance racinaire sont multiples. Dans les pépinières au climat froid comme le Québec, l'insuffisance racinaire peut avoir été causée par le gel (DGPSP, 2009). Toutefois, l'épinette blanche présente une bonne résistance au gel (jusqu'à -20 °C) lorsqu'elle est soumise à un durcissement du plant à l'automne par réduction de la teneur en eau du substrat (Lamhamedi *et al.*, 2001; Lamhamedi *et al.*, 2004; Bigras et Dumais, 2005). Cela a pour effet de ralentir la croissance des racines, réduisant ainsi le nombre de jeunes racines plus susceptibles de geler durant l'hiver. Les teneurs en eau élevées au cours de la période d'endurcissement, par exemple au cours de l'automne pour les plants situés à l'extérieur, pourraient réduire la période d'endurcissement (Bigras et Dumais, 2005).

Par ailleurs, la croissance racinaire est sous contrôle génétique (Kormanik *et al.*, 1990; Danjon *et al.*, 2000; Mari *et al.*, 2003; Carles *et al.*, 2007). Carles *et al.* (2007) ont expliqué que l'influence de la famille dont est issu le lot de semences d'épinette blanche avait un effet significatif sur la masse sèche des racines après une année de croissance (1+0). La croissance de la partie aérienne, le contenu en N, P et K des tissus, la hauteur des plants ainsi que le ratio de la masse sèche des racines et des parties aériennes exprimaient aussi une variabilité causée par la famille des plants 1+0. Par contre, l'effet de la famille ne s'est pas montré significatif pour ce qui est des plants ayant terminé leur deuxième année de croissance (2+0) (Carles *et al.*, 2007). Il semble que le volume restreint de la cavité et l'espace entre les plants limitent le plein développement des meilleurs sujets.

Parmi les autres facteurs pouvant conduire à l'insuffisance racinaire, on retrouve la pourriture racinaire qui est une maladie importante touchant particulièrement l'épinette noire, l'épinette rouge et l'épinette blanche. Les champignons *Cylindrocarpon destructans*, *Fusarium* spp., *Cylindrocladium floridanum*, *Phytophthora* spp. et *Pythium* spp. sont les agents responsables de la pourriture racinaire des plants cultivés en récipients. Les deux premiers de ces agents pathogènes, *C. destructans* et *Fusarium* spp., sont les plus répandus et ils sont aussi ceux qui causent le plus de pertes (Landis *et al.*, 1989c; MRN, 1997). L'infection prend différentes formes selon le champignon. Celle impliquant *Fusarium* spp. sont parmi les plus fréquentes et les plus

dommageables des causes de pourriture racinaire dans les pépinières. Ce champignon prolifère dans des conditions chaudes et humides souvent présentes dans les récipients de culture et en serre. Il s'attaque fréquemment aux plants soumis à des stress environnementaux (sécheresse, choc thermique ou substrat trop humide). Les symptômes se caractérisent par un dépérissement du semis : feuillage pâle et aiguilles recourbées. La racine affectée présente une absence de racines fines (radicelles). Bien qu'il ne soit pas responsable de la maladie, la sélection d'un substrat favorisant une bonne croissance racinaire peut réduire l'impact et les pertes causées par l'infection (Landis *et al.*, 1989c). L'infection à *Pythium spp.* se développe à partir de la pointe des racines ce qui fait que les plants infectés présentent une faible quantité de racines latérales. *Phytophthora spp.* est plutôt détectable par une coloration foncée des racines. La perte de la capacité racinaire est accompagnée de symptômes de dépérissement et chlorose du feuillage. En anglais, les infections à *Pythium spp.* et *Phytophthora spp.* sont nommées « water molds », car les champignons qui causent la maladie possèdent des spores motiles, nageant dans l'eau. Ces maladies sont donc fréquentes dans les sols humides et sont favorisées par des substrats humides et faiblement drainés et des conditions ambiantes fraîches (Landis *et al.*, 1989c).

L'insuffisance racinaire peut également être causée par des conditions asphyxiantes du substrat puisqu'en l'absence d'oxygène, le plant d'épinette blanche stoppe la croissance des racines fines et celles-ci commencent à mourir après 24 heures. De plus, les conditions saturées en eau limitent la disponibilité en oxygène, la croissance des racines, l'absorption des éléments majeurs, la photosynthèse et la formation des aiguilles (Kozłowski, 1997). D'autre part, un substrat ne constituant pas une réserve en eau suffisante peut restreindre la croissance du plant et de ses racines en période de stress hydrique. Ce sont principalement les propriétés physiques et chimiques dont les conditions d'aération du substrat en lien avec la croissance racinaire des plants d'épinette blanche qui seront étudiées dans ce mémoire.

1.2 Spécificités et exigences de l'épinette blanche (*Picea glauca* (Moench) Voss)

L'épinette blanche est un arbre d'une grande importance commerciale au Canada. Les qualités de son bois font qu'il est utilisé dans la fabrication de matériaux et de pâtes et papier. Elle est abondamment reboisée dans les forêts du Québec. L'épinette blanche est qualifiée d'espèce

plastique puisqu'elle a la capacité de recoloniser le territoire après le retrait d'une glaciation. De plus, elle croît sous une très grande variété de conditions, incluant les climats extrêmes (Nienstaedt et Zasada, 1990). L'espèce colonise une variété de sols d'origine glaciaire, lacustre et marine et sur une grande variété de formations rocheuses. Une bonne croissance de l'épinette blanche en nature demande la présence d'une source en eau constante et bien oxygénée bien que l'espèce tolère une large variation des conditions d'humidité. En pépinière, l'espèce présente peu de différence quant à la croissance des plants à des niveaux d'irrigation situés entre 30 % à 60 % de teneur en eau volumique ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) (Lamhamedi *et al.*, 2001). Elle ne tolère pas l'eau stagnante qui a pour effet de réduire son volume racinaire. Cette espèce est caractérisée par sa capacité à produire des racines peu profondes, lui permettant de croître dans des sols où la croissance des racines en profondeur est restreinte. Lorsque les conditions édaphiques sont favorables, la profondeur des racines varie communément de 90 à 120 cm et peut aller jusqu'à 3 m. En milieu naturel, on retrouve généralement l'épinette blanche sur des sols ayant une grande variété de pH, et dont l'optimum se situe entre 4,7 et 7 (Nienstaedt et Zasada, 1990).

1.3 Les propriétés physiques des substrats

La culture intensive en récipient soumet les plants forestiers à des contraintes différentes de celles retrouvées en nature. Le volume de sol disponible pour la croissance de la plante et de son système racinaire est faible. En effet, les contraintes opérationnelles de la chaîne de production des plants jusqu'au reboisement exigent l'utilisation de cavités à volumétrie réduite (de 60 à 350 cm^3). Le volume est encore plus faible que celui employé en horticulture où l'usage de pots ayant un volume d'un litre et plus est pratique courante. Cette limite impose l'usage d'un substrat capable de subvenir aux besoins de la plante cultivée dans un volume réduit.

Le substrat utilisé pour la culture en pépinière doit remplir trois fonctions primordiales afin de permettre le développement optimal de la plante. Tout d'abord, il doit posséder une structure favorisant l'enracinement et le support vertical du plant. Cette qualité doit se maintenir tout au long de la période de croissance. En effet, sous conditions humides et en présence d'éléments nutritifs, la structure du substrat est altérée par l'action de décomposition des microorganismes. Le substrat doit permettre le stockage de l'eau et des nutriments en sa structure. Cette qualité de stockage doit être accompagnée d'une capacité de transport de l'eau du substrat vers les racines afin d'alimenter en continu la plante, et ce, même en période de pointe photosynthétique où les

besoins en eau sont à leur maximum. Finalement, le substrat de culture doit permettre un transport efficace des gaz à travers sa matrice, afin d'évacuer les gaz métaboliques et d'alimenter les racines en oxygène. Dans ce cas, le substrat doit jouer avant tout un rôle de transport puisque le réservoir principal, l'atmosphère, est situé à l'extérieur du récipient. Ce sont les vides entre les particules, appelés pores, et leur organisation spatiale qui régissent le stockage et les mouvements de l'eau et de l'air dans le substrat.

La teneur en air (θ_a) est l'indice d'aération du substrat le plus utilisé, car il est fortement relié à la diffusivité des gaz (Carlson, 1981; King et Smith, 1987; Landis *et al.*, 1989a). Une θ_a de 10 % est généralement considérée comme étant la limite inférieure pour la diffusion des gaz dans le sol (Wesseling et Wijk, 1957) alors qu'une θ_a de 10 à 15 % est le minimum requis pour permettre la respiration et la croissance racinaire (Vomocil et Flocker, 1961). L'utilisation de θ_a comme outil de prédiction de la qualité des substrats donne toutefois des résultats variables. Les substrats ayant une faible porosité d'air sont généralement associés à une plus faible croissance des plants (Puustjirvi, 1969; Tomlinson, 1985; Tilt *et al.*, 1987; Ouimet *et al.*, 1990). Toutefois, d'autres études n'ont pu relier la porosité d'air avec la croissance des plantes (Brown et Emino, 1981; Glinski et Lipiec, 1990). En effet, la porosité d'air à elle seule ne permet pas de déterminer la connexion entre les pores qui est un facteur important des échanges gazeux. La connexion entre les pores est déterminée par la tortuosité des pores. Plus la tortuosité du milieu est élevée, plus la distance parcourue par une molécule de gaz est grande pour traverser une épaisseur donnée de substrat et moins le coefficient d'efficacité des pores est grand (γ). Il est possible de relier γ et θ_a par la détermination de la diffusivité des gaz ($D_s D_0^{-1}$) (Eq. 1.1). Les échanges gazeux dans les sols sont principalement contrôlés par la diffusivité gazeuse du sol (D_s) qui dépend de la diffusivité des gaz dans l'air (D_0), de θ_a et du coefficient d'efficacité des pores (γ) selon (King et Smith, 1987) :

$$\frac{D_s}{D_0} = \gamma \theta_a$$

Eq. [1.1]

La taille des particules qui composent le mélange d'emportage aura de multiples conséquences sur les fonctions du substrat selon l'abondance de particules grossières ou fines. Selon Landis *et al.* (1989a), la taille recommandée pour les particules de tourbe varie entre 0,8 et 6 mm. Une étude

effectuée sur des substrats organiques à base de morceaux d'écorce broyée a démontré que les particules les plus grossières augmentent la porosité d'air du milieu en accroissant la proportion de macropores. Toutefois, la géométrie (forme et taille) des particules grossières crée des barrières aux échanges gazeux réduisant la biodisponibilité des gaz dans l'environnement racinaire (Nkongolo et Caron, 1999; Caron *et al.* 1999; Caron *et al.*, 2005). Selon ces études, une perte de croissance des semis est attribuable à de telles barrières physiques. Dans les substrats tourbe-vermiculite utilisés en pépinière forestière, la présence de feuillets grossiers de vermiculite et/ou de gros morceaux de perlite, pourrait constituer une barrière aux échanges gazeux bien que ces additifs accroissent la teneur en air du substrat. De plus, l'augmentation de la teneur en particules grossières (>6 mm), en augmentant la macroporosité, réduit la capacité de rétention de l'eau. Le milieu de culture ne contient alors pas suffisamment d'eau pour permettre une croissance soutenue des plants (Puustjarvi et Robertson, 1975; Heiskanen et Rikala, 1998).

Par ailleurs, l'utilisation d'une tourbe fine (<0,8 mm) favorise une forte cohésion et le maintien d'une nappe perchée importante par remontée capillaire de l'eau et restreint l'aération dans cette zone, créant ainsi des conditions défavorables à la croissance des racines (Landis *et al.*, 1989a). De plus, la présence de particules fines dans la tourbe réduit la diffusivité relative des gaz (Caron *et al.*, 2005). Des conditions extrêmes d'humidité comme les excès d'eau et les stress hydriques, influencent négativement la physiologie des plants, la croissance et la survie des racines et la nutrition minérale (Bernier et Gonzalez, 1995; Bernier *et al.*, 1995; Heiskanen, 1995a; McMillin et Wagner, 1995; Lamhamedi *et al.*, 2003). Lorsque l'aération agit comme facteur limitant, la photosynthèse nette décroît avec l'augmentation de l'humidité du substrat (Heiskanen, 1994a). Étonnamment, l'irrigation en pépinières, pour des récipients ajourés 25-350, vise souvent à maintenir les teneurs en eau au niveau de la rhizosphère entre 50 et 70 % (v/v) pour éviter les risques de perte de croissance des plants causés par un assèchement du substrat (Lamhamedi *et al.*, 2001).

La compaction du substrat doit permettre la rétention d'une partie de l'eau et des éléments nutritifs afin de résister à l'assèchement entre les irrigations (Carlson, 1981). La compaction est contrôlée au moment de l'empotage. Elle doit être suffisante afin de limiter l'affaissement du substrat dans la cavité qui entraînerait une perte du volume utilisable par les racines. Cette tendance à la compaction est forte pour les plants entreposés à l'extérieur durant l'hiver, puisque

le poids de la neige accumulée en surface constitue une charge importante sur le substrat (Fecteau, 2008). La compaction du substrat est exprimée par la masse volumique apparente. Cette variable est fortement influencée par la nature des particules. Dans le cas de la tourbe, plus elle est décomposée selon l'échelle de Von Post (c.-à-d. plus de particules fines), plus la masse volumique apparente augmente (Heiskanen, 1993a). Cette variable est importante puisqu'elle influe sur plusieurs propriétés physiques critiques. Une compaction trop importante entraîne une perte de la teneur en air. De plus, elle réduit la conductivité hydraulique saturée (Chow *et al.*, 1992) qui est fortement reliée à la diffusivité des gaz.

À l'automne, les plants sont déplacés à l'extérieur de l'abri tunnel pour y passer l'hiver puis leur deuxième saison de croissance. Ils sont alors soumis à des épisodes de pluie intense et le substrat peut alors contenir une grande teneur en eau. De plus, la rétention en eau de la tourbe s'accroît avec l'augmentation de la compaction du substrat et les épisodes répétés d'arrosage et de dessèchement (Heiskanen, 1990, 1993b). Les conditions anoxiques qui s'ensuivent peuvent alors entraîner la mort de la pointe des racines et un démarrage lent de la croissance au printemps (Hook et Scholtens, 1978; Langerud, 1986; Langerud et Sandvik, 1987). Par ailleurs, la disponibilité de l'oxygène pour le système racinaire ne dépend pas uniquement de l'approvisionnement des racines en oxygène, mais dépend également de la respiration des racines et des microorganismes présents dans le substrat de culture (Naasz *et al.*, 2006). De plus, l'activité respiratoire des microorganismes dans les sols et substrats organiques peut être jusqu'à dix fois supérieure à celle mesurée dans les sols minéraux (Glinski et Stepniewski, 1985).

1.4 Les additifs : la vermiculite et la perlite

Au Québec, l'usage d'un substrat composé de tourbe et de vermiculite, dans des proportions 3 : 4 v/v tourbe pour un 1 : 4 v/v vermiculite est pratique courante. Un tel substrat est aussi généralement employé dans les pépinières du Canada et des États-Unis. Il possède l'avantage d'offrir une forte porosité et se caractérise par une capacité de rétention en eau supérieure à la tourbe pure. Toutefois, cette propriété peut réduire le lessivage des éléments nutritifs du substrat (Carlson, 1981). Par ailleurs, l'usage de différents équipements pour mélanger et empoter le substrat peut influencer grandement la distribution de la dimension des particules ainsi que la masse volumique apparente du substrat (Heiskanen *et al.*, 1996).

La vermiculite est un matériel micacé qui a été chauffé à 1000-1100 °C. Elle a une structure plate et est formée d'un ensemble de feuillets superposés permettant une forte porosité totale et une grande capacité de rétention de l'eau. On la retrouve généralement offerte en trois grades caractérisés par des particules de taille différente. La vermiculite fine retient plus d'eau à -1 kPa que la vermiculite grossière permettant un meilleur enracinement et une meilleure croissance que la vermiculite grossière (Heiskanen, 1993a). La perlite est une forme de roche volcanique ayant été expansée à 1000-1100 °C afin de produire une structure interne poreuse partiellement ouverte par des micelles. Plusieurs études se sont penchées sur l'effet de ces matériaux sur les propriétés physiques du substrat. La perlite fine et moyenne possède une bonne capacité d'absorption de l'eau à des potentiels matriciels inférieurs à -5 kPa. L'usage de la perlite plus grossière est répandu afin d'augmenter la porosité d'air du substrat puisqu'elle possède une faible rétention de l'eau.

1.5 Les propriétés chimiques

Les substrats utilisés en pépinière possèdent une fertilité initiale faible. Les teneurs en azote, phosphore et potassium sont, en général, très faibles comparativement à un sol minéral (Scarratt, 1986). Cette caractéristique est idéale pour les pépiniéristes puisqu'elle leur permet d'ajuster le niveau de fertilité du substrat pendant la culture sans tenir compte de sa fertilité initiale. La rectification de la fertilité est réalisée par l'ajout de nutriments solubles par aspersion ou par ajout de fertilisants à dissolution lente dans le substrat. Par ailleurs, la germination des semences réussit mieux dans les substrats peu fertiles puisque la salinité peut réduire le taux de germination et un niveau élevé d'éléments nutritifs, spécialement l'azote, encourage les champignons responsables de la fonte du semis. De plus, chez les espèces feuillues, le semis nouvellement germé ne requiert pas de fertilisation avant deux semaines puisque l'embryon utilise les réserves contenues dans l'endosperme durant cette période (Landis *et al.*, 1989a). L'azote est présent dans la tourbe, selon des proportions situées entre 1 et 2.5 %, principalement sous forme ammoniacale, une forme organique qui n'est pas immédiatement assimilable par la plante. La qualité de la tourbe est importante, car plus elle est décomposée, plus elle contient d'azote (Lucas *et al.*, 1965).

Le pH est défini par le logarithme de l'inverse de l'activité des ions H⁺ dans le milieu. Dans son milieu naturel, l'épinette blanche croît dans une grande variété de pH, dont l'optimum se situe entre 4,7 et 7 en fonction du type de sol (Nienstaedt et Zasada, 1990). Le pH du substrat dépend des ingrédients utilisés dans sa fabrication. La mousse de tourbe de sphaigne possède un pH situé

entre 3 et 4 alors que la vermiculite possède un pH plus neutre (pH 7), voire légèrement alcalin (Landis *et al.*, 1989a). Le pH d'un tel substrat sera donc légèrement acide (pH entre 4,5 et 5,5). Le pH joue surtout un rôle important dans la disponibilité des éléments nutritifs, particulièrement des micronutriments. Des valeurs de pH extrêmes peuvent rendre plusieurs nutriments non disponibles à la plante ou encore les rendre toxiques, car libérés en trop grande quantité. Sur sol organique, l'optimum de disponibilité des nutriments est observé à un pH de 5.5.

La conductivité électrique reflète la concentration en sels de la solution du sol. Les principales sources d'apport en sels proviennent des résidus provenant de certains engrais, de l'eau d'irrigation et du substrat lui-même. Cette dernière source est toutefois minime dans les substrats à base de tourbe. La petite taille des cavités utilisées en production de plants forestiers peut aussi accroître la salinité du substrat, en augmentant le contact du substrat avec les sels d'engrais. Selon Lamhamedi (2008), l'augmentation de la salinité ne constitue pas un problème pour les pépinières forestières du Québec. Une salinité faible à normale pour un substrat tourbe-vermiculite couramment utilisé pour l'épinette noire se situerait entre 0 et 2500 $\mu\text{S cm}^{-1}$ (Timmer et Parton, 1982).

Selon Lemaire *et al.* (2003), la capacité d'échange cationique est la propriété de certains matériaux solides utilisés dans la confection des substrats, à posséder des cations adsorbés ou fixés à leur surface. Cette propriété est due à la présence de substances colloïdales minérales ou organiques. Dans les milieux tourbeux, la fixation a pour origine la présence de fonctions acides organiques terminales. L'humification de la tourbe augmente sa CEC. Un substrat à forte CEC perdra peu d'éléments nutritifs par lessivage et les risques de salinité excessive seront également réduits (Lemaire *et al.*, 2003). Ce substrat aura aussi la capacité d'adsorber les éléments nutritifs provenant des fertilisations et de les relarguer au semis entre les fertilisations. Par contre, les anions (p. ex., azote sous forme de nitrates) sont repoussés par les sites d'adsorption des matériaux à forte CEC entraînant un lessivage important de ceux-ci. Autre propriété intéressante des matériaux à forte CEC est leur capacité à tamponner le milieu contre des variations soudaines du pH et de la salinité. La tourbe de sphaigne a une forte capacité d'échange cationique (tableau 1.1) ce qui signifie qu'elle possède une bonne capacité à maintenir une réserve en cations, tels que NH_4^+ , K^+ , Ca_2^+ et Mg_2^+ . La vermiculite démontre une certaine capacité d'échange anionique et peut retenir une quantité considérable de $\text{PO}_{4,3}^-$ (Bunt, 1976).

Tableau 1.1 Exemples de CEC et de pH pour plusieurs ingrédients employés pour la confection de substrats artificiels (Lemaire *et al.*, 2003).

Ingrédients	CEC (meq L ⁻¹)	pH
Tourbe brune	20 à 40	5.0
Écorce de feuillus compostée	18.4	7.5
Tourbe blonde	11.5	4.5
Perlite grossière	0.6	6.9
Vermiculite grossière	2.7	7.5
Vermiculite fine	<0.2	8.7
Sable	0	6 à 8

1.6 Évolution des propriétés physico-chimiques du substrat durant la période de croissance

Les plants d'épinette blanche de forte dimension sont produits au cours d'une période de deux ans. Or, les caractéristiques physico-chimiques des substrats évoluent au cours de cette période de culture. La tourbe est reconnue pour sa haute biostabilité, car son rapport carbone : azote élevé réduit sa vitesse de décomposition (Bunt, 1976; Lemaire *et al.*, 2003). Dans certains cas, une baisse de la porosité en air associée au tassement du substrat ainsi que des modifications de la rétention en eau peuvent avoir lieu (Langerud et Sandvik, 1987; De Rouin, 1988). La présence des racines de la plante modifie également le comportement physique du substrat. Celles-ci peuvent occuper une partie importante des vides et provoquer une diminution de la porosité totale, réduisant les teneurs en eau et en air. De plus, les échanges gazeux peuvent être modifiés par la création de canalicules verticaux issus de la croissance racinaire (Gras, 1987). Au cours d'un suivi de culture de 14 mois de divers substrats à base de tourbe, la porosité d'air a diminué, mais la diffusivité relative des gaz ($D_s D_0^{-1}$) est demeurée inchangée, à cause d'une réduction de la tortuosité des pores (Allaire-Leung *et al.*, 1999). Si le lessivage est absent au sein du substrat, une accumulation d'éléments minéraux devrait être observée, pouvant entraîner une augmentation du pH et de la salinité ainsi que, plus rarement, une croissance réduite des semis (Carlson, 1981). Le substrat peut gagner entre 0,5 et 1 unité de pH durant la saison de croissance puisque l'eau d'irrigation neutre ou légèrement alcaline ainsi que la fertilisation tendent à élever le pH du substrat (Carlson, 1981).

1.7 Conclusion

Bien que l'insuffisance racinaire s'explique par plusieurs facteurs (génétique, irrigation, fertilisation etc.) le substrat, par ses propriétés chimiques et physiques, a la capacité d'influer sur la croissance et le développement de l'épinette blanche et d'agir sur la croissance racinaire. Celui-ci agit à plusieurs niveaux. Mal drainé, il est plus propice aux infections par les champignons et pourritures des racines. De plus, un tel substrat peut créer des conditions anoxique néfastes aux racines et à leurs fonctions de captation des nutriments et de l'eau. Dans les substrats à base de mousse de tourbe de sphaigne, l'aération et le drainage sont principalement influencés par la taille et la géométrie des particules du substrat et par sa masse volumique apparente. Même s'il doit être suffisamment aéré, le substrat doit retenir suffisamment d'eau pour éviter des périodes de stress hydrique entre les irrigations. Du point de vue chimique, c'est principalement en assurant la rétention et la mise en disponibilité des nutriments que le substrat joue un rôle dans la croissance des semis. Puisque la culture de plants de forte dimension est réalisée sur une période de deux ans, il est nécessaire de tenir compte de l'évolution des propriétés chimiques et physiques durant cette période.

Chapitre 2. Caractérisation des propriétés physiques et chimiques des substrats d'empotage utilisés par huit pépinières forestières du Québec : Effets sur la croissance et le développement des plants d'épinette blanche (1+0)

2.1 Résumé

L'objectif de cette étude était de caractériser les propriétés physiques et chimiques des substrats utilisés par huit pépinières forestières du Québec et de vérifier l'effet de ces propriétés sur la croissance des plants (1+0). La croissance des plants a eu lieu dans les 8 pépinières afin de s'assurer d'une régie de culture optimisée aux différents substrats et conforme aux diverses pratiques culturales. Un montage avec une bouteille Mariotte a permis de mesurer la conductivité hydraulique saturée (Ks). La réalisation de la courbe de désorption en eau a permis de déduire la teneur en air (θ_a), la teneur en eau facilement utilisable (EFU) et utilisable (EU). La teneur en eau volumique (θ_v) fut mesurée par réflectométrie dans le temps (TDR) à différents potentiels matriciels appliqués par une table à tension. La courbe de désorption et Ks ont permis de déterminer le coefficient d'efficacité des pores (γ) et un indice de diffusivité relative des gaz ($D_s D_0^{-1}$). La porosité totale a été mesurée par détermination du contenu en matière organique (perte au feu). Une granulométrie sèche a été effectuée. La masse volumique apparente (MVA), le pH, la conductivité électrique (CE), la capacité d'échange cationique effective (CEC_{eff}) et la teneur en éléments minéraux (N-NH₄, N-NO₂₋₃, P, K, Ca, Mg) ont aussi été mesurés. Les variables de croissance des plants et les teneurs en éléments minéraux ont été mesurés après une saison de croissance. Les pépinières ont présenté d'importantes variations tant au niveau de la croissance des plants qu'au niveau des propriétés du substrat. θ_a et Ks mesurées à la fin de la saison de croissance étaient corrélées négativement avec la masse sèche de la partie aérienne et le diamètre de la tige. La MVA était corrélée positivement avec la masse racinaire sèche. Cela indique l'absence de limitation de la croissance due à une aération restreint malgré des valeurs de $D_s D_0^{-1}$ faibles pour certains substrats (<0.005 unité). Les meilleures croissances ont été obtenues avec des MVA situées entre 0.09 et 0.1 g cm³ et des θ_a situées entre 0.07 et 0.14 cm³ cm⁻³.

2.2 Introduction

Les milieux de culture artificiels doivent posséder une grande aération, une grande rétention en eau et en nutriments, une facilité de manutention et un faible coût de revient (Bunt, 1988). Les substrats utilisés dans les pépinières forestières du Québec sont composés presque universellement de mousses de tourbe de sphaigne auxquelles de la vermiculite et/ou de la perlite sont ajoutées en différentes proportions. La mousse de tourbe de sphaigne constitue la composante de base idéale puisqu'elle possède une faible masse volumique, une grande capacité d'absorption de l'eau (Gonzalez, 1981) et une grande disponibilité dans la province. De plus, elle possède un faible pH et une CEC relativement élevée, deux propriétés chimiques idéales pour la croissance des conifères (Landis *et al.*, 1989a). Il est d'usage commun dans les pépinières forestières du Québec d'employer de la mousse de tourbe de sphaigne blonde peu humifiée parce qu'elle se caractérise par des teneurs en eau et en air élevées. La tourbe de sphaigne est un produit d'une grande variabilité dont la qualité peut varier selon sa provenance et son degré d'humification (Hammond, 1975; Heiskanen, 1993a; Caron et Rivière, 2003). De plus, l'approvisionnement en tourbe peu humifiée tend à devenir plus difficile avec l'augmentation de la durée d'exploitation des tourbières et la raréfaction de celles en exploitation près des clientèles (Hamann, 2003). Par ailleurs, les différentes étapes de manutention de la tourbe, de la récolte jusqu'à l'emportage, peuvent entraîner une modification des propriétés de celle-ci (Caron et Rivière, 2003). Par exemple, le type de mélangeur utilisé lors de l'emportage et la durée du mélange peuvent fractionner les particules et modifier la rétention d'eau de la tourbe et sa teneur en air (θ_a) (Heiskanen, 1994b). Humification et manipulation inappropriée auront pour effet d'accroître la proportion de particules fines de la tourbe augmentant ainsi les risques d'asphyxie des racines par accroissement de la hauteur de la nappe d'eau perchée et réduction de θ_a (Heiskanen, 1993a). De surcroît, la hauteur du récipient employé pour cette culture étant limitée par des contraintes opérationnelles, la hauteur de la nappe perchée peut occuper une portion importante du volume de la cavité et limiter ainsi les échanges gazeux (Landis *et al.*, 1989a).

Les composantes employées dans la confection du substrat peuvent modifier les variables physiques et chimiques de celui-ci (Heiskanen, 1993a, 1995b). Les propriétés physiques du substrat ont la faculté d'influencer de diverses manières la croissance des plantes (Bunt, 1988; Allaire *et al.*, 1996) et des plants forestiers (Folk *et al.*, 1992; Heiskanen, 1994a; Bernier et

Gonzalez, 1995). θ_a est largement utilisée comme indice de l'aération du substrat. Employée seule, elle ne permet toutefois pas de déterminer la connexion entre les pores laquelle influence les échanges gazeux. Un indice de la diffusivité relative des gaz ($D_s D_0^{-1}$) déterminé à partir des caractéristiques de la courbe de désorption et des mesures de conductivité hydraulique saturée a été démontré comme étant un indice supérieur à θ_a pour vérifier l'effet des échanges gazeux dans les substrats artificiels sur le développement et la croissance d'espèces végétales (Nkongolo et Caron, 1999; Caron et Nkongolo, 2004). Toutefois, aucune étude n'a tenté de déterminer $D_s D_0^{-1}$ dans les substrats d'empotage tourbe-vermiculite employés en pépinière forestière et de vérifier son effet sur le développement de plants forestiers cultivés en récipient. Par ailleurs, cette méthode d'estimation des propriétés d'échanges gazeux entre les substrats et l'air ambiant doit encore être validée.

Les pépinières forestières du Québec sont soumises à des critères de qualité par le MRNF qui est le principal acheteur de leur production. Parmi ces critères, l'absence de cohésion de la motte de racines constitue la principale cause de disqualification des plants (DGPSP, 2009). Un substrat asphyxiant peut faire en sorte de limiter la croissance racinaire nuisant ainsi à la cohésion de la carotte. L'augmentation de θ_a , du coefficient d'efficacité des pores (γ) et de $D_s D_0^{-1}$ devrait avoir un effet positif sur le développement et la croissance des plants d'épinette blanche en présence de conditions asphyxiantes. Dans cette expérience, nous avons caractérisé les propriétés physiques et chimiques des substrats utilisés dans huit pépinières du Québec. Les propriétés physiques ont été déterminées *in situ* (c.à.d. en récipients) afin de minimiser l'impact des manipulations sur la structure fragile des substrats artificiels. L'effet de ces propriétés sur les variables de croissance des plants après culture en milieu opérationnel a été vérifié. La culture et la croissance des plants ont eu lieu dans chacune des pépinières afin de s'assurer d'une régie de culture optimisée aux différents substrats et conforme aux diverses pratiques culturales.

2.3 Matériel et méthodes

2.3.1 Description des sites d'étude

L'étude a porté sur les substrats provenant de huit pépinières, réparties dans la province de Québec (Canada), situées géographiquement entre les latitudes 46° 03' 36" et 48° 48' 48" N et les longitudes 65° 51' 06" et 74° 38' 15" O (Tableau 2.1). Le nombre de degrés-jours de croissance où

la température journalière moyenne de l'air est supérieure à 5°C pendant la saison de croissance variait entre 1250 et 2000 degrés-jours. Cinq pépinières étaient situées dans une zone où le nombre de degrés-jours de croissance était compris entre 1250 et 1500. La pépinière n°4 est située dans une zone de 1500 à 1750 degrés-jours alors que les pépinières n°5 et n°8 ont reçu entre 1750 et 2000 degrés-jours de croissance (Tableau 2.1).

2.3.2 Régies de culture

Les récipients employés étaient de type 25-310, fait de polyéthylène haute-densité de 25 cavités non ventilées et d'un volume de 310 cm³. Les récipients ont été empotés selon la méthode standard employée par les pépiniéristes et avec leur propre recette de substrat (Tableau 2.2). Les substrats étaient constitués de mousse de tourbe de sphaigne de catégories variables qui provenait de différents fournisseurs du Québec et du Nouveau-Brunswick. Tous les pépiniéristes additionnaient leur tourbe de vermiculite horticole de grades 3 ou 4 selon des proportions variant de 9 à 40 % V/V. Seule la pépinière n° 8 ajoutait de la perlite (9 % V/V). Le mélangeur généralement utilisé était avec vis sans fin et seule la pépinière n° 4 employait un mélangeur à palmes. La culture et la croissance des plants d'épinette ont eu lieu directement sur le site des pépinières. Les plants ont donc tous subi une régie d'irrigation et de fertilisation différente et adaptée aux conditions de production de chacune des pépinières. Les dates de semis ont eu lieu entre le 7 et le 20 mai 2008 et les cultures ont été effectuées sous abris en tunnel (Tableau 2.1). Les pépiniéristes ont appliqué différentes doses d'azote (N), de phosphore (P), et de potassium (K) (tableau 2.1). En moyenne, la dose de N ajoutée était de 65.7 mg plant⁻¹ avec un minimum de 34 mg plant⁻¹ et un maximum de 106 mg plant⁻¹. P a été appliqué selon une moyenne de 15.5 mg plant⁻¹ avec un minimum de 8.8 et un maximum de 24.1 mg plant⁻¹, respectivement. Finalement, la quantité moyenne de K appliqué fut de 28 mg plant⁻¹ avec un minimum de 20.7 mg plant⁻¹ et un maximum de 38.4 mg plant⁻¹. La détermination des doses d'engrais à appliquer fut établie en fonction des besoins en N, P et K des plants, évalués par la progression saisonnière de la masse sèche des plants et de la concentration tissulaire en éléments nutritifs, et par le besoin de maintenir la fertilité du substrat (Langlois et Gagnon, 1993; Girard *et al.*, 2001).

2.3.3 Analyse des propriétés physiques des substrats

Au printemps 2008, moins d'une semaine après leur empotage, cinq récipients (de dimension et volume 25-310) par pépinière ont été acheminés au laboratoire pour subir une caractérisation.

Tout d'abord, la masse volumique apparente (MVA) a été déterminée sur trois cavités par récipient. La porosité totale (PT) a été évaluée par dosage de la matière organique lors d'une calcination à 550 °C (CPVQ, 1997). Une granulométrie sèche par tamisage a ensuite été réalisée sur un échantillon composite de 650 ml. Le tamisage a été effectué à l'aide d'un tamiseur mécanique Tylers ® durant trois minutes à l'aide des tamis W.S Taylor suivants : 0.106; 0.25; 0.5; 1; 2; 4 et 8 mm d'ouverture de mailles. Cette étape a permis de déterminer la fraction de particules fines plus petites que 0.5 mm (0_0.5mm) et la portion de particules dont la taille était située entre 1 et 4 mm (1_4mm). Le diamètre moyen des particules (MWD) a été estimé à partir de cette méthode (Kemper et Roseneau, 1986) :

$$MWD = \sum_{i=1}^n x_i f_i$$

Eq. [1]

où x_i est la masse de la portion granulométrique divisée par la masse totale de l'échantillon, f_i est la taille moyenne des particules et n est le nombre de classes granulométriques (ici $n = 8$).

Par la suite, le récipient était mis à saturation progressivement par accroissement du niveau d'eau de 0.5 cm par heure pendant 24 heures. Les récipients étaient ensuite drainés librement durant deux heures. Les teneurs en eau à saturation (θ_s) et après drainage, soit à capacité en pot (θ_c), c'est-à-dire à un potentiel matriciel de -0.6 kPa qui correspond à la moitié de la hauteur d'une cavité, ont été déterminées avec une sonde verticale de 12 cm par réflectométrie métallique dans le domaine temporel (TDR) (Topp *et al.*, 1980). Ces mesures ont été effectuées à l'aide d'un testeur de câble Tektronix ® (modèle 1502B, Tektronix Inc., Beaverton, OR, É.-U.). Les constantes diélectriques (k_a) situées entre 5 et 50.8 ont été transformées en teneur en eau (θ_v) selon (Paquet *et al.*, 1993) :

$$\theta_v = -0.0055 + 0.0425 K_a - 0.000957 K_a^2 + 0.00000907 K_a^3$$

Eq. [2]

Pour des valeurs de k_a comprises entre 50.8 et 81, θ_v a été interpolée linéairement de la valeur de θ_v à $k_a = 50.8$ (calculée avec l'équation 2) et la valeur de $1 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ pour $K_a = 81$, en utilisant l'équation 3.

$$\theta_v = 0.0042 k_a + 0.66$$

Eq. [3]

Les mesures de θ_s et θ_c ont permis la détermination de la capacité en air après drainage (θ_a) puisque :

$$\theta_a = \theta_s - \theta_c$$

Eq. [4]

Pour chacun des récipients, cinq carottes de substrat furent extraites de leur cavité et placées précautionneusement dans un récipient de cinq cavités alignées et de dimension identique à celles où avaient été prélevées les carottes. Le fond des cavités était recouvert d'une toile moustiquaire. Ce récipient était mis à saturer puis installé sur un lit de billes de verre. Une sonde TDR était ensuite insérée à l'horizontale, à 8 cm de hauteur (figure 2.1) (Lambany *et al.*, 1997). Cette sonde était constituée de deux tiges d'acier inoxydable de 3.2 mm de diamètre, parallèles et espacées de 1.5 cm et longues de 36 cm. Des diodes placées au début et à la fin de la sonde permettaient de détecter les extrémités de celle-ci (Hook *et al.*, 1992). La longueur effective de la sonde était égale à cinq fois le diamètre de la cavité au niveau des tiges de la sonde. Un facteur de correction a été utilisé lors du calcul de K_a afin de retrancher le temps de propagation dans la portion à l'extérieur du substrat (Lambany *et al.*, 1997). Le point d'entrée d'air (EA) a par la suite été déterminé selon la méthode de Nemati *et al.* (2002). Pour ce faire, θ_v a été déterminée par TDR pour une tension incrémentielle de 0.1 kPa avec un temps d'équilibre de 2 heures entre chaque lecture. Au départ, le récipient baignait dans l'eau libre et les potentiels de -0.2 à -0.8 kPa, à mi-hauteur de la cavité, étaient fixés en réduisant la hauteur de l'eau libre. Par la suite, une succion était appliquée par le lit capillaire jusqu'à l'atteinte d'un potentiel matriciel de -1.2 kPa. EA correspondait à la tension matricielle lorsqu'une réduction de la teneur en eau était observée. À cette tension matricielle, une valeur de 1.25 cm était soustraite afin de tenir compte de la zone de sensibilité de la sonde

TDR (Caron *et al.* 2005). Une fois EA mesuré, θ_v a été déterminée à différents potentiels matriciels (-1.5, -3, -5 et -10 kPa) afin de tracer la courbe de désorption. Une pellicule plastique recouvrant les échantillons empêchait l'évaporation par le haut lors de cette prise de mesures.

L'eau utilisable (EU) a été estimée en utilisant θ_c (-0.6 kPa) et θ_v au point de flétrissement permanent -10 kPa (θ_{10}) qui est le potentiel approprié pour déterminer cette variable dans les milieux artificiels (De Boodt et Verdonck, 1972). L'eau facilement utilisable (EFU) a été déterminée en utilisant le point de flétrissement temporaire (-5 kPa) (θ_5).

$$EFU = \theta_c - \theta_5$$

$$EU = \theta_c - \theta_{10}$$

Eq. [5]

La conductivité hydraulique saturée (K_s) a été mesurée directement sur les cavités des récipients provenant des pépinières. Ces mesures ont été réalisées selon la méthode classique proposée par le CPVQ (1997). Ainsi, le récipient était saturé par le bas, avec une élévation d'eau de 0,5 cm par heure pour une saturation totale de 24 heures. Par la suite, un cylindre a été inséré au-dessus de l'ouverture supérieure de la cavité et un apport d'eau était fourni par un infiltromètre gradué afin d'atteindre un régime d'écoulement permanent. Après détermination du débit Q , de l'aire de la surface (A), du potentiel de charge de la colonne d'eau (H) et de l'épaisseur de la colonne de substrat (L), K_s est calculée avec l'équation suivante basée sur la Loi de Darcy :

$$K_s = \frac{Q \times L}{A \times H}$$

Eq. [6]

Cette formule est valide seulement pour les cavités cylindriques alors que les cavités des récipients 25-310 ont une forme conique. C'est pourquoi l'aire de la surface du substrat à la mi-hauteur de la cavité, correspondant à l'aire moyenne, a été utilisée pour mesurer K_s . De plus, le fond des cavités présente un important resserrement des parois du récipient. L'effet de cette restriction au passage de l'eau a été mesurée en comparant huit mesures de K_s prises pour un substrat dans des

cavités originales à des mesures prises dans des cavités dont le fond a été percé (diamètre = 0.75 cm) en quatre endroits afin d'éliminer la restriction au passage de l'eau (Allaire *et al.*, 1994). Un facteur de correction a été établi afin de corriger les valeurs de K_s prises dans les récipients 25-310. Les propriétés d'échange gazeux des substrats ont été déterminées en utilisant les propriétés de la courbe de désorption, EA et K_s suivant la méthode à points multiples déjà décrite par Allaire *et al.* (1996) et Caron et Nkongolo, (2004) pour les substrats artificiels. Brièvement, cette méthode consiste à déterminer les paramètres de la courbe de désorption avec la fonction non linéaire de cinq paramètres adaptée pour les substrats artificiels (Milk *et al.*, 1989):

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha\psi)^n]^b}$$

Eq. [7]

où $\theta = F(\psi, \theta_r, n, b, \alpha)$, ψ est le potentiel matriciel (kPa) et la teneur en eau résiduelle (θ_r), b , n et α sont des paramètres déterminés de manière empirique en utilisant le logiciel Mathcad 7 ® par minimisation de l'erreur associé à la fonction passant par les points de la relation de désorption. La fonction une fois estimée est utilisée avec la valeur de la conductivité hydraulique saturée (K_s) pour déterminer la tortuosité des pores (τ_w) par intégration selon :

$$\tau_w = \frac{0.00028\rho g}{\eta K_s} \int_{\theta_r}^{\theta_{ea}} \alpha^2 \left[\left(\frac{\theta_s - \theta_r}{\theta - \theta_r} \right)^{-1/b} - 1 \right]^{-2/n} d\theta$$

Eq. [8]

où θ_{ea} est la teneur en eau au point d'entrée d'air, ρ est la densité de l'eau (g cm^{-3}), g est l'accélération gravitationnelle (m s^{-2}) et η est la viscosité de l'eau. La tortuosité des pores est directement en lien avec le coefficient d'efficacité des pores (γ) selon :

$$\tau_w = 1/\gamma$$

Eq. [9]

Puisque γ exprime la connectivité des pores du substrat, il est possible d'estimer l'indice de diffusivité relative des gaz (D_s/D_0^{-1}) du substrat à partir de θ_a et de l'équation de King et Smith (1987) généralisée pour les milieux artificiels :

$$\frac{D_s}{D_0} = \gamma \theta_a$$

Eq. [10]

2.3.4 Analyse des propriétés chimiques des substrats.

Les propriétés chimiques des substrats ont été analysées après confection et à la fin de la saison de croissance. À chacune des périodes, quatre récipients par substrat ont été analysés. Trois cavités par récipient étaient utilisées pour former un échantillon composite. La capacité d'échange cationique effective (CEC_{eff}) (i.e. la CEC au pH du sol), calculée comme la somme des bases échangeables plus l'acidité effective, était déterminée par extraction des cations principaux à l'aide d'une solution de NH_4Cl 1M. Les métaux étaient ensuite dosés par spectrophotométrie d'émission atomique au plasma (modèle ICAP 9000, Thermo Instruments®, Franklin, Mass.)(Carter, 1993). L'acidité effective était calculée à partir de la mesure du pH et de la concentration d'aluminium dans l'extrait au chlorure d'ammonium (Espiau et Peyronel, 1976). Pour déterminer la concentration de N- NH_4 , N- NO_{2-3} , P, K, Ca, Mg, la solution du sol a été extraite à l'aide de la méthode d'extraction par saturation du sol à l'eau. Le substrat était saturé, puis l'eau chargée était extraite en filtrant sous vide (Timmer et Parton, 1982; Warncke, 1986). L'azote minéral était dosé par colorimétrie avec un spectrophotomètre à flux continu (Quickchem 8000®, Lachat). Les métaux étaient par la suite déterminés par spectrométrie d'émission atomique au plasma (ICAP 61E, Thermo Instruments) (Carter, 1993; Walinga *et al.*, 1995). Le pH et la conductivité électrique (CE) étaient ensuite mesurés directement sur l'extrait sans reporter les résultats sur une base de matière sèche (Timmer et Parton, 1982). Toutes les analyses chimiques effectuées sur les substrats et les tissus végétaux ont été réalisées par le Laboratoire de chimie organique et inorganique (ISO/CEI 17025, MRNF, Direction de la recherche forestière, Québec, Qc).

2.3.5 Évaluation des propriétés physiques des substrats, de la croissance et du développement des plants (1+0)

Au printemps 2009 avant le débourrement des plants, trois récipients 25-310 d'épinette blanche (1+0) par pépinière ont été récoltés aléatoirement dans les huit pépinières à l'étude afin de caractériser les résultats de croissance obtenus en 2008 pour chacun des substrats. La hauteur des plants et le diamètre au collet racinaire ont d'abord été mesurés sur dix plants par récipient. Par la suite, chacun de ces dix plants fut extrait en entier de sa cavité. La portion racinaire du plant a été nettoyée à la main soigneusement avec un rinçage à l'eau. Les masses sèches des racines et des parties aériennes ont été déterminées après mise à l'étuve des plants à 70°C pendant 48 heures. Une fois les variables de croissance mesurées, certaines propriétés physiques des substrats ont été mesurées. Tout d'abord, la MVA a été déterminée sur trois cavités par récipient. Les récipients étaient par la suite mis à saturer pendant 24 heures. K_s était alors mesurée sur trois cavités par récipient. Finalement, les récipients étaient mis à égoutter pendant deux heures. θ_s et θ_c étaient ensuite déterminés pour calculer θ_a avec l'équation (4).

2.3.6 Évaluation de la teneur en éléments minéraux des tissus

Par la suite, les concentrations en éléments minéraux des parties aériennes et racinaires ont été déterminées pour quatre échantillons composites par substrat. Après broyage, 100 mg de tissus étaient digérés dans une solution d'acide sulfurique concentré en présence de sélénium et de peroxyde d'hydrogène à 370°C pendant une heure. Après dissolution complète, les métaux ont été dosés directement dans la solution acide diluée par spectrométrie d'émission atomique au plasma (modèle : ICAP 61E ®, compagnie : Thermo Instruments). L'azote sous forme d'ammonium a été dosé par colorimétrie avec un spectrophotomètre à flux continu (Quickchem 8000, Lachat).

2.3.7 Analyses statistiques

Un test de la plus petite valeur significative (LSD) protégé a été réalisé en utilisant la procédure GLM du logiciel SAS 9.1 pour comparer les propriétés physiques des substrats après confection, les variables de croissance et les teneurs en éléments minéraux. Les coefficients de corrélation de Pearson ont été calculés afin de vérifier l'effet des variables physiques à l'état frais (MVA, θ_a , EU, EFU, K_s , MWD, γ et $D_s D_0^{-1}$) et la dose d'engrais appliquée sur les variables de croissance. Cette

analyse a aussi été effectuée avec les variables physiques mesurées après une année de croissance pour MVA, θ_a et Ks.

2.4 Résultats

La provenance des plants d'épinette blanche a eu un effet significatif sur toutes les variables de croissance mesurées (tableau 2.3). Les substrats ont été ordonnés de 1 à 8 dans les figures selon le rendement de masse aérienne et racinaire obtenu au cours de la saison de croissance 2008. Au moment de la récolte des plants, une différence de 78 % a été observée entre la masse aérienne sèche maximale (1 244 mg) et minimale (277 mg) moyenne alors qu'une différence de 68 % fut observée au niveau de la masse racinaire sèche entre les huit pépinières. La hauteur moyenne des plants variait entre 64 et 129 mm et le diamètre moyen au collet racinaire se situait entre 1.36 et 3.39 mm. Les teneurs en éléments nutritifs étaient significativement différentes ($p < 0.05$) entre les substrats pour les sections aérienne et racinaire (tableau 2.4).

Pour ce qui est des propriétés physiques mesurées au début de la saison de croissance 2008, le diamètre moyen des particules (MWD) était significativement différent entre les substrats ($P = 0.002$; tableau 2.5). Le substrat de la pépinière n°1 présentait le plus faible diamètre moyen (1.02 mm) alors que la valeur la plus élevée était de 2.77 mm (pépinière n° 5). Le MWD moyen pour l'ensemble des pépinières était de 1.81 mm. Les substrats d'empotage possédaient une proportion de particules de taille située entre 1 et 4 mm variant de 24 % pour le substrat de la pépinière n°1 à 52 % pour le substrat de la pépinière n°6. La quantité de particules fines (< 0.5 mm) fluctuait entre 10 % (substrats n° 5 et 6) et 50 % pour le substrat n°1. De fortes variations ont également été observées au niveau des différentes classes granulométriques (figure 2.2). Les courbes de rétention en eau des différents substrats sont présentées à la figure 2.3. Les substrats n°1 et 5 possédaient une plus grande rétention en eau pour tous les potentiels matriciels mesurés alors que les substrats n° 2, 3, 4, 6, 7 et 8 présentaient une rétention en eau similaire.

La conductivité hydraulique saturée moyenne pour l'ensemble des substrats a été de 0.06 cm s^{-1} avec des valeurs extrêmes situées entre 0.02 pour le substrat n°1 et 0.11 cm s^{-1} pour le substrat de la pépinière n°6 (tableau 2.6). La masse volumique apparente (MVA) des substrats étudiés était située entre 0.076 à 0.105 g cm^{-3} . Une différence significative a été observée ($P < 0.001$) entre les substrats, le n° 1 et le n° 5 possédant la MVA la plus élevée. La porosité totale (TP) des différents

substrats a peu varié, TP oscillant entre 0.942 et 0.954 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$. Les substrats 3 et 7 ont présenté la plus forte teneur en air (θ_a) ($>0.14 \text{ cm}^3 \text{cm}^{-3}$) alors que la plus faible θ_a a été observée chez le substrat n°1 (0.04 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$). Il n'y a pas eu de différence significative entre les substrats pour les valeurs d'EFU ($P = 0.09$) mais une différence significative fut observée pour l'EU ($P < 0.001$). La valeur d'EFU moyenne de tous les substrats était de 0.31 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ tandis que la valeur moyenne de l'EU était de 0.42 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$. Pour ce qui est du coefficient d'efficacité des pores (γ) et de la diffusivité relative des gaz ($D_s D_0^{-1}$), aucune différence significative attribuable aux pépinières n'a été observée (tableau 2.6). Les valeurs de γ ont présenté une faible variation passant de 6.6 % pour le substrat n°1 à 11.8 % pour le substrat n°2. La valeur de $D_s D_0^{-1}$ la plus faible rencontrée était celle du substrat n°1 (0.0041) et la valeur la plus élevée provenait du substrat n°3 (0.0171) attribuable à la θ_a élevée de ce substrat.

Aucune corrélation significative n'a été observée entre les six variables morphologiques et les dix propriétés physiques mesurées sur les substrats à l'état frais (tableau 2.7). Toutefois, parmi les corrélations établies entre les trois propriétés physiques mesurées au même moment que la mesure des variables morphologiques (c.-à-d. au printemps 2009), une relation linéaire significative a été observée entre $K_s(1)$ et M_{AER} ($r = -0.53$, $P = 0.008$) et le diamètre au collet ($r = -0.42$, $P = 0.039$). Le coefficient de corrélation entre la teneur en air et M_{AER} ($r = -0.53$, $P = 0.008$; figure 2.5) et D ($r = -0.52$, $P = 0.01$) s'est révélé significatif. La MVA a, quant à elle, été corrélée significativement avec M_{RAC} ($r = 0.63$, $P = 0.001$; tableau 2.7 et figure 2.4). Les variables morphologiques ont aussi été corrélées avec la dose d'azote (N), de phosphore (P) et de potassium (K) appliquée par plant ($n=7$) et une relation linéaire positive a été observée entre la M_{AER} et P ($r = 0.837$, $P = 0.019$) ainsi qu'entre la hauteur du plant et la dose de P appliquée ($r = 0.823$, $P = 0.021$). Le diamètre était corrélé avec N ($r = 0.803$, $P = 0.03$) et P ($r = 0.856$, $P = 0.0112$) et le rapport H/D avec N ($r = -0.812$, $P = 0.0265$).

2.5 Discussion

Les propriétés physico-chimiques des substrats après une saison de croissance étaient significativement corrélées à plusieurs des variables morphologiques mesurées chez les plants d'épinette blanche issus de huit pépinières forestières. La croissance de ces plants fut toutefois peu corrélée avec les propriétés physiques des substrats à l'état frais (tableau 2.7). Puisque les valeurs moyennes des propriétés physico-chimiques et des variables de croissance pour chacune

des pépinières ont été utilisées lors des analyses statistiques, le nombre d'unités expérimentales était relativement faible ($n = 8$). De plus, il est possible que le nombre restreint de récipients prélevés lors de l'échantillonnage effectué chez les pépinières pour caractériser le substrat à l'état frais (cinq récipients) et pour caractériser la croissance des plants après un an (trois récipients) n'ait pas été représentatif de l'ensemble des récipients d'une pépinière qui peut compter une population de plusieurs dizaines de milliers de récipients. Il semble en effet difficile de relier la croissance des résineux à certaines des propriétés physiques mesurées à l'état frais (Bernier et Gonzalez, 1995; Folk *et al.*, 1992). En outre, les propriétés physiques des substrats changent durant la période de croissance et ces changements peuvent varier selon le substrat (Allaire-Leung *et al.*, 1999; Lemaire *et al.*, 2003). Ainsi, il faut plusieurs cycles de désorption et résorption de l'eau dans la tourbe afin que sa structure et sa densité se stabilisent. Les corrélations significatives observées entre les variables morphologiques et les propriétés physiques mesurées à la fin de la saison de croissance l'ont été parce que ces dernières furent mesurées sur un même récipient permettant ainsi une augmentation du degré de liberté à l'erreur. Par ailleurs, puisque les substrats examinés au cours de cette étude provenaient de plusieurs pépinières réparties à travers la province, de nombreuses variables ont pu influencer la croissance et le développement des plants d'épinette blanche durant la première année de croissance. Ces variables peuvent par conséquent rendre difficile l'interprétation de l'effet des propriétés physiques et chimiques des substrats en début de culture sur la croissance des plants d'épinette blanche. D'une part, la croissance du plant sera différente selon la provenance génétique de la semence (Carles *et al.*, 2005; Carles *et al.*, 2007). D'autre part, les différentes régions d'irrigation et de fertilisation utilisées par chacun des pépiniéristes auront aussi une influence sur les résultats finaux.

Des différences assez importantes ont été trouvées au niveau des propriétés physiques des substrats, et ce, malgré la similarité des ingrédients employés dans la confection de ces mélanges (tableau 2.6). Le MRNF propose des spécifications techniques quant à la granulométrie pour la tourbe de culture en récipients (DABS, 2007). Tous les substrats étaient conformes à ces spécifications à l'exception du substrat n° 5 qui possédait un peu plus de 45 % de particules de taille supérieure à 1.7 mm (figure 2.2). Aucun des substrats ne possédait un rapport particule grossière (>2mm)/particule fine supérieur à 50 % tel que proposé comme norme acceptable pour la production de plants forestiers en récipient (Carlson, 1981). Il a été démontré que la croissance des semis d'épinette blanche était supérieure durant la première année de production lorsque le

substrat était composé de particules fines (<1.3 mm) (Bernier et Gonzalez, 1995). Aucune relation significative n'a cependant pu être observée entre MWD et les variables de croissance dans cette étude.

La θ_a à capacité en pot des substrats mesurés à l'état frais (comprise entre 4 et 17 %; tableau 2.6) était similaire aux valeurs de θ_a présentées dans la littérature pour ce type de substrat (Folk *et al.*, 1992; Heiskanen, 1995c, a; Caron *et al.*, 2010). À l'exception de la porosité d'air observée chez le substrat de la pépinière n° 1, ces valeurs étaient situées autour de la plus faible limite permettant la diffusion des gaz de façon acceptable (10 %) (Wesseling et Wijk, 1957) et une croissance et respiration des racines adéquates (10-15 %) (Vomocil et Flocker, 1961). Les corrélations négatives significatives (figure 2.5) observées entre θ_a mesurée après un an et la masse sèche de la partie aérienne et le diamètre indiquent que l'aération du substrat n'a pas limité la croissance des plants (tableau 2.7). Cela pourrait être expliqué par le faible besoin d'aération des conifères (Johnson, 1968). La θ_a a été mesurée à capacité en pot ($\psi = -0.6$ kPa), un potentiel matriciel qui se maintient rarement durant de longues périodes après l'irrigation (Heiskanen, 1995c). Les courbes de désorption présentées à la figure 2.3 décrivent bien la réduction de la teneur en eau dans les substrats et son remplacement par de l'air sous un potentiel matriciel de -0.6 kPa. À des potentiels inférieurs à -2 kPa, la θ_a est élevée ($>0.15 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) pour la plupart des substrats. Les valeurs de θ_a observées à -0.6 kPa, étaient possiblement peu fréquentes dans les substrats en pépinières au cours de la saison de croissance. D'ailleurs, la régie d'irrigation utilisée dans les pépinières forestières locales tente de maintenir une teneur en eau entre 30 et 45 % v/v ce qui laisse amplement de pores remplis d'air (Lamhamedi *et al.*, 2001).

Les valeurs d'efficacité des pores estimées dans cette étude ($\gamma = 0.062 - 0.118$; tableau 2.6) étaient similaires à celles observées sur des substrats comparables ($\gamma = 0.06$ et 0.15 ; Caron et Nkongolo 2004) ($\gamma \approx 0.14$; avec la méthode directe; King et Smith 1987). Ces valeurs étaient toutefois supérieures à celles observées avec la même méthode pour des substrats de tourbe pure et de tourbe avec écorce broyée (0.0070 et 0.040; Caron *et al.* 2005). Cette étude confirme le faible niveau d'efficacité des pores des substrats tourbeux. Malgré une forte porosité totale, la tourbe possède une tortuosité des pores élevée, cette dernière étant causée par la grande présence de fibres imperméables aux gaz (King et Smith, 1987) et par la présence d'un volume important de microcystes (micropores) qui ne peuvent participer aux échanges gazeux en raison de leur petite

taille (Puustjarvi et Robertson, 1975). L'absence de différences significatives entre les coefficients d'efficacité des pores indique une variation importante de cette variable dont la méthode de calcul montre parfois des inconsistances (Caron et Nkongolo, 2004). En effet, cette variation de γ entre les substrats pourrait être due à une imprécision lors de la détermination de la porosité totale et du point d'entrée d'air qui sont deux variables critiques dans le calcul de γ .

Une variation élevée est également observée lors de la détermination de $D_s D_0^{-1}$. L'estimation de cette variable nécessite la réalisation de la courbe de rétention en eau et trois mesures (le point d'entrée d'air, K_s et θ_a) dont l'erreur additive augmente l'erreur associée à $D_s D_0^{-1}$ rendant difficile l'observation de différence entre les différents substrats (Caron et Nkongolo, 2004). Néanmoins, les valeurs de $D_s D_0^{-1}$ obtenues au cours de cette étude sur les substrats de culture des pépinières forestières (0.0041 – 0.0171) étaient similaires à celles obtenues par Caron *et al.* (2010; $D_s D_0^{-1} = 0.0026$ à 0.0105) et Caron et Nkongolo (2004; $D_s D_0^{-1} = 0.0067$ à 0.023) avec la même méthode. Allaire *et al.* (1996) ont obtenu des valeurs de $D_s D_0^{-1}$ situées entre 0.006 et 0.018 pour des substrats de culture horticoles. Les valeurs de $D_s D_0^{-1}$ et d'efficacité des pores mesurées à capacité en pot n'ont présenté aucune corrélation significative avec les variables de croissance (Tableau 2.7) contrairement à plusieurs études où des relations linéaires positives ont été observées avec un gradient de $D_s D_0^{-1}$ similaire à cette étude (Allaire *et al.*, 1996; Nkongolo et Caron, 2006a, b). Les trois études énumérées précédemment portaient sur des substrats à base de tourbe auxquels fut ajoutée de l'écorce d'arbre, le mélange final ayant une structure différente du mélange tourbe-vermiculite employé ici. Allaire *et al.* (1996) ont fixé un seuil de diffusivité relative des gaz ($D_s D_0^{-1} = 0.015$) favorisant la croissance de *Prunus cistena* en récipient. Il est possible que les valeurs de $D_s D_0^{-1}$ des substrats provenant des pépinières forestières n'aient pas été suffisamment faibles pour limiter la croissance de l'épinette blanche. Il est probable que l'épinette blanche soit tolérante aux faibles $D_s D_0^{-1}$ puisqu'en nature, elle peut croître dans une variété de sols et de conditions d'humidité (Nienstaedt et Zasada, 1990). Par ailleurs, dans cette étude, les plants étaient cultivés dans des cavités de faible volume comparativement aux pots employés dans les expériences touchant cette problématique (1 litre et plus) (Allaire *et al.*, 1996; Caron *et al.*, 2010). Contrairement à ce type de pot, les récipients utilisés étaient d'une hauteur moindre et donc, possédaient une plus grande surface disponible pour les échanges gazeux par rapport au volume.

Les valeurs de K_s observées au cours de cette étude sont cohérentes avec celles retrouvées dans la littérature pour ce genre de substrat (Allaire-Leung *et al.*, 1999). Par ailleurs, la conductivité hydraulique saturée $K_s(1)$ était négativement corrélée avec la masse sèche de la section aérienne et le diamètre du plant (Tableau 2.7). $D_s D_0^{-1}$ étant fortement corrélée à K_s , ces relations indiquent l'absence de limitation de cette variable. K_s peut donc constituer un indice valable pour caractériser la qualité des substrats (Mustin, 1987). Les valeurs de masse volumique apparente (Tableau 2.6) correspondent aux valeurs répertoriées dans la littérature pour des substrats de mousse de tourbe employés en pépinière forestière (Carlson, 1981; Heiskanen, 1993a; Caron et Rivière, 2003). Le niveau d'humification de la tourbe, la réduction de la taille des particules et la compaction du substrat à l'emportage peuvent accroître la masse volumique (Heiskanen, 1993a; Bernier et Gonzalez, 1995). Une corrélation positive fut observée entre la masse volumique apparente et la masse sèche des racines (tableau 2.7; figure 2.4). Une telle corrélation n'a cependant pas été observée par Bernier et Gonzalez (1995) dans une expérience contrôlée. Une masse volumique moindre pourrait avoir affecté l'alimentation en eau des plants résultant en une plus faible masse totale des plants. Des particules de taille importante et une faible masse volumique peuvent réduire la conductivité hydraulique non saturée alors que l'ajout de particules fines et une densité plus élevée peuvent accroître la conductivité hydraulique non-saturée (Heiskanen, 1999). La conductivité hydraulique est faible dans les substrats tourbeux en condition d'assèchement (da Silva *et al.*, 1993; Heiskanen, 1999) et il a été démontré que les plants peuvent subir un stress hydrique important lors de fortes demandes d'évapotranspiration (Landis *et al.*, 1989b).

Les substrats des huit pépinières forestières présentaient des courbes de désorption différentes entre elles (figure 2.3) mais similaires, dans l'ensemble, à celles observées dans d'autres études portant sur les substrats pour culture en récipient (Bernier *et al.*, 1995; Heiskanen, 1995b). Les valeurs de porosité totale des substrats étudiés étaient similaires à celles observées dans la littérature pour une tourbe fibrique blonde-brune (Puustjarvi et Robertson, 1975; Heiskanen, 1993a; Caron et Rivière, 2003). Les teneurs en eau facilement utilisable et utilisable ont peu différé entre les substrats (Tableau 2.6). Cela n'est pas vraiment surprenant puisque les teneurs en eau volumique à -5 et -10 kPa sont similaires sauf pour le substrat n° 1 qui possédait une teneur en eau généralement plus élevée (figure 2.3). Bernier et Gonzalez (1995) ont observé une corrélation positive entre la masse racinaire et l'eau facilement utilisable. Cette relation n'a toutefois pas été

observée ici. La fertilisation appliquée au cours de la saison de croissance a influencé le développement des plants comme l'ont démontré les corrélations entre N, P et la masse aérienne, la hauteur et le diamètre des plants (Tableau 2.7). La quantité de nutriments nécessaire durant la production (Tableau 2.1) est calculée afin d'optimiser la concentration en éléments nutritifs dans le substrat et dans les tissus végétaux en fonction de la masse atteinte par le plant (Langlois et Gagnon 1993). L'effet des différentes régies de fertilisation utilisées par les pépiniéristes en 2008 peut, par conséquent avoir masqué certaines des relations entre les propriétés physiques et chimiques des substrats et les variables de croissance des plants d'épinette blanche. Les analyses de concentration en éléments minéraux des tissus présentaient toutefois des valeurs idéales pour la croissance de semis de conifères (Landis, 1985).

2.6 Conclusion

Cette caractérisation effectuée durant l'année de production 2008 reflète les variations de la qualité de la tourbe locale et les différentes méthodes culturales utilisées par les pépiniéristes. Alors que les propriétés chimiques des substrats étaient similaires entre les mélanges d'emportage, les propriétés physiques ont varié de façon appréciable. Durant la première année de production, l'aération des substrats utilisés par les pépinières n'a pas eu d'effet limitant sur la croissance et le développement des plants d'épinette blanche produits en récipient 25-310. La culture sous tunnel effectuée durant la première année de production est caractérisée par une irrigation contrôlée propice au maintien de teneurs en eau et en air adéquates. Les faibles teneurs en air à capacité en pot et les faibles indices de $D_5D_0^{-1}$ observés dans certains substrats pourraient toutefois constituer un problème pour la croissance racinaire lors de la deuxième année de production effectuée à l'extérieur et soumise aux précipitations parfois prolongées. Cette hypothèse devrait être vérifiée par un suivi de la croissance des plants après la deuxième saison de culture. L'augmentation de la masse volumique apparente a présenté un effet positif intéressant au niveau de la croissance racinaire.

2.7 Tableaux et figures

Tableau 2.1 Dose (mg) en éléments majeurs appliqués par plant durant la période de culture étudiée, localisation géographique des pépinières à l'étude, degrés-jours de croissance et dates de semis en 2008 des plants d'épinette blanche selon la pépinière de provenance.

Pépinière	N total	N-NH ₄	N-NO ₃	N-Urée	P	K	Latitude	Longitude	Degrés-jours ^a	Date de semis
1	86						48° 01' 23"	65° 15' 00"	1250-1500	
2	34			17.2	21	21	48° 14' 42"	65° 51' 06"	1250-1500	11 mai
3	106	67	38	0.8	24	38	47° 49' 28"	69° 24' 09"	1250-1500	9 mai
4	83				19	30	46° 42' 06"	72° 50' 36"	1500-1750	8 mai
5	82				27	49	46° 20' 54"	71° 39' 00"	1750-2000	12 mai
6	51				12	26	46° 03' 36"	73° 12' 00"	1750-2000	9 mai
7	51	14	17	21	9	20.7	46° 43' 54"	72° 42' 06"	1250-1500	16-20 mai
8	48	9	13	27	13	31	48° 48' 48"	72° 45' 00"	1250-1500	7 mai

^a Nombre normal de degrés-jours de croissance annuelle au-dessus de 5 °C (Énergies, Mines et Ressources Canada, 1981).

Tableau 2.2 Composition du substrat, type de mélangeur employé et moyennes des propriétés physico-chimiques des substrats (n = 5) à l'état frais selon la pépinière de provenance au printemps 2008.

n°	Mousse de tourbe		Vermiculite		Perlite (% V/V)	Type de mélangeur	pH	CE mS m ⁻¹	N_NH ₄	N_NO _{2_3}	P µg 100 cm ⁻³	K	Ca	Mg	CEC _{eff} még/L
	(% V/V)	Catégorie	(% V/V)	Taille (mm)											
1	75	BP-Fine et blonde longue	25	0.1 – 2.4	0	Vis	4.2	116.7	14	2	16	57	4	27	26.3
2	75	BP-Fine et blonde longue	25	0.1 – 2.4	0	Vis	3.81	209	13	6	18	60	7	35	22.4
3	80	B	20	0.1 – 2.4	0	Vis	4.1	126	32	5	51	52	5	21	21.6
4	86	Blonde, fibre longue	15	0.1 – 2.4	0	Palmes	4.14	119.7	14	19	17	37	4	19	26.3
5	75	BP-Pro	25	0.1 – 2.4	0	Vis	4.2	166	28	2	90	90	12	39	32.2
6	80	B	20	0.1 – 2.4	0	Vis	4.17	213.3	17	10	53	157	15	5	33.9
7	60	B	40	0.1 – 1.2	0	Vis	4	161.3	18	7	7	40	4	26	24.4
8	82	Grossière	9	0.1 – 1.2	9	Vis	3.99	143.6	29	9	8	19	5	29	25.0

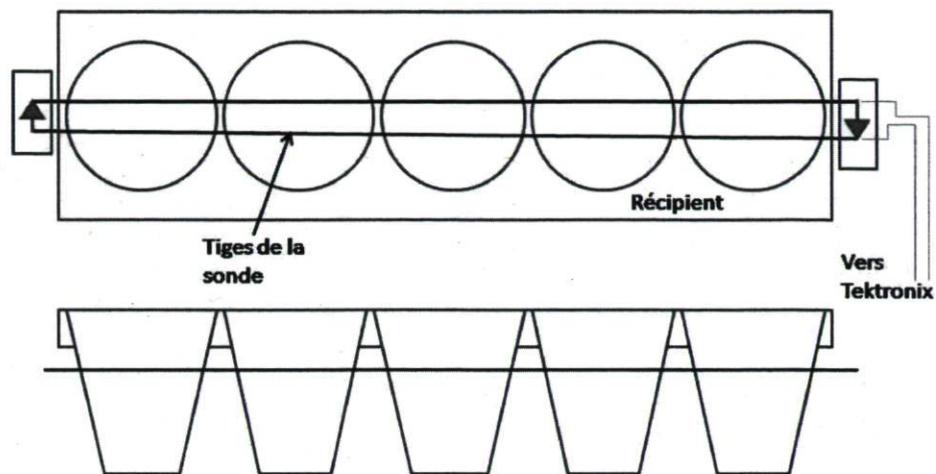


Figure 2.1 Insertion horizontale de la sonde TDR dans le récipient.

Tableau 2.3 Valeur moyenne (n = 3) des variables morphologiques des plants d'épinette blanche (1+0) selon leur pépinière de provenance (M_AER = Masse sèche aérienne, M_RAC = Masse sèche des racines, H = Hauteur, D = Diamètre et H/D = Rapport hauteur diamètre.

Pépinières	M_AER (mg)	M_RAC (mg)	H (mm)	D (mm)	H/D
1	1 244	520	93	2.90	32.2
2	1 190	552	100	3.39	29.5
3	997	370	99	2.72	36.7
4	896	355	99	2.37	41.7
5	812	371	129	2.41	53.3
6	734	506	82	2.27	36.4
7	511	274	69	1.81	38.3
8	277	177	64	1.36	47.1
Moyenne	836	393	87	2.40	37.4
E-T*	78	39	3.2	0.07	1.6

Les moyennes qui portent la même lettre dans une même colonne ne sont pas significativement différentes à P = 0.05 selon un test de LSD protégé. * E-T = Écart-type.

Tableau 2.4 Concentration en éléments nutritifs (N, P, K, Ca et Mg) (g kg^{-1}) dans les racines et la partie aérienne.

Racines		Partie aérienne																		
Pépinières	N	P	K	Ca	Mg	N	P	K	Ca	Mg										
1	26.8	a	2.5	a,b	1	b,c	1.5	d	1	c	26.8	a,b	3.1	b,c,d	5.5	d,e	1.4	c	1.3	d
2	21.1	b,c	2.2	b,c	0.7	c,d	2.2	a,b,c	1.3	b	24.1	b,c	3.2	b	6.7	c,d	1.9	a,b	1.8	a
3	19.3	c	2	c,d	0.8	c,d	1.7	b,c,d	1	c	23.1	b,c,d	2.6	c,d	5.4	e	1.7	b	1.5	b,c,d
4	23.4	a,b	2.9	a	5	a	2.4	a	1.6	a	23.6	b,c,d	2.6	c,d	8.1	b	1.7	b	1.7	a,b
5	18.6	c,d	1.8	d,e	1.5	b	2.2	a,b	1.7	a	21.3	c,d	3.1	b,c	18.6	a	2.1	a	1.7	a,b,c
6	14.9	d	1.6	e	0.8	c,d	1.6	c,d	0.8	c	19.9	d	2.6	d	6.4	b,c	1.3	c	1.4	c,d
7	21.8	b,c	2.4	b,c	0.8	c,d	2.4	a	1.1	b,c	30.7	a	4.2	a	7.2	c,d,e	2.1	a	1.9	a
8	19.8	b,c	2	c,d	0.5	d	1.9	a,b,c,d	1.1	b,c	25.1	b,c	3.4	b	6.2	c,d,e	1.6	b	1.5	b,c,d
E-T*	1.3	0.13	0.14	0.2	0.1	0.2	0.4	0.08	0.1	0.1	1.3	0.2	0.4	0.08	0.1					

Les moyennes qui portent la même lettre dans une même colonne ne sont pas significativement différentes à $P = 0.05$ selon un test de LSD protégé. * E-T = Écart-type.

Tableau 2.5 Moyenne des diamètres moyens pondérés des particules (MWD) et contenu en particules de diamètre situé entre 1 et 4 mm et inférieur à 0.5 mm des substrats à l'état frais.

Pépinières	MWD (mm)	1 à 4 mm $g\ g^{-1}$	< 0.5 mm
1	1.02 d	0.24 e	0.50 a
2	2.17 a,b,c	0.3 c,d,e	0.32 b,c
3	1.39 c,d	0.41 b	0.21 d
4	1.30 d	0.34 b,c,d	0.36 b
5	2.77 a	0.39 b,c	0.1 e
6	2.70 a	0.52 a	0.09 e
7	1.68 b,c,d	0.29 d,e	0.4 b
8	2.42 a,b	0.34 c,d	0.25 c,d
Moyenne	1.81	0.35	0.28
E-T	0.4	0.06	0.04

Les moyennes qui portent la même lettre (a-f) ne sont pas significativement différentes à $P = 0.05$ en utilisant le test de LSD protégé. * E-T = Écart-type.

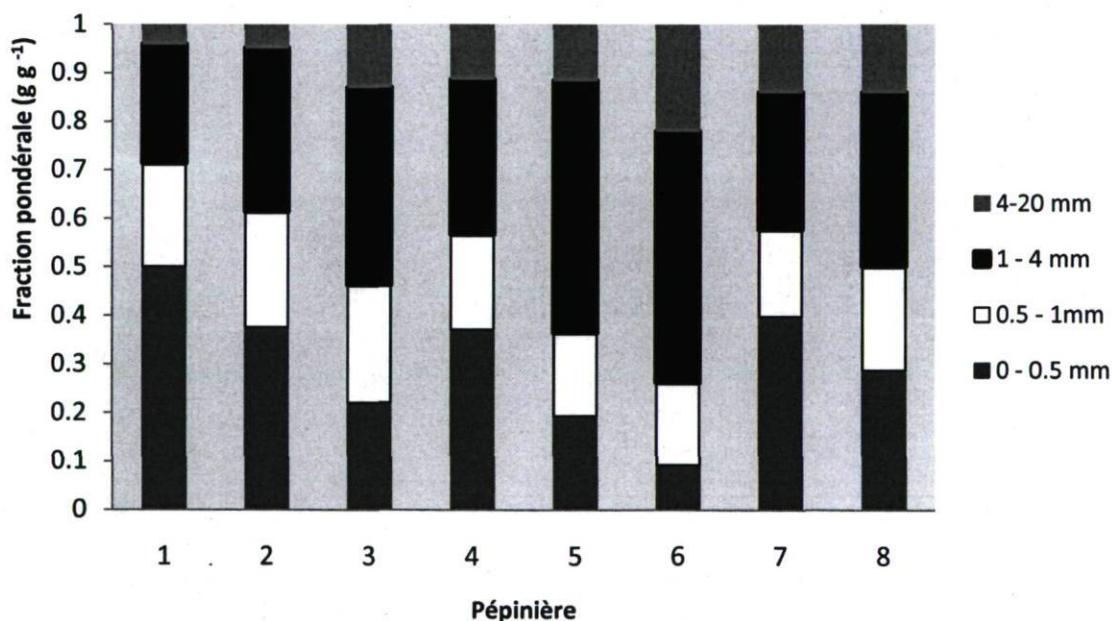


Figure 2.2 Fraction pondérale des classes granulométriques des substrats.

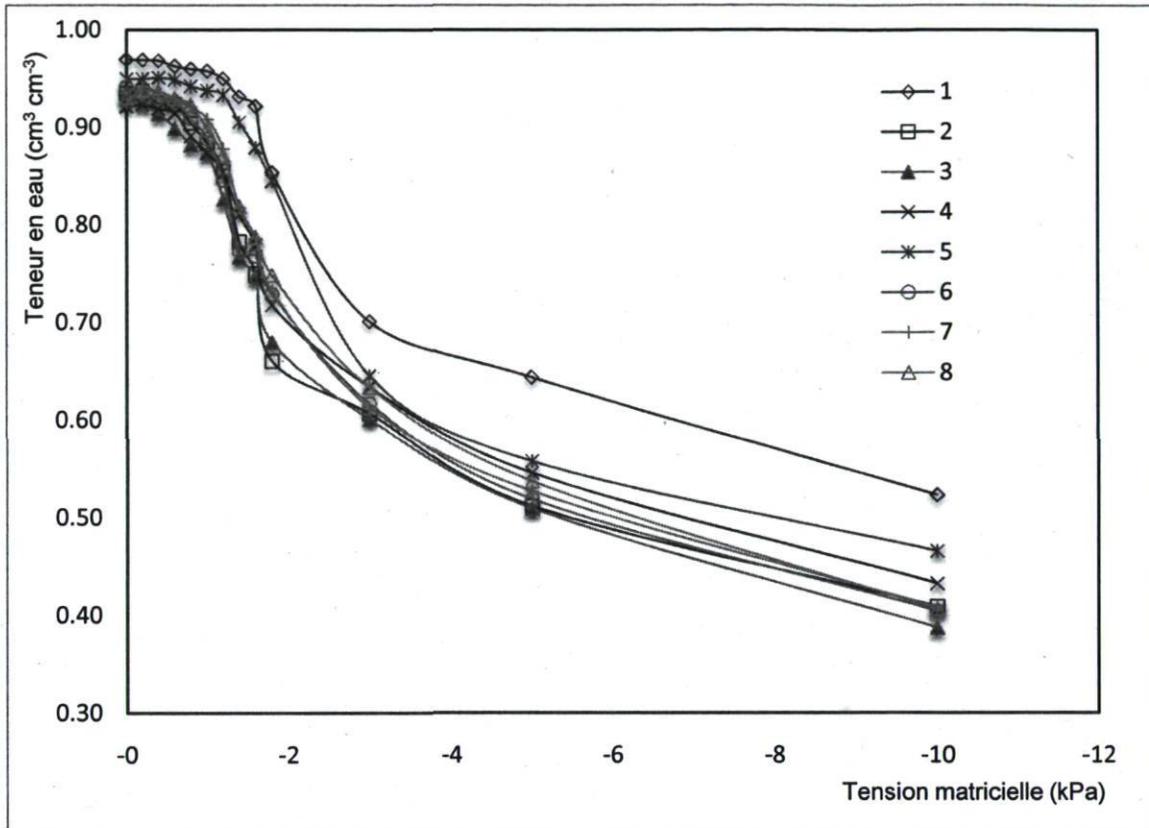


Figure 2.3. Courbe de désorption de l'eau des substrats à l'état frais.

Tableau 2.6. Propriétés physiques moyennes des substrats à l'état frais : la conductivité hydraulique saturée (Ks), la masse volumique apparente (MVA), la porosité totale (TP), la teneur en air à capacité en pot (θ_a), l'eau facilement utilisable (EFU), l'estimation du coefficient d'efficacité des pores (γ) et la diffusivité relative des gaz ($D_3D_0^{-1}$).

Pepinière	Ks (cm s^{-1})	MVA (g cm^{-3})	TP	θ_a ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	EFU	EU	γ m m^{-1}	$D_3D_0^{-1}$ $\text{m}^2 \text{s}^{-1} \text{m}^{-2} \text{s}$
1	0.02	b,c 0.095	a,b 0.943	b,c 0.04	0.26	0.38	b,c 0.093	0.0041
2	0.04	d 0.089	c 0.945	b,c 0.11	0.29	0.44	a,b 0.066	0.0070
3	0.09	e 0.076	d 0.954	a 0.17	0.28	0.40	a 0.096	0.0171
4	0.08	b,c 0.094	a,b 0.943	b,c, 0.09	0.34	0.41	a 0.108	0.0088
5	0.03	a 0.105	a 0.938	d 0.11	0.26	0.39	c 0.105	0.0119
6	0.11	b 0.099	a 0.942	b,c 0.08	0.30	0.46	a 0.118	0.0091
7	0.05	d 0.088	c 0.945	b 0.14	0.28	0.40	a 0.075	0.0104
8	0.05	c,d 0.092	c,d 0.944	b,c 0.08	0.33	0.46	a 0.081	0.0061
Moyenne	0.06	0.091	0.944	0.11	0.31	0.42	0.087	0.0090
E-T*	0.01	0.002	0.001	0.02	0.04	0.02	0.02	0.01

Les moyennes qui portent la même lettre (a-f) ne sont pas significativement différentes à $P = 0.05$ en utilisant le test de LSD protégé. * E-T = Écart-type.

Tableau 2.7. Coefficients de corrélation de Pearson^a entre les valeurs moyennes des variables morphologiques et les propriétés physiques et chimiques des substrats. De plus, les coefficients de corrélation ont été déterminés entre les variables de croissance et la dose d'azote (N) de phosphore (P) et de potassium (K) appliquée par plant pendant la saison de croissance. Les propriétés physiques suivies d'un 1 ont été mesurées après une année de culture (n = 24) alors que celles sans 1 ont été mesurées après confection des substrats (n = 8).

		M_AER ^b	M_RAC	H	D	H/D
Propriétés physiques, après confection.	Ks	0.02	0.28	-0.18	0.17	-0.41
	MVA	-0.03	0.28	0.31	0.00	0.34
	TP	0.09	-0.19	-0.24	0.06	-0.35
	θ_a	-0.18	-0.39	0.11	-0.10	0.17
	MWD	-0.62	-0.36	0.07	-0.58	0.77
	1_4MM	-0.24	0.06	0.10	-0.16	0.24
	<0.5mm	0.30	0.06	-0.29	0.17	-0.50
	EFU	-0.25	0.11	-0.44	-0.08	-0.27
	EU	-0.45	-0.08	-0.50	-0.30	-0.05
	γ	0.34	0.66	0.35	0.47	-0.21
$D_s D_0^{-1}$	0.02	-0.10	0.33	0.12	0.12	
Propriétés chimiques après confection.	pH	-0.11	-0.07	-0.30	-0.32	-0.06
	CE	-0.30	-0.03	-0.39	-0.10	-0.23
	CEC _{eff}	-0.41	-0.08	-0.47	-0.45	-0.03
	NH ₄	-0.13	-0.06	0.32	-0.09	0.37
	NO ₂₋₃	-0.20	-0.44	0.14	-0.23	0.40
	P	-0.11	0.22	-0.32	-0.07	-0.35
	K	-0.27	-0.06	-0.60	-0.23	-0.40
	Ca	-0.32	0.02	-0.43	-0.23	-0.24
	Mg	0.32	0.61	0.30	0.41	-0.13
Dose d'engrais appliquée	N	0.716	0.628	0.516	0.803*	-0.812*
	P	0.837*	0.563	0.823*	0.856*	-0.563
	K	0.389	0.370	0.268	0.519	-0.428
Propriétés physiques après une année de culture	Ks(1)	-0.53**	-0.29	-0.09	-0.42*	0.41*
	MVA(1)	0.33	0.63**	0.28	0.35	-0.14
	$\theta_a(1)$	-0.53**	-0.37	-0.28	-0.51*	0.23

^a Pour les variables mesurées après confection, le plus petit coefficient significatif est 0.75 (P<0.05, n = 8). Pour les variables physiques mesurées après un an de croissance (1), le plus petit coefficient significatif est 0.40 (P<0.05, n = 24). * P<0.05, **P < 0.01.

^b M_AER = masse sèche aérienne, M_RAC = masse sèche des racines, H = hauteur, D = diamètre au collet H/D = ratio hauteur/diamètre, Ks = conductivité hydraulique saturée, MVA = masse volumique apparente, TP = porosité totale, θ_a = teneur en air, MWD = diamètre moyen pondéré des particules, 1_4MM = teneur en particules de diamètre situé entre 1 et 4 mm <0.5mm = particules inférieures à 0.5 mm, EFU = eau facilement utilisable, EU = eau utilisable, γ = efficacité des pores, $D_s D_0^{-1}$ = diffusivité relative des gaz, CE = conductivité électrique et CEC_{eff} = capacité d'échange cationique effective.

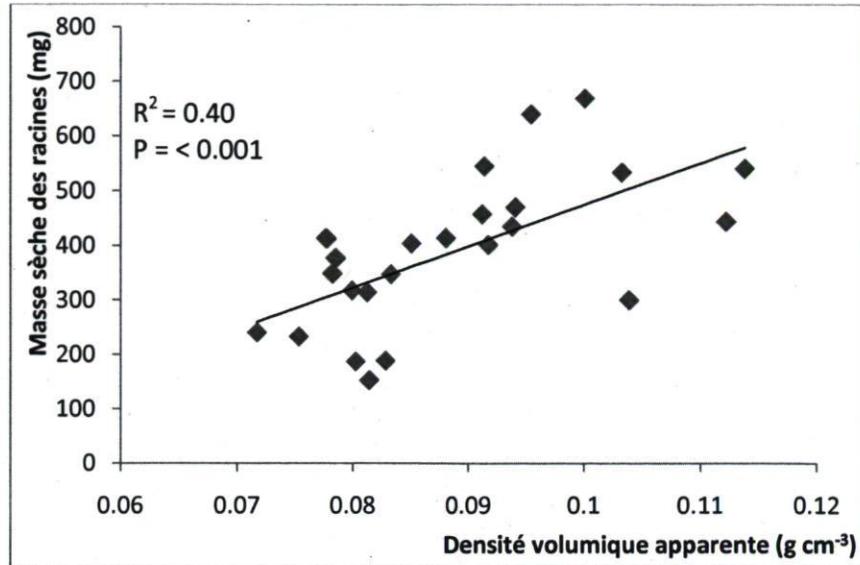


Figure 2.4. Augmentation de la masse sèche des racines des plants d'épinette blanche (1+0) en fonction de l'augmentation de la masse volumique apparente des substrats (n=24).

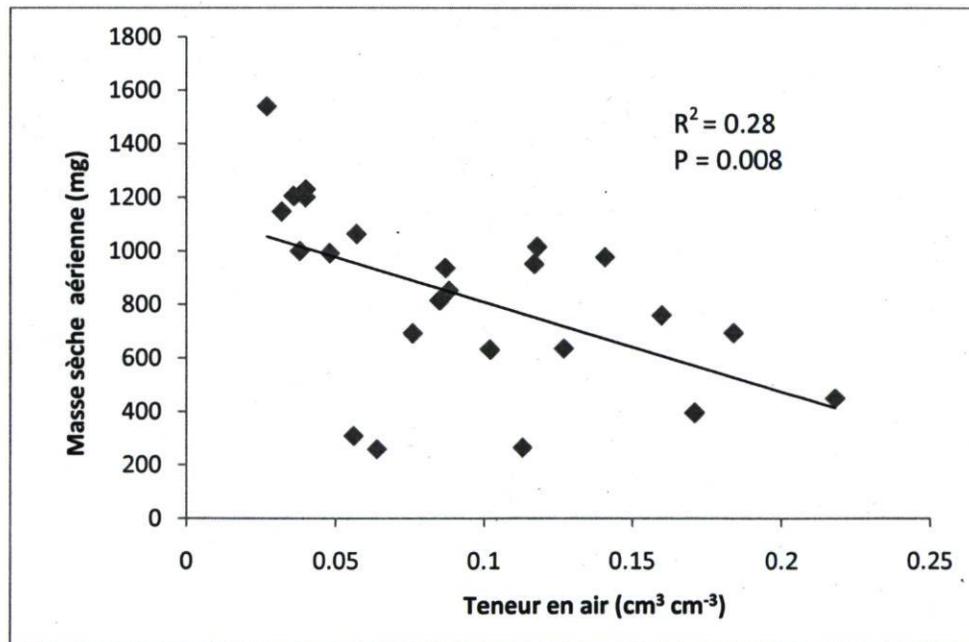


Figure 2.5. Effet de la teneur en air sur la masse sèche aérienne des plants d'épinette blanche (1+0).

Chapitre 3. Effets des propriétés physiques et chimiques des substrats sur la croissance et le développement de plants d'épinette blanche produits en pépinière forestière.

3.1 Résumé

Des plants d'épinette blanche (1+0) produits en récipient 25-310 ont été cultivés pendant une saison de croissance dans plusieurs substrats de mousse de tourbe de sphaigne composés de tourbe grossière et fine (<0.5 mm), de perlite et de vermiculite. L'expérience a eu lieu sur un site de production de plants à grande échelle et les régies d'irrigation et de fertilisation utilisées au cours de la saison de croissance ont été celles du producteur. L'expérience a été réalisée à deux reprises (2008 et 2009) avec des substrats de compositions différentes. Le potentiel matriciel des substrats a été mesuré pendant la culture à l'aide de tensiomètres. Les propriétés physiques des substrats telles la masse volumique apparente (MVA), la granulométrie des particules, la porosité totale (PT), la teneur en air (θ_a), le coefficient d'efficacité des pores (γ) et un indice de diffusivité relative des gaz ($D_s D_0^{-1}$) ont été mesurés en début de culture et après une saison de croissance pour chacune des deux années sous étude. Les propriétés chimiques mesurées furent le pH, la conductivité électrique (CE), la capacité d'échange cationique effective (CEC_{eff}) et la teneur en éléments nutritifs (N-NH₄, N-NO₂₋₃, P, K, Ca, Mg). Une analyse de régression multiple a été effectuée afin de vérifier l'effet de ces propriétés sur la masse racinaire et aérienne et la hauteur des plants d'épinette blanche. Au cours des deux essais, un effet significatif des substrats a été observé sur l'ensemble des variables de croissance et des modèles de régression multiple ont été produits pour établir qu'elles sont les propriétés physiques et chimiques les plus importantes ($R^2 = 0.30 - 0.69$, $P < 0.05$). Les propriétés physiques d'aération expliquaient mieux la croissance des plants que les propriétés chimiques. Par contre, l'effet des propriétés a différencié entre les deux années. En 2008, c'est principalement l'augmentation de la porosité d'air (θ_a) qui a eu un effet négatif sur la croissance. En 2009, la croissance a été affectée par une réduction de γ dans les substrats. Ces différences pourraient être expliquées par un plus faible degré de compaction des substrats et un potentiel matriciel plus faible en 2008. Sous ces conditions plus sèches, une augmentation du potentiel matriciel moyen fut observée chez les substrats contenant de la vermiculite (-2.7 kPa versus -4.3 kPa sans vermiculite). Les résultats de cette étude suggèrent que l'optimum de $D_s D_0^{-1}$, une variable relié à γ , pour la culture de l'épinette blanche en récipient se situe entre 0.003 et 0.016. Une bonne résistance de l'espèce à une faible aération associée à la faible volumétrie des cavités tend à permettre la culture dans des substrats présentant de faibles échanges gazeux comparativement aux substrats utilisés dans d'autres cultures en récipient.

3.2 Introduction

Au Québec, plus de 150 millions de plants forestiers sont produits en pépinière annuellement (DGPSP, 2009). Ces plants doivent répondre à différents critères de qualité. L'un des critères les plus importants est celui d'assurer que le plant possède une carotte de racines et de tourbe ferme et ayant une bonne cohésion (DGPSP, 2009). Cette caractéristique est importante puisqu'elle permet de conserver l'intégrité de la carotte lors des manipulations associées aux étapes du reboisement. C'est principalement la densité et l'uniformité des racines qui assurent cette cohésion ainsi qu'une densité suffisante du substrat. Un plant avec suffisamment de racines possèdera une meilleure croissance et un taux de survie plus élevé après son reboisement (Tinus, 1974). Les propriétés physiques du substrat influencent la croissance des plantes horticoles (Bunt, 1988; Allaire *et al.*, 1996), des plants forestiers et de leur système racinaire (Lackey *et al.*, 1982; Folk *et al.*, 1992; Heiskanen, 1994a; Bernier et Gonzalez, 1995). Plusieurs études ont démontré la capacité qu'ont les composantes utilisées lors de la confection du substrat à modifier les propriétés physiques et chimiques (Heiskanen, 1995b). L'aération du substrat est importante puisqu'elle permet une respiration adéquate des racines assurant ainsi un bon prélèvement des nutriments et de l'eau par celles-ci (Carlson, 1981; Landis *et al.*, 1989a). La teneur en air (θ_a) est largement utilisée comme indice d'aération (Heiskanen, 1993a; Lemaire *et al.*, 2003). Employée seule, elle ne permet toutefois pas de déterminer la connexion entre les pores qui dirige les échanges gazeux. Un indice de diffusivité relative des gaz ($D_s D_0^{-1}$), déterminé à partir des caractéristiques de la courbe de désorption et des mesures de conductivité hydraulique saturée, constituerait un indice supérieur à θ_a pour vérifier l'effet des échanges gazeux sur le développement et la croissance d'espèces végétales (Allaire *et al.*, 1996; Nkongolo et Caron, 1999; Caron et Nkongolo, 2004). Ces travaux ont démontré que la présence de particules grossières dans les substrats pouvait constituer des barrières aux échanges gazeux, réduisant $D_s D_0^{-1}$, et ce, malgré l'accroissement de θ_a induit par la présence de ces particules. Ces informations concordent bien avec les travaux de Bernier et Gonzalez (1995) qui ont observé une croissance plus grande de l'épinette blanche et de l'épinette noire dans des mousses de tourbes fines comparativement à celle observée dans des tourbes grossières possédant une plus grande θ_a . À l'inverse, une surabondance de particules fines augmente la rétention en eau. Comme l'eau possède une très faible capacité de diffusion des gaz, cette situation réduit le volume de pores utiles aux échanges

gazeux. L'effet de la taille des particules sur l'aération est important puisque les pépiniéristes ont la possibilité de s'approvisionner en tourbe de granulométrie variable bien que les tourbes très grossières aient tendance à se raréfier suivant la durée d'exploitation des tourbières. Le niveau d'humification de la tourbe et les manipulations associées à sa récolte et sa manutention accroissent la quantité de particules fines. Aucune étude n'a tenté de déterminer $D_s D_0^{-1}$ dans les substrats d'empotage tourbe-vermiculite employés en pépinière forestière et d'en vérifier l'effet sur le développement de plants forestiers cultivés en récipient. D'autre part, la mousse de tourbe de sphaigne est reconnue pour sa grande capacité de rétention en eau, sa forte capacité d'échange cationique (CEC), sa faible fertilité initiale et son pH idéal pour la culture des conifères (Landis *et al.*, 1989a). Puisque la fertilité de départ des substrats tourbeux est faible et que l'apport en nutriments provient principalement de l'extérieur, il est proposé que les propriétés physiques, particulièrement celles en lien avec l'aération des substrats et les relations hydriques, auront un plus grand impact sur la croissance des plants. L'objectif de cette étude est de tester l'effet de substrats composés de tourbe grossière et fine (<0,5 mm), de perlite et de vermiculite sur la croissance de plants d'épinette blanche (1+0) produits en récipient 25-310. Les propriétés physiques examinées au cours de cette étude seront la masse volumique apparente (MVA), la granulométrie des particules, la porosité totale (PT), la teneur en air (θ_a), le coefficient d'efficacité des pores (γ) et un indice de diffusivité relative des gaz ($D_s D_0^{-1}$). Les propriétés chimiques mesurées seront le pH, la conductivité électrique (CE), la capacité d'échange cationique effective (CEC_{eff}) et la teneur en éléments nutritifs (N-NH₄, N-NO₂₋₃, P, K, Ca, Mg).

3.3 Méthodologie

3.3.1 Fabrication des substrats

L'expérience s'est déroulée au cours de deux années de production à la pépinière forestière de la compagnie Pampev Inc. située à Saint-Louis-de-Blandford, dans la région du Centre-du-Québec (46° 20' 54" N, 71° 39' 00" O). Six substrats ont été confectionnés en 2008 et cinq en 2009. Le substrat utilisé par la pépinière Pampev fut inclus parmi les substrats étudiés à chacune des années d'expérimentation. Au total, 13 substrats ont été fabriqués en 2008 et 2009 (tableau 3.1). Pour confectionner les mélanges d'empotage de 2008, deux types de tourbe, blonde et brune, ont tout d'abord été tamisés avec un tamis de 0.5 mm d'ouverture (W.S. Taylor, St. Catherines,

Ontario) afin de séparer les particules grossières des particules fines. Le substrat TBG était constitué de 86 % v/v de particules grossières de tourbe blonde et de 14 % v/v de particules grossières de tourbe brune. Les substrats TFG, TFG-10F, TFG-50F, TFG-VG et TFG-VF ont été fabriqués à partir d'un mélange de base contenant 50 % de particules grossières de tourbe blonde et de 50 % v/v de particules grossières de tourbe brune. À ce mélange de base étaient ajoutés 0, 10 et 50 % v/v des particules de tourbe fine (<0.5 mm) afin de constituer respectivement les substrats TFG, TFG-10F et TFG-50F. Le substrat TFG-VG a été réalisé par ajout de 30 % v/v de vermiculite grossière (grade 2) et le substrat TVG-VF a reçu 30 % v/v de vermiculite fine (grade 4). Finalement, le substrat PPV employé par la pépinière Pampev Inc. était composé de tourbe blonde à fibres longues et de vermiculite (grade 3).

Les substrats réalisés en 2009 étaient les suivants. Tout d'abord, la tourbe de base employée pour tous les substrats était une tourbe blonde à fibres longues (Marque BP, Les Tourbières Berger Ltée, Saint-Modeste, Qc) à laquelle étaient ajoutés divers ingrédients à l'exception du substrat BG* qui était constitué à 100 % de tourbe blonde plus grossière (Les Tourbes Nirom inc., Rivière-du-Loup, Qc) (tableau 3.1). Le substrat BM-VP* possédait 15 % v/v de vermiculite et 10 % v/v de perlite. Finalement, les substrats BM*, BM-20F* et BM-40F* ont été additionnés respectivement de 0, 20 et 40 % v/v de particules fines de tourbes tamisées de taille inférieure à 0.5 mm. Un agent mouillant d'Aquagrow G® a été ajouté aux substrats fabriqués en 2009 à raison de 100 ml m⁻³ de substrat. Le substrat PPV* était le substrat de la pépinière Pampev et était constitué de 75 % de tourbe blonde et de 25 % de vermiculite grade 3. Les composantes de chaque substrat ont été mélangées uniformément lors de la confection. Cette étape permettait d'humecter les substrats avant l'empotage. Les substrats ont été empotés dans des récipients de polyéthylène haute-densité de 25 cavités non ventilées et d'un volume de 310 cm³. Afin d'obtenir un volume stable du substrat et d'éviter un trop grand affaissement durant la période de culture, les récipients empotés une première fois ont été soumis à trois cycles d'humectation-drainage-comblement des vides dans la portion supérieure (CPVQ, 1997).

3.3.2 Régies de culture

Une fois empotés, les récipients ont été déplacés à la pépinière Pampev afin que soient effectués l'ensemencement et la déposition de silice en surface, puis la mise en place sous tunnel de culture. Cette étape fut effectuée le 12 mai 2008 et le 29 mai 2009. Lors de ces deux années de

production, les récipients 25-310 ont été disposés en quatre blocs complets aléatoires. Deux rangs de garde étaient installés de chaque côté du bloc afin d'éviter les variations thermiques des bordures. Les semis ont été cultivés durant une saison de croissance selon la régie culturale sous tunnel de la pépinière Pampev. L'irrigation et la fertilisation ont été effectuées à l'aide d'un robot d'arrosage motorisé. En 2008, la dose de N était de 82 mg par plant, de P de 27 mg/plant et de K de 49 mg/plant. En 2009, la dose de N était de 57 mg, la dose de P de 20 mg et K fut appliqué à raison de 34 mg/plant. En 2008 et 2009, un dispositif de mesures en continu a été installé afin d'enregistrer le potentiel matriciel et la température des substrats. Ainsi, deux récipients par traitement (i.e. substrat), dans des blocs différents, étaient équipés d'un tensiomètre vertical muni d'un capteur de pression et d'un thermocouple mesurant la température. Les données furent enregistrées à une fréquence de 15 minutes par deux acqui-secteurs de données (modèles CR7 et CR10, Campbell Scientific®, Edmonton, Alberta). En utilisant les données de potentiel matriciel mesuré en pépinière durant l'été 2009, il a été possible d'estimer θ_a et l'indice de $D_s D_0^{-1}$ durant la période de croissance des plants. En effet, θ_a a été déterminée en soustrayant la valeur de porosité totale par la teneur en eau estimée à partir du potentiel matriciel et de la relation décrivant la courbe de désorption en eau du substrat (eq. 7, chapitre 2). De plus, $D_s D_0^{-1}$ a été évaluée en multipliant θ_a par γ (eq. 10).

3.3.3 Caractérisation des propriétés physiques et chimiques

Une caractérisation des propriétés physiques et chimiques des substrats étudiés a été réalisée au début et à la fin de la saison de croissance, en automne, pour les essais effectués en 2008 et 2009. Cette caractérisation a été effectuée selon la méthodologie présentée dans la section 2.3.3 et 2.3.4 du chapitre 2.

3.3.4 Croissance des plants et contenu en éléments minéraux

Les plants d'épinette blanche produits en 2008 ont été récoltés le 6 octobre durant la 22^e semaine de culture. Pour l'essai effectué en 2009, la récolte a eu lieu le 15 septembre durant la 17^e semaine. Quatre récipients par substrat ont été récoltés afin de déterminer la croissance individuelle des plants (1+0). La hauteur des plants et le diamètre au collet racinaire ont été mesurés sur neuf plants par récipient. Ces neuf plants ont, par la suite, été retirés de leur cavité et leurs parties aérienne et souterraine ont été séparées au collet. La portion racinaire des plants a

été nettoyée à la main soigneusement avec un rinçage à l'eau distillée. Les masses sèches des racines et des parties aériennes ont été déterminées après mise à l'étuve des plants à 70°C pendant 48 heures. Les concentrations en éléments nutritifs ont été évaluées sur un échantillon composite de trois plants par récipient en utilisant la méthodologie présentée à la section 2.3.6. La composition nutritionnelle du plant a été exprimée en contenu exprimé en mg plant^{-1} et est égale à la concentration de l'élément multiplié par la masse sèche de la partie du plant. La teneur en éléments minéraux reflète bien la captation des nutriments par le plant et leur accumulation (Timmer, 1991).

3.3.5 Analyses statistiques

Les analyses statistiques ont été effectuées à l'aide du logiciel SAS®. Les moyennes des variables de croissance et de propriétés physiques et chimiques mesurées ont été comparées par un test de comparaisons multiples LSD protégé par une ANOVA. Une transformation des données a été effectuée sur certaines variables afin de s'assurer du respect des conditions de l'ANOVA (Annexe 1). Afin de déterminer l'effet des propriétés physiques et chimiques mesurées au début et à la fin de la culture, une analyse de régression multiple avec sélection de variables indépendantes de type pas à pas (Stepwise) a été effectuée en utilisant les propriétés qui présentaient une corrélation satisfaisante avec les variables de croissance. Les coefficients de régression standardisée ont été calculés afin de pouvoir comparer les modèles entre eux. Pour tous les modèles de régression effectués en 2009, la tortuosité a subi une transformation en logarithme naturel. Ainsi, pour l'essai 2008, deux valeurs de $D_s D_0^{-1}$, prises au début de la culture, ont été retirées : Bloc1-TFG-VF; 0.049 et Bloc4-TBG; 0.053. Pour l'essai 2009, en début de culture, le Bloc2-S6 a été retiré à cause d'une donnée manquante. À la fin de la culture, la valeur de γ (0.62) du Bloc4-S6 a été retirée.

3.4 Résultats

3.4.1 Essai 2008

Croissance

Pour l'année 2008, toutes les variables de croissance présentaient des différences significatives ($p < 0.05$) entre les substrats (tableau 3.2). La hauteur la plus élevée des plants a été atteinte avec

le substrat PPV alors que les plants les plus petits provenaient de TBG et TFG. Le diamètre des plants était plus élevé pour TFG-10F, TFG-50F, TFG-VG, TFG-VF et PPV. Les substrats TFG-50F et PPV ont le mieux réussi pour ce qui est de la masse sèche de la partie aérienne alors que la plus grande masse racinaire était observée pour TFG-10F, TFG-50F et PPV. Pour la nutrition minérale des racines, aucune différence significative n'a été observée entre les contenus en P et K (tableau 3.3). Les contenus en N et Ca étaient similaires pour TFG-10F à PPV. Le contenu en Mg des racines était supérieur pour TFG-50F, TFG-VG, TFG-VF et PPV. Pour la partie aérienne, TBG et TFG ont présenté généralement les plus faibles valeurs en éléments minéraux alors que TFG-50F et PPV présentaient les plus grands contenus en N, P, Ca et Mg. La teneur la plus élevée en K dans la partie aérienne fut observée chez PPV, soit le double de ce qui a été observé chez les autres substrats.

Propriétés physiques des substrats

Les substrats ont présenté des différences significatives au niveau des propriétés physiques (tableau 3.4). À l'état frais, TBG et TFG présentaient les plus faibles MVA ($0.064-0.069 \text{ g cm}^{-3}$) alors que PPV possédait la plus forte valeur (0.105 g cm^{-3}). Après la saison de croissance toutefois, la MVA de PPV a légèrement diminué (0.089 g cm^{-3}) alors qu'elle s'est accrue pour les autres substrats puisqu'ils ont terminé avec une densité moyenne supérieure à 0.082 g cm^{-3} . En ce qui a trait à la granulométrie, les substrats ont présenté des différences significatives au niveau des trois variables granulométriques (MWD, 0_5 mm et 1_4 mm). TFG-50F et TFG-VF possédaient un faible MWD (2.2 et 2.0 mm). Le substrat le plus grossier était TBG (MWD = 3.1 mm). À la fin de la saison de croissance, MWD était généralement plus faible. TFG-50F possédait le plus de particules fines (0_0.5mm), deux fois plus que tous les autres substrats. Ces particules étaient plus abondantes à la fin de la saison de croissance atténuant les différences entre les substrats pour cette variable. Les particules de 1 à 4 mm étaient plus abondantes chez les substrats avec vermiculite (68 et 65 %, respectivement, pour TFG-VG et TFG-VF) alors que PPV en possédait le moins à l'état frais bien que cette proportion ait augmenté après 22 semaines de croissance. Il n'y avait pas de différence significative pour EU et EFU entre les substrats. Les valeurs d'EU étaient situées entre 0.38 et $0.43 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ et EFU entre 0.26 et $0.34 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$. La PT était similaire entre les différents substrats, passant de 0.927 et $0.951 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$. Les teneurs en air à capacité en pot (θ_a) de TBG, TFG, TFG-10F, TFG-VG, TFG-VF étaient autour de $0.22 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ tandis que TFG-50F et

PPV possédaient une θ_a significativement plus faible ($0.11 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$). Pour tous les substrats, θ_a a augmenté légèrement durant la saison de croissance. Le coefficient d'efficacité des pores (γ) a varié significativement entre les substrats, passant de 0.09 pour TFG à 0.14 pour TBG. La conductivité hydraulique saturée était plus faible pour les substrats PPV et TFG-50F et elle s'est généralement accrue après la saison de croissance. γ a généralement augmenté en cours de saison pour l'ensemble des substrats et il a plus que doublé pour TFG-10F, TFG-50F, TFG-VF et PPV. La plus faible diffusivité des gaz ($D_s D_0^{-1}$) a été observée chez PPV (0.0119) alors que la valeur la plus élevée fut observée pour TBG (0.0350). L'indice de $D_s D_0^{-1}$ a beaucoup augmenté durant la saison de croissance puisque ses valeurs ont plus que doublé. Seule $D_s D_0^{-1}$ de TBG n'a pas changé. Après une saison de croissance, aucune différence significative n'a été observée entre les substrats pour le coefficient d'efficacité des pores et $D_s D_0^{-1}$ bien que les différences entre les moyennes pour les substrats passaient parfois du simple au double.

Propriétés chimiques des substrats

Le pH des substrats en début de culture était situé autour de 4 et 4.5 (tableau 3.5). Il s'est accru après la saison de croissance pour atteindre une valeur entre 4.4 et 5.1. Le pH était plus élevé pour les deux substrats contenant de la vermiculite : TFG-VG et TFG-VF. La CE était similaire pour les substrats à l'état frais et de légères variations étaient perceptibles entre substrats à la fin de la saison de croissance. La CE a cependant diminué considérablement durant la culture, passant d'une moyenne globale de 185 à 78 mS m^{-1} . La CEC_{eff} était plutôt variable. À l'état frais, les substrats TFG-VG et PPV possédaient la plus forte CEC_{eff} (31.2 et 32.2 $\text{m\acute{e}q L}^{-1}$) alors que le substrat TBG possédait la plus faible avec 15.0 $\text{m\acute{e}q L}^{-1}$. La CEC_{eff} était généralement plus élevée à la fin de la saison de culture pour l'ensemble des substrats à l'exception du substrat PPV qui n'a pas changé. La teneur en éléments minéraux dans les substrats est présentée au tableau 3.6. En début de culture, les teneurs moyennes en N-NH_4 variaient entre 10 et 28 mg L^{-1} , les substrats avec vermiculite présentant les plus faibles concentrations en N-NH_4 . La teneur en $\text{N-NO}_{2,3}$ était significativement plus faible pour PPV (2 mg L^{-1}) alors que les autres substrats possédaient une teneur en $\text{N-NO}_{2,3}$ située entre 7 et 11 mg L^{-1} . Les teneurs en P à l'état frais pour TBG, TFG, TFG-10F et TFG-50F étaient très faibles (2-5 mg L^{-1}) comparativement à celles des trois autres substrats (39 – 90 mg L^{-1}). Ces différences entre substrats se sont atténuées durant la période de culture bien que TFG-VG, TFG-VF et PPV possédaient encore la plus forte teneur en P. Le même phénomène fut

observé pour K. Les valeurs de Ca à l'état frais étaient situées entre 10 et 20 mg L⁻¹ alors que les teneurs en Mg étaient entre 13 et 39 mg L⁻¹. Les concentrations de Ca et Mg ont diminué durant la période de croissance.

Potentiels matriciels (ψ) observés durant la période de croissance

Les ψ étaient très différents entre les substrats au cours de la saison de production 2008 (figure 3.1, tableau 3.7). Tous les substrats à l'exception de PPV ont connu des périodes où le potentiel matriciel a été inférieur à -10 kPa. La tension matricielle moyenne en 2008 (c.-à-d. jours 220 à 283) fut la plus élevée pour le substrat PPV (-1.75 kPa) alors que les substrats TFG, TFG-10F et TFG-50F ont présenté les ψ les plus faibles (-4.27, -3.84 et -5.15 kPa, respectivement; tableau 3.7). Les substrats avec vermiculite (TFG-VG et TFG-VF) possédaient, quant à eux, des valeurs intermédiaires (-2.91 et -2.59 kPa). Selon la figure 3.1, PPV a connu très peu d'épisodes de potentiel matriciel sous le point de flétrissement temporaire (-5 kPa) comparativement aux autres substrats.

3.4.2 Essai 2009

Croissance

Les plants de cet essai étaient plus petits et plus légers que ceux de 2008 puisque la saison de croissance fut plus courte (17 semaines au lieu de 22; tableau 3.2). Les substrats confectionnés en 2009 présentaient des différences significatives entre les variables de croissance bien que celles-ci aient été moins importantes que celles observées en 2008. Les plants du substrat PPV* ont présenté la plus forte croissance en hauteur, en diamètre et en masse sèche des racines et de la partie aérienne. La plus faible croissance a été observée chez BM* qui était la tourbe de base pour BM_VP*, BM-20F* et BM-40F*. Pour ce qui est des éléments nutritifs, les plants du substrat PPV* avaient le contenu le plus élevé en N, P, K, Ca et Mg et ce pour les racines et les parties aériennes (tableau 3.3). La plus faible teneur en N racinaire a été observée chez les plants du BM_VP*. BM* a, quant à lui, présenté le plus faible contenu de la section aérienne pour N, P, Ca et Mg.

Propriétés physiques des substrats

À l'état frais, la masse volumique apparente (MVA) des substrats confectionnés en 2009 était supérieure à 0.091 g cm^{-3} (tableau 3.4). Les substrats BG* et BM* étaient les moins denses alors que BM-40F* avec 40 % de particules fines possédait la plus forte MVA (0.114 g cm^{-3}). La MVA a légèrement augmenté au cours de la saison de croissance sauf pour BM-40F* où elle est restée stable. Parmi les substrats étudiés en 2009, PPV* possédait le plus petit diamètre moyen pondéré des particules (MWD = 1.0 mm) alors que la valeur la plus élevée de MWD (2.1 mm) était retrouvée chez les substrats BM-VP* et BM*. Aucune différence significative n'a été observée entre le MWD des différents substrats à la fin de la saison de croissance. La plus forte proportion de particules fines (0_0.5mm) a été retrouvée chez BM-40F* et PPV*, deux substrats où la moins grande proportion de particules de 1 à 4 mm fut observée. C'est le substrat BM-VP* qui possédait la plus forte concentration en particules de 1 à 4 mm. Peu de différences ont été observées au niveau de la porosité totale bien que BM-40F* ait présenté une porosité légèrement plus faible que les autres substrats. La porosité totale des substrats à l'automne 2009 fut similaire à celle mesurée en début de culture et ne différait pas significativement entre ceux-ci. En termes de propriétés physiques liées à l'aération, la teneur en air (θ_a) était faible pour tous les substrats (entre 0.02 et 0.05) sauf pour BG* où θ_a était nettement plus élevée ($0.16 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$). La conductivité hydraulique saturée (Ks) des substrats, au début et à la fin de la saison de croissance, était située entre 0.02 et 0.07. Les substrats PPV* et BG* possédaient la plus forte Ks. Le coefficient d'efficacité des pores (γ) ainsi que la diffusivité relative des gaz ($D_3D_0^{-1}$) étaient maximaux pour PPV* ($\gamma = 0.167$, $D_3D_0^{-1} = 0.0089$). Aucune différence significative n'était observable parmi les autres substrats dont les valeurs de γ étaient comprises entre 0.01 et 0.038 et les valeurs de $D_3D_0^{-1}$ variaient entre 0.0006 et 0.002. Le coefficient d'efficacité des pores de BM-VP*, BG* et PPV* s'est accru durant la saison alors que BM*, BM-20F* et BM-40F* ont vu leur γ diminuer. Seule la $D_3D_0^{-1}$ de BG* et PPV* ont augmenté après une année de production.

Propriétés chimiques des substrats

Le pH moyen des substrats à l'état frais se situait entre 3.6 et 4.0, et ce dernier a généralement augmenté durant la période de culture (tableau 3.5). Aucune différence significative n'a été observée pour la CE de ces substrats, dont la valeur globale moyenne était de 265 mS m^{-1} . Les valeurs de CE étaient légèrement plus faibles après une saison de production. La CEC_{eff} était plus élevée pour BM_VP* et BM-40F* (33.6 et 36.4 méq L^{-1}) alors que BG* et BM* possédaient les plus

faibles valeurs (19.2 et 21.1 méq L⁻¹). La CEC_{eff} était généralement plus élevée à la fin de la saison de croissance pour tous les substrats mis à part BM-40F*. Le substrat BG* possédait la plus forte teneur en N-NH₄ avant et après la période de culture (tableau 3.6). N-NO_{2,3} était très faible au départ (2-3 mg L⁻¹) alors qu'après la culture la teneur s'est accrue considérablement et BG*, BM-20F* et BM-40F* possédaient alors la plus forte teneur en N-NO_{2,3}. La teneur de départ en P était élevée pour PPV* (63 mg L⁻¹) comparativement à celles de BM*, BM-20F* et BM-40F* qui en contenaient le moins (7-8 mg L⁻¹). La teneur en P a clairement augmenté après la culture (159-241 mg L⁻¹) sans qu'aucune différence significative n'ait été détectée. PPV* possédait aussi la plus forte teneur en K à l'état frais et après la saison de croissance (86 et 140 mg L⁻¹). Les substrats BM-20F* et BM-40F* avaient la plus forte teneur en Ca. À l'état frais, Mg variait entre 34 et 74 mg L⁻¹ alors que sa concentration a diminué durant la saison de croissance (31-60 mg L⁻¹).

Conditions hydriques et aération durant la période de croissance

Le potentiel matriciel moyen enregistré au cours de la période de culture est présenté au tableau 3.7. Peu de différences sont observées entre les substrats, PPV* avait toutefois le potentiel matriciel (ψ) le plus élevé (-0.75 kPa) alors que BM_VP* possédait le potentiel moyen le plus faible (-1.40 kPa). Un examen des valeurs de teneur en air (θ_a) estimées durant la période de croissance a permis de constater que les périodes de faible θ_a ($< 0.1 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) étaient plus fréquentes chez le substrat PPV* (figure 3.3). La teneur en air chez les substrats BG* et BM_VP* était généralement plus élevée tandis que pour les substrats BM*, BM-20F* et BM-40F*, plus le substrat contenait de particules fines, plus la θ_a estimée était faible. La fréquence cumulative des $D_s D_0^{-1}$ au cours de la saison de croissance 2009 démontre que le mélange PPV* a connu des épisodes de $D_s D_0^{-1}$ plus élevée que les autres substrats (figure 3.4). Par ailleurs, la $D_s D_0^{-1}$ de ces derniers n'a, en aucun moment, été supérieure à 0.02. Les substrats BM*, BM-20F* et BM-40F* ont connu des périodes de faibles diffusivités alors que les valeurs de $D_s D_0^{-1}$ chez les substrats BG* et BM_VP* étaient légèrement plus élevées.

3.4.3 Analyses de régression multiple

Pour l'année 2008, au début de la période de croissance, la teneur en air θ_a présentait un effet négatif deux fois plus important (E. Std = -0.64) que l'effet positif de la CE (E. Std = 0.35) sur la

masse sèche racinaire (tableau 3.8). θ_a a aussi eu un effet négatif sur la masse sèche aérienne (E. Std = -0.49) avec Ks (E. Std = -0.36). Une augmentation de la MVA était reliée à l'accroissement de la hauteur des plants. Toutes les variables de croissance modélisées en utilisant les valeurs observées à la fin de la saison (22 semaines) étaient principalement expliquées par un effet linéaire négatif de θ_a . De plus, Ks avait un effet secondaire négatif sur M_aer alors que la CE avait un effet négatif sur la hauteur des plants. L'effet isolé de θ_a sur la masse des racines est présenté dans la figure 3.5.

Pour l'essai effectué en 2009, c'est le coefficient d'efficacité des pores des substrats (γ) qui expliquait le mieux les variables de croissance M_rac, M_aer et H (tableau 3.8). Cela valait autant pour les données mesurées au début qu'à la fin de la saison de croissance. Pour les modèles avec variables mesurées au début de la saison de croissance, le coefficient d'efficacité des pores avait moins d'effet positif sur la croissance racinaire (E. Std = 0.54) que sur la masse sèche aérienne (E. Std = 0.75) alors que la MWD avait un effet significatif négatif sur la masse sèche racinaire. Pour les mesures prises à la fin de la saison de croissance, les masses sèches racinaire et aérienne possédaient, en plus de γ , un effet positif de la teneur en particules fines plus petites que 0.5 mm. L'efficacité des pores expliquait le mieux la croissance en hauteur des plants (E. Std = 0.54). L'effet isolé de γ sur la masse racinaire est présenté à la figure 3.6.

3.5 Discussion

Cette expérience a permis de déterminer quelles étaient les principales propriétés physiques et chimiques capables d'agir sur la croissance et le développement des plants d'épinette blanche après une saison de croissance. Les résultats ont démontré que ce sont les propriétés physiques des substrats qui expliquent le mieux la croissance. Cette constatation est en accord avec le résultat d'une étude similaire portant sur *Prunus cistena* tenant compte des propriétés d'aération du substrat telles que la porosité d'air et les variables d'échange gazeux (Allaire *et al.*, 1996).

En 2008, une augmentation de la teneur en air (θ_a) était généralement reliée à une réduction de la hauteur et de la masse sèche racinaire et aérienne des plants. Cette relation est indicatrice d'une limitation associée aux conditions hydriques durant la saison de croissance et d'une absence de

limitation au niveau de l'aération des substrats. En 2009, la modélisation à l'aide des variables physiques et chimiques a plutôt fait ressortir un effet significatif de γ indiquant que les propriétés d'aération des substrats limitaient la croissance des plants. L'efficacité des pores a déjà démontré une bonne capacité de prédiction de la qualité des substrats lors d'études similaires avec *Prunus cistena* et *Spiraea japonica* (Allaire *et al.*, 1996; Nkongolo et Caron, 2006a).

Ces différences entre les deux essais sont causées par deux principaux facteurs. Premièrement, les propriétés physiques des substrats étaient différentes entre les deux années. En effet, la plupart des substrats étudiés en 2008 étaient moins compactés et étaient constitués de tourbes plus grossières tandis qu'en 2009, les substrats étaient généralement plus denses et possédaient davantage de particules fines (tableau 3.4). Les substrats artificiels sont sensibles aux manipulations et, en 2009, une compaction plus élevée lors de l'empotage pourrait avoir réduit θ_a et $D_s D_0^{-1}$ (Heiskanen *et al.*, 1996). Ainsi en 2008, la θ_a de plusieurs substrats était supérieure à $0.20 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ (tableau 3.4), ce qui est largement au-dessus du seuil de $0.15 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ pouvant limiter la croissance des plants (Bunt, 1988; Heiskanen, 1993a). Seuls les substrats TFG-50F et PPV possédaient une θ_a inférieure à cette limite tout en présentant une bonne croissance. En 2009, tous les substrats étaient sous le niveau de θ_a pouvant limiter la croissance des plants. Des observations similaires peuvent être faites pour la $D_s D_0^{-1}$ dont le seuil pouvant limiter la croissance pourrait être situé autour de 0.015 (Allaire *et al.*, 1996). Les valeurs de $D_s D_0^{-1}$ observées en 2008 (0.0119 – 0.0727) étaient nettement supérieures à celles obtenues par Caron *et al.* (2010; $D_s D_0^{-1} = 0.0026 - 0.0105$) et par Caron et Nkongolo, (2004; $D_s D_0^{-1} = 0.0067 - 0.0230$) avec la même méthode. Seule la $D_s D_0^{-1}$ du substrat PPV à l'état frais aurait pu limiter la croissance si les conditions d'irrigation avaient été plus humides (tableau 3.4). Toujours en 2008, les valeurs de γ (situées entre 0.063 – 0.276) étaient similaires à celles observées sur des substrats de mousse de tourbe de sphaigne et d'écorce (γ entre 0.06 et 0.15; Caron et Nkongolo, 2004) et par méthode directe (≈ 0.14 ; King et Smith, 1987). Ces valeurs étaient toutefois supérieures au gradient d'efficacité des pores ($\gamma \approx 0.022 - 0.060$) ayant permis l'observation d'une limitation de la croissance (Allaire *et al.*, 1996; Nkongolo et Caron, 2006a). En 2009 par contre, l'efficacité des pores était cohérente avec une limitation de la croissance des plants (0.010 – 0.167).

Les expériences réalisées en 2008 et 2009 ont permis de faire ressortir la zone de $D_s D_0^{-1}$ optimale (0.003 et 0.016) pour obtenir une croissance racinaire maximale (figure 3.7). À des niveaux plus

faibles que 0.003 , $D_3D_0^{-1}$ entraîne des problèmes d'aération alors que des valeurs supérieures à 0.016 entraînent un plus grand risque de stress hydrique limitant la croissance. Il appert que les huit pépinières répertoriées (voir chapitre 2) utilisent des substrats ayant une valeur de $D_3D_0^{-1}$ située dans l'optimum de croissance racinaire (figure 3.7). Cette zone est large ce qui signifie que la croissance des semis n'est pas très affectée par de faibles niveaux d'échange gazeux et par de faibles stress hydriques. L'épinette blanche semble plus tolérante que *P. cistena* à de faibles valeurs de $D_3D_0^{-1}$ puisque cette espèce présentait une limitation de la croissance sous un $D_3D_0^{-1}$ de 0.015 (Allaire *et al.*, 1996). Physiologiquement, les résineux requièrent peu d'aération (Johnson, 1968). De plus, l'utilisation de cavités de volumétrie relativement réduite (310 cm^3) comparativement à celles employées en horticulture (500 cm^3 et +) pourrait réduire l'impact d'un substrat dont les capacités d'échange gazeux sont faibles. En effet, dans les cavités à petit volume, le rapport surface d'échange gazeux/volume est plus grand. Les racines peuvent aussi se loger plus facilement à l'interface pot-substrat lorsque celui-ci est asphyxiant. Toutefois, la faible volumétrie de la cavité rend les plants plus vulnérables au stress hydrique puisque la réserve en eau est moindre (Landis *et al.*, 1989a).

Le deuxième facteur impliqué dans la réponse de croissance de l'épinette blanche aux différents substrats est la différence observée au niveau des potentiels matriciels tout au long de la saison de croissance (tableau 3.8). L'effet des substrats sur la croissance est influencé par la régie de culture, particulièrement par l'irrigation et cette régie devrait être adaptée aux propriétés hydrauliques et d'aération du substrat. Le potentiel matriciel des substrats est associé à une teneur en eau et en air selon la courbe de désorption (De Boodt, 1975). Dans les substrats horticoles, un potentiel inférieur à -10 kPa est associé à une réduction de rendement bien que cette limite varie selon l'espèce, la distribution des racines, la salinité et les conditions expérimentales (De Boodt et Verdonck, 1972). Toutefois, Heiskanen (1993a) suggère qu'une teneur en eau favorable à la croissance des semis forestiers est généralement plus faible ($\psi = -5$ à -50 kPa). Dans le cas présent, les substrats autres que PPV utilisés en 2008, présentaient un potentiel matriciel moyen plus faible, c.-à-d. plus négatif (tableau 3.7), et des épisodes de stress hydriques fréquents ($\psi < -10 \text{ kPa}$) expliquant en partie la réduction de la croissance des plants. En 2009, le potentiel matriciel était plus élevé signifiant l'absence de stress hydriques, mais surtout une réduction de θ_a durant la période de culture moins favorable aux échanges gazeux.

La vermiculite et la perlite sont des additifs couramment utilisés pour la fabrication des substrats d'empotage horticoles et forestiers (Landis *et al.*, 1989a). La vermiculite a entraîné une augmentation de la hauteur, du diamètre et du contenu en éléments nutritifs des plants lors de l'essai 2008 (tableaux 3.2 et 3.3). Ces différences pourraient être causées par l'augmentation du potentiel matriciel (c.à.d. moins négatif) observée en présence de vermiculite (tableau 3.7). En effet, des potentiels matriciels plus négatifs peuvent réduire la photosynthèse et la croissance des plants (Heiskanen, 1994a). La vermiculite possède une meilleure capacité d'humectation que la tourbe ce qui pourrait avoir augmenté le potentiel matriciel (Bunt, 1988). La présence de vermiculite n'a toutefois pas significativement augmenté la capacité de rétention en eau du substrat puisqu'aucune différence significative n'a été constatée pour EFU et EU contrairement à l'effet rapporté par Heiskanen (1993a). Pour l'essai 2009, l'addition de vermiculite et de perlite au substrat BM n'a pas entraîné de modification significative de la croissance des plants pour aucune des variables de croissance mesurées. L'ajout d'additifs dans ce cas-ci n'a pas modifié les propriétés physiques du substrat et aucun effet n'a été observé sur les propriétés d'aération de ce dernier (tableau 3.4). L'addition de perlite est pourtant reconnue pour accroître le drainage et l'aération des substrats (Heiskanen, 1993a; Heiskanen, 1994a). Or, une augmentation de la fréquence cumulative de $D_s D_0^{-1}$ plus élevée et une réduction du potentiel matriciel ont été observées au cours de la période de croissance (figure 3.4). Toutefois, la perlite n'a pas accru le coefficient d'efficacité des pores des substrats ce qui révèle un faible niveau d'échanges gazeux associés à la structure, pourtant très poreuse, de la perlite.

En 2008, l'ajout de tourbe fine a eu un effet positif sur la croissance des plants. Dans ces proportions et à des masses volumiques relativement faibles, la présence de particules fines a augmenté la masse volumique apparente des substrats, a réduit θ_a et $D_s D_0^{-1}$, mais a également amélioré le coefficient d'efficacité des pores de ceux-ci. L'accroissement de γ dans les substrats composés de particules fines pourrait être expliqué par la réduction de la teneur en particules grossières qui peuvent constituer, par leur structure, des barrières physiques aux échanges gazeux (Nkongolo et Caron, 1999 ; Caron *et al.*, 1999) . La CEC_{eff} était supérieure dans les substrats avec particules fines et une meilleure nutrition minérale des plants établis sur ces substrats a pu induire une croissance plus élevée (tableau 3.3). En 2009, l'addition de particules fines au substrat BM a entraîné une forte réduction de θ_a et de $D_s D_0^{-1}$. Toutefois, il est apparu là aussi que la présence de particules fines avait un effet positif sur la croissance des plants comme le suggère l'analyse de

régressions multiples (tableau 3.7). Une expérience déterministe a démontré une meilleure croissance de l'épinette blanche en récipient dans les substrats contenant plus de particules fines (Bernier et Gonzalez, 1995). Des particules de taille importante et une masse volumique faible peuvent réduire la conductivité hydraulique alors que l'ajout de particules fines et une densité plus élevée peuvent accroître la conductivité hydraulique non saturée (Heiskanen, 1999). La conductivité hydraulique est faible dans les substrats tourbeux non saturés (da Silva *et al.*, 1993; Heiskanen, 1999) et il a été démontré que les plants peuvent subir un stress hydrique important lors de forte demande d'évapotranspiration (Landis *et al.*, 1989b).

Les propriétés chimiques étaient significativement différentes selon le substrat (tableau 3.5). Le pH, légèrement acide, a atteint des valeurs entre 3.8 et 5 à la fin de la saison. Ce gradient, situé à un niveau idéal pour la culture de résineux, était semblable au pH observé dans d'autres études pour ce type de substrat (Folk *et al.*, 1992; Carlson, 1981) permettant la disponibilité des macro et micronutriments pour des substrats organiques (Landis *et al.*, 1989a). Les valeurs de CEC_{eff} variaient d'un substrat à l'autre. La CEC_{eff} est associée à la capacité de rétention et de stockage des nutriments et influe donc fortement sur la fertilité du substrat (Lemaire *et al.*, 2003). Toutefois, les variations observées n'ont pas eu d'effet significatif sur la masse des plants. Par ailleurs, les teneurs en éléments nutritifs pour les substrats à l'état frais étaient faibles puisque la fertilité de ce type de substrat est initialement pauvre (Landis *et al.*, 1989a) et est ajustée par la fertilisation. Cet ajustement peut expliquer pourquoi la fertilité initiale du substrat avait peu d'effet sur la croissance, et ce, malgré des différences parfois très grandes entre les substrats pour les éléments P et K en 2008. Les concentrations finales en éléments nutritifs des substrats différaient sensiblement pour l'essai effectué en 2008 et ces variations pourraient être causées par la faible valeur de CEC mesurée pour ces substrats. Toutefois, ces concentrations n'ont pas entraîné une variation significative de la croissance des plants selon l'analyse de régression (tableau 3.7). La CE observée était adéquate pour tous les substrats et n'a pu limiter la croissance des plants (Bunt, 1988). Toutefois, la CE peut être un indicateur de la concentration en éléments minéraux dissous et donc de la fertilité de départ des substrats, il est logique que cette variable ait influencé positivement la croissance en 2008, selon l'analyse de régression.

3.6 Conclusion

Cette expérience a permis de faire varier les propriétés de la tourbe en utilisant différents ingrédients telles la vermiculite, la perlite, et des tourbes fines et grossières. L'ajout de particules fines aux substrats a réduit la teneur en air et la diffusivité des gaz. Les substrats qui ont reçu ces particules ont présenté une meilleure croissance racinaire et aérienne durant les deux essais, particulièrement en 2008 où les conditions hydriques étaient plus sèches. L'ajout de vermiculite a entraîné une meilleure croissance en 2008 et aucune amélioration du développement racinaire et aérien n'a été observée en 2009 pour le substrat avec vermiculite et perlite. Les propriétés physiques ont le mieux expliqué la croissance des plants. Il est apparu qu'en 2008, l'augmentation de la teneur en air, la propriété physique expliquant le mieux la croissance des plants, avait un effet négatif sur la hauteur et les masses aérienne et racinaire de l'épinette blanche. Sous conditions plus humides (2009), c'est plutôt l'augmentation du coefficient d'efficacité des pores (γ) qui expliquait le mieux l'augmentation du développement des plants. Les différences observées entre les deux années sont causées, non seulement par des conditions hydriques différentes, mais aussi par les propriétés physiques des substrats faits de tourbe non tamisée en 2009. Une zone optimale de diffusivité relative des gaz (0.003 - 0.016) permettant une croissance maximale des racines a été établie avec les données des deux expériences.

Les conclusions tirées de cette expérience se limitent aux plants 1+0. Une bonne croissance et la vigueur du plant après la première année de croissance influent fortement sur la qualité de son développement lors de la deuxième année de croissance. Néanmoins, il serait nécessaire d'effectuer une caractérisation de l'insuffisance racinaire conforme à celles effectuées lors des inventaires de qualification des plants forestiers (DGPSP, 2009), pendant la deuxième année de culture, afin de mesurer l'effet des substrats sur le critère d'insuffisance racinaire pour l'épinette blanche (critère O1). De plus, il serait très intéressant de vérifier l'effet des substrats sur la survie et la croissance de l'épinette blanche au site de reboisement, l'objectif ultime étant d'augmenter la survie des plants et d'accroître leur reprise une fois le reboisement effectué.

3.7 Tableaux et figures

Tableau 3.1 Composition des substrats (% v v⁻¹) pour les essais effectués en 2008 et 2009.

Essais 2008					
Substrats	Particules de tourbe fines <0.5 mm	Particules de tourbe brune grossières >0.5mm	Particules de tourbe blonde grossières > 0.5 mm	Vermiculite fine Grade 4 (0.1-1.2 mm)	Vermiculite grossière Grade 2 (0.6 - 4.7 mm)
TBG		0.14	0.86		
TFG		0.50	0.50		
TFG-10F	0.10	0.45	0.45		
TFG-50F	0.50	0.25	0.25		
TFG-VF		0.35	0.35	0.30	
TFG-VG		0.35	0.35		0.30
PPV	75 % tourbe à fibres longues et 25 % vermiculite grade 3 (Pampev)				

Essais 2009						
Substrats	Particules de tourbe fines (<0.5 mm)	Tourbe blonde grossière	Tourbe blonde moyenne	Tourbe blonde moyenne	Perlite horticole	Vermiculite (Grade 4) (0.1-1.2 mm)
BM-VP*			0.75		0.10	0.15
BG*		1.0				
BM*			1.0			
BM-20F*	0.2		0.8			
BM-40F*	0.4		0.6			
PPV*				0.75		0.25

Tableau 3.2 Hauteur (H), diamètre au collet racinaire (D), et masses sèche de la partie aérienne (M_AER) et racinaire (M_RAC) des plants après une saison de croissance (1+0) pour les essais effectués en 2008 et 2009.

	Substrats	H		D	M_AER		M_RAC		
		mm			mg				
2008	TBG	95	cd [#]	2.04	bc	493	cd	233	b
	TFG	89	d	1.91	c	447	d	225	b
	TFG-10F	107	b	2.33	a	633	bc	314	a
	TFG-50F	105	bc	2.42	a	717	ab	350	a
	TFG-VF	107	b	2.28	ab	530	cd	283	ab
	TFG-VG	115	b	2.26	ab	595	bcd	298	ab
	PPV	128	a	2.51	a	857	a	355	a
	E-T**	4		0.1		54		45	
2009	BM-VP*	84	bc	1.28	c	304	cd	93	b
	BG*	82	bc	1.47	ab	351	bcd	100	b
	BM*	80	c	1.28	c	290	d	84	b
	BM-20F*	83	bc	1.34	bc	343	bcd	92	b
	BM-40F*	87	bc	1.36	bc	365	b	98	b
	PPV*	99	a	1.60	a	467	a	126	a
	E-T	1		0.16		32		18	

[#] Les moyennes pour une année d'une variable portant la même lettre ne sont pas significativement différentes ($P > 0.05$). **E-T : Écart-type.

Tableau 3.3 Contenu en éléments nutritifs (N P, K, Ca et Mg) en mg par plant pour les parties racinaire et aérienne.

Substrats	Racines						Partie aérienne											
	N	P	K	Ca	Mg		N	P	K	Ca	Mg							
TBG	4.9	bc [#]	0.5	a	0.48	c	0.2	d	12.2	cd	1.5	de	5.0	cd	0.9	c	0.7	c
TFG	4.5	c	0.5	a	0.56	bc	0.2	cd	10.6	d	1.4	e	4.6	d	0.9	c	0.7	c
TFG-10F	6.2	a	0.7	a	0.89	a	0.4	bcd	14.8	abc	2.0	bc	7.2	bc	1.5	ab	1.0	b
TFG-50F	5.8	ab	0.6	a	0.88	a	0.5	ab	16.7	abc	2.3	ab	7.0	bc	1.8	a	1.2	ab
TFG-VF	5.5	abc	0.6	a	0.73	ab	0.5	ab	12.5	cd	1.7	cde	6.4	bcd	1.3	bc	0.9	bc
TFG-VG	5.4	abc	0.6	a	0.82	abc	0.5	abc	13.8	bcd	2.0	bcd	7.7	b	1.6	ab	1.1	b
PPV	6.7	a	0.7	a	0.74	abc	0.7	a	17.9	a	2.6	a	14.7	a	1.8	a	1.4	a
E-T**	0.5	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	1.2	0.2	0.2	0.2	0.8	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1
BM-VP*	2.1	d	0.5	b	1.3	b	0.08	b	6.8	bc	1.0	cd	4.5	b	0.4	cd	0.4	bc
BG*	2.7	ab	0.6	b	1.3	b	0.09	b	8.3	ab	1.2	bc	4.6	b	0.5	c.d	0.5	bc
BM*	2.1	cd	0.5	b	1.0	b	0.07	b	6.6	c	1.0	d	3.9	b	0.4	d	0.4	c
BM-20F*	2.4	bcd	0.5	b	1.1	b	0.09	b	7.7	abc	1.2	bc	4.5	b	0.5	bc	0.5	b
BM-40F*	2.7	abc	0.6	b	1.2	b	0.11	a	8.7	a	1.3	bc	4.7	b	0.6	ab	0.5	b
PPV*	3.0	a	0.8	a	2.0	a	0.12	a	8.9	a	1.6	a	7.6	a	0.6	a	0.7	a
E-T	0.2	0.1	0.1	0.01	0.002	0.002	0.01	0.6	0.1	0.1	0.1	0.4	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03

[#] Les moyennes pour une année d'une variable portant la même lettre ne sont pas significativement différentes (P>0.05). **E-T : Écart-type.

Tableau 3.4 Propriétés physiques des substrats au début et à la fin de la saison de croissance (1/2) (MVA = masse volumique apparente, MWD = diamètre moyen pondéré des particules, 0_0.5mm = % de particules inférieures à 0.5 mm, 1_4mm = % dont la dimension est située entre 1 et 4 mm. EFU = eau facilement utilisable, EU = eau utilisable).

Substrat	MVA		MWD (mm)	0_0.5mm		1_4mm		EU				
	g cm ⁻³	g cm ⁻³		g g ⁻¹	g g ⁻¹	g g ⁻¹	g g ⁻¹	cm ³ cm ⁻³	cm ³ cm ⁻³			
Semaine	0	22	0	22	0	22	0	22	0	22	0	22
TBG	0.064	d [#] 0.083	b 3.1	a 2.2	a 0.06	b 0.14	cd 0.53	bc 0.48	cd 0.30	0.33	0.39	0.42
TFG	0.069	cd 0.086	b 2.7	b 1.9	bc 0.07	b 0.15	bcd 0.56	b 0.49	cd 0.34	0.28	0.41	0.37
TFG-10F	0.072	c 0.088	b 2.7	b 1.8	bcd 0.09	b 0.17	bcd 0.53	bc 0.47	de 0.32	0.34	0.38	0.41
TFG-50F	0.083	b 0.082	b 2.2	c 1.8	cd 0.20	a 0.28	a 0.48	c 0.43	e 0.30	0.32	0.43	0.45
TFG-VF	0.081	b 0.089	b 2.3	c 1.9	bc 0.06	b 0.12	d 0.68	a 0.63	a 0.32	0.31	0.38	0.37
TFG-VG	0.086	b 0.097	a 2.0	c 1.7	d 0.07	b 0.11	d 0.65	a 0.55	b 0.33	0.33	0.42	0.40
PPV	0.105	a 0.089	b 2.8	ab 2.0	ab 0.10	b 0.19	b 0.39	d 0.52	bc 0.26	0.28	0.39	0.37
E-T**	0.002	0.003	0.2	0.2	0.02	0.02	0.02	0.01	0.07	0.02	0.02	0.02
Semaine	0	17	0	17	0	17	0	17	0	17	0	17
BM-VP*	0.106	b 0.113	a 2.1	a 2.4	a 0.20	c 0.14	c 0.46	a 0.54	a 0.38	0.32	0.48	0.43
BG*	0.091	d 0.096	b 1.4	c 2.2	a 0.42	b 0.32	a 0.28	d 0.35	c 0.41	0.35	0.49	0.47
BM*	0.094	cd 0.097	b 2.1	a 2.7	a 0.25	c 0.15	c 0.37	b 0.47	ab 0.38	0.32	0.48	0.44
BM-20F*	0.107	b 0.110	a 1.8	b 2.2	a 0.37	b 0.25	b 0.32	c 0.37	c 0.36	0.32	0.46	0.44
BM-40F*	0.114	a 0.113	a 1.4	c 2.0	a 0.50	a 0.35	a 0.25	de 0.35	c 0.35	0.33	0.47	0.44
PPV*	0.099	c 0.106	a 1.0	d 1.9	a 0.48	a 0.28	b 0.22	e 0.40	bc 0.32	0.32	0.38	0.44
E-T	0.002	0.003	0.1	0.2	0.02	0.02	0.04	0.03	0.02	0.02	0.03	0.02

[#] Les moyennes pour une année d'une variable portant la même lettre ne sont pas significativement différentes (P>0.05). **E-T : Écart-type.

Tableau 3.4 (suite) Propriétés physiques des substrats au début et à la fin de la saison de croissance (2/2). Essais 2008 et 2009. (PT = porosité totale, θ_a = teneur en air, Ks = conductivité hydraulique saturée, γ = efficacité des pores, $D_s D_0^{-1}$ = diffusivité relative des gaz).

Substrat	PT		θ_a		Ks		γ		$D_s D_0^{-1}$											
	cm ³ cm ⁻³				cm s ⁻¹		m m ⁻¹		m ² s ⁻¹ m ⁻²											
<i>Semaines</i>	0	22	0	22	0	22	0	22	0	22										
TBG	0.946	a [#] 0.946	bc	0.24	a	0.24	bc	0.46	a	0.142	a	0.0350	a	0.0343	a					
TFG	0.940	bc	0.944	c	0.24	a	0.30	a	0.37	abc	0.60	a	0.091	bc	0.159	a	0.0209	bc	0.0487	a
TFG-10F	0.939	bc	0.943	c	0.22	a	0.23	c	0.26	c	0.45	a	0.063	c	0.210	a	0.0141	bc	0.0496	a
TFG-50F	0.927	d	0.947	abc	0.11	b	0.15	d	0.07	d	0.17	b	0.115	ab	0.276	a	0.0136	bc	0.0444	a
TFG-VF	0.941	b	0.951	a	0.24	a	0.30	a	0.31	bc	0.63	a	0.100	abc	0.244	a	0.0238	abc	0.0727	a
TFG-VG	0.940	bc	0.947	abc	0.20	a	0.27	ab	0.39	ab	0.57	a	0.133	ab	0.163	a	0.0266	ab	0.0444	a
PPV	0.938	c	0.950	ab	0.11	b	0.12	d	0.03	d	0.08	b	0.105	abc	0.254	a	0.0119	c	0.0298	a
E-T**	0.001	0.002	0.002	0.02	0.02	0.02	0.05	0.05	0.08	0.08	0.08	0.02	0.02	0.05	0.05	0.005	0.005	0.005	0.02	0.02
<i>Semaines</i>	0	17	0	17	0	17	0	17	0	17	0	17	0	17	0	17	0	17	0	17
BM-VP*	0.941	a	0.935	a	0.06	b	0.04	b	0.04	b,c	0.04	b	0.026	b	0.035	bc	0.0015	bc	0.0013	b
BG*	0.941	ab	0.938	a	0.16	a	0.12	a	0.05	a,b	0.06	a	0.010	b	0.043	b	0.0016	bc	0.0048	a
BM*	0.938	b	0.937	a	0.06	b	0.05	b	0.05	b	0.03	bc	0.034	b	0.028	bc	0.0020	bc	0.0013	b
BM-20F*	0.930	c	0.928	a	0.03	b	0.02	b	0.03	c,d	0.02	c	0.038	b	0.028	bc	0.0012	bc	0.0006	b
BM-40F*	0.925	d	0.931	a	0.02	b	0.03	b	0.02	d	0.02	c	0.033	b	0.019	c	0.0006	c	0.0006	b
PPV*	0.941	ab	0.936	a	0.06	b	0.04	b	0.07	a	0.07	a	0.167	a	0.263	a	0.0068	a	0.0089	a
E-T	0.001	0.004	0.004	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.002	0.002	0.04	0.04	0.0001	0.0001	0.003	0.003	0.003

* a-d : Les moyennes pour une année d'une variable portant la même lettre ne sont pas significativement différentes (P>0.05). **E-T : Écart-type.

Tableau 3.5 Propriétés chimiques des substrats au début et à la fin de la saison de croissance. Essais 2008 et 2009. (1/2)

Substrat	pH		CE mS m ⁻¹		CEC _{eff} még L ⁻¹	
	0	22	0	22	0	22
2008						
Semaines	0	22	0	22	0	22
TBG	4.0 c [#]	4.4 e	148 a	65 e	15.0 d	20.3 e
TFG	4.2 b	4.5 d	186 a	70 de	21.4 c	27.9 d
TFG-10F	4.3 b	4.6 d	187 a	69 de	23.4 c	30.0 cd
TFG-50F	4.3 b	4.6 d	223 a	81 bc	29.4 b	30.9 c
TFG-VF	4.5 a	5.0 b	203 a	96 a	29.2 b	36.8 b
TFG-VG	4.5 a	5.1 a	182 a	89 ab	31.2 ab	40.9 a
PPV	4.2 b	4.8	166 a	75 cd	32.2 a	32.2 c
E-T**	0.05	0.03	15	3.3	0.9	1.0
2009						
Semaines	0	17	0	17	0	17
BM-VP*	4.0 ab	4.4 a	244 a	166 c	33.6 a	44.3 a
BG*	3.6 e	3.8 d	287 a	274 a	19.2 c	21.9 d
BM*	3.7 d	3.9 d	239 a	219 b	21.1 c	23.0 d
BM-20F*	3.8 c	4.0 c	282 a	220 b	29.5 b	31.7 c
BM-40F*	4.0 a	4.0 c	289 a	235 ab	36.4 a	36.0 b
PPV*	3.9 bc	4.2 b	23 a	206 bc	28.7 b	37.0 b
E-T	0.02	0.03	17	15	0.9	0.8

Les moyennes pour une année d'une variable portant la même lettre ne sont pas significativement différentes (P>0.05). **E-T : Écart-type.

Tableau 3.6 Propriétés chimiques des substrats au début et à la fin de la saison de croissance. Essais 2008 et 2009. (2/2)

Substrat	N_NH4	N_NO2_3	P	K	Ca	Mg
Unité	mg L ⁻¹					
<i>Semaines</i>	0	22	0	22	0	22
TBG	26 a [#]	18 a	11 a	5 c	56 bc	16 c
TFG	20 c	14 b	10 a	8 bc	5 c	53 bc
TFG-10F	25 ab	9 c	11 a	9 bc	5 c	63 bc
TFG-50F	24 ab	5 d	8 a	7 bc	2 c	49 c
TFG-VF	13 c	9 c	7 a	15 a	47 b	78 a
TFG-VG	10 c	8 cd	9 a	15 a	39 b	78 a
PPV	28 a	10 c	2 b	11 ab	90 a	80 a
E-T	2	1	1	1	10	5
<i>Semaines</i>	0	17	0	17	0	17
BM-VP*	31 c	51 c	2 a	68 cd	27 b	159 a
BG*	96 a	141 a	2 a	124 a	15 c	206 a
BM*	62 b	77 bc	3 a	90 bc	7 d	178 a
BM-20F*	54 b	88 bc	3 a	103 ab	7 d	205 a
BM-40F*	60 b	88 bc	3 a	116 ab	8 d	241 a
PPV*	56 b	58 c	2 a	59 d	63 a	195 a
E-T	4	9	1	10	17	5

Les moyennes pour une année d'une variable portant la même lettre ne sont pas significativement différentes (P>0.05). **E-T : Écart-type.

Tableau 3.7 Potentiels matriciels moyens (ψ) mesurés durant la période de croissance.

2008 (jours 220 à 283)							
Substrats	TBG	TFG	TFG-10F	TFG-50F	TFG-VF	TFG-VG	PPV
ψ (kPa)	-3.53	-4.27	-3.84	-5.15	-2.91	-2.59	-1.75
CV (%) saisonnier	8.84	12.84	12.62	12.80	16.08	13.09	11.31
2009 (jours 166 à 255)							
Substrats	BM-VP*	BG*	BM*	BM-20F*	BM-40F*	PPV*	
ψ (kPa)	-1.40	-0.81	-1.02	-1.23	-1.22	-0.75	
CV (%) saisonnier	5.25	4.05	4.86	4.67	4.44	5.69	

Tableau 3.8 Résultats des modèles de régressions multiples réalisées avec la méthode pas à pas (Stepwise) pour les variables dépendantes (VD) suivantes : la masse sèche racinaire (M_RAC), la masse sèche aérienne (M_AER) et la hauteur (H) des plants. Les coefficients de régression standardisés (E. Std) sont présentés pour les propriétés physiques et chimiques utilisées comme variable indépendante (VI) : θ_a = teneur en air, MVA = masse volumique apparente, CE = conductivité électrique, Ks = conductivité hydraulique saturée, mo = % de matière organique, γ = coefficient d'efficacité des pores, MWD = diamètre moyen des particules et 0_0.5mm = teneur en particule de dimension inférieure à 0.5 mm.

Essais	Semaines	VD	=	E. Std	VI	E. Std	VI	E. Std	VI	R ²	n
2008	0	M_RAC		-0.64	θ_a	0.35	CE			0.54	26
		M_AER		-0.49	θ_a	-0.36	Ks			0.60	26
	22	H		0.77	MVA					0.60	26
		M_RAC		-0.55	θ_a					0.30	32
		M_AER		-0.39	θ_a	-0.32	Ks (n.s.)			0.42	32
		H		-0.49	θ_a	-0.35	CE	-0.76	mo	0.61	32
2009	0	M_RAC		0.54	γ	-0.43	MWD			0.69	22
		M_AER		0.75	γ					0.56	22
	17	H		0.75	γ					0.56	22
		M_RAC		0.62	γ	0.31	0_0.5mm (n.s.)			0.52	23
		M_AER		0.72	γ	0.35	0_0.5mm			0.69	23
		H		0.73	γ					0.53	23

Tous les coefficients de régression sont significatifs (P<0.05) sauf ceux portant l'indication non significatif (n.s.).

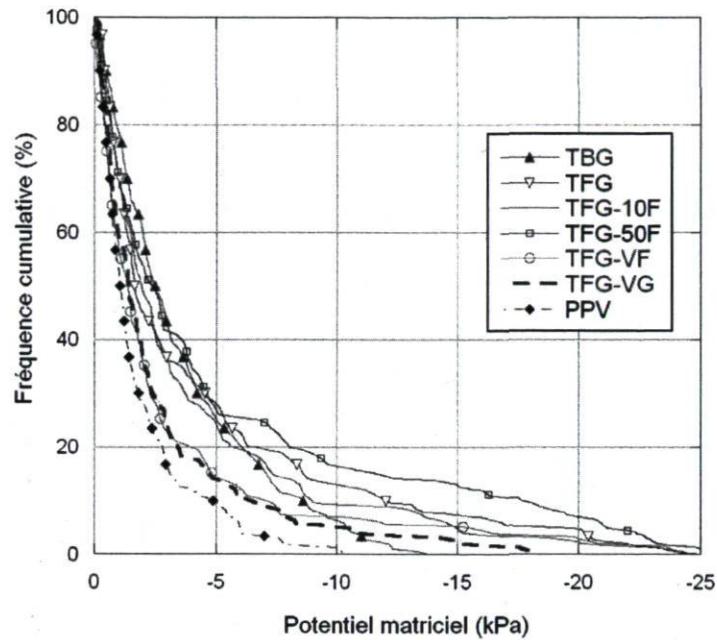


Figure 3.1 Distribution de la fréquence cumulative du potentiel matriciel des différents substrats au cours de la saison de croissance 2008 (mesures réalisées entre les jours 220 et 283).

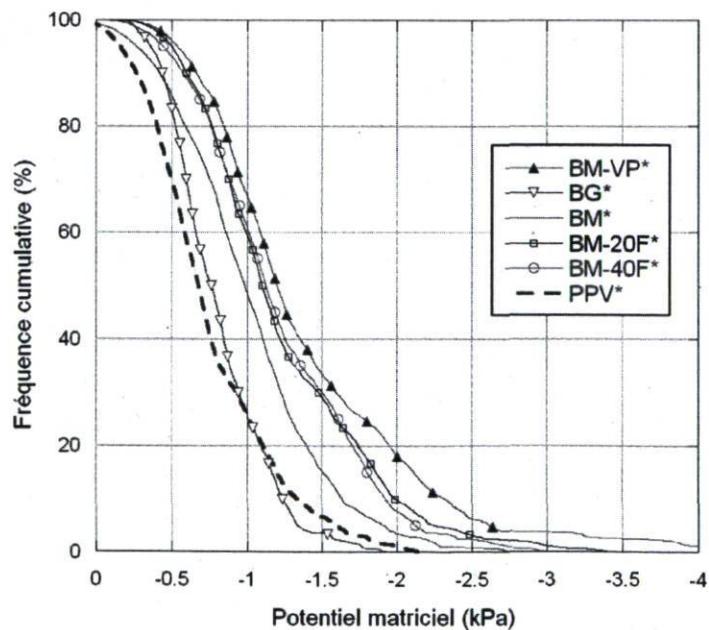


Figure 3.2 Distribution de la fréquence cumulative du potentiel matriciel des six substrats au cours de la saison de croissance 2009 (mesures réalisées entre les jours 166 et 255).

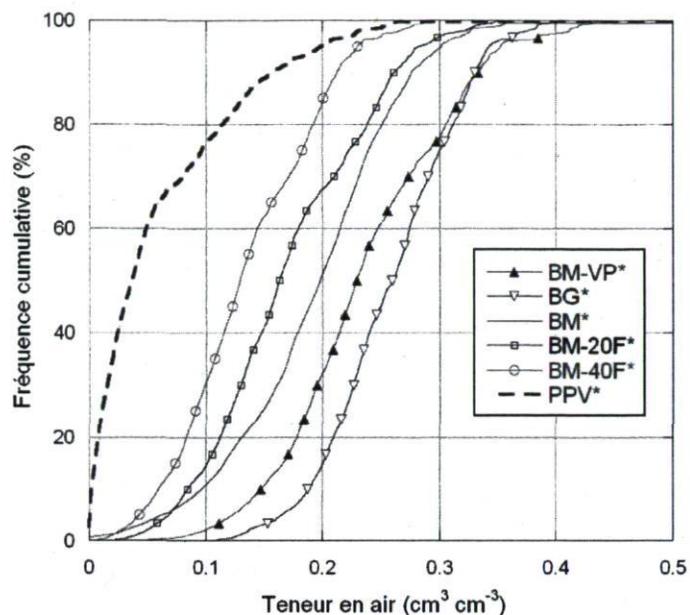


Figure 3.3. Distribution de fréquence cumulative de la teneur en air (θ_a) des 6 substrats étudiés en 2009. La porosité d'air fut calculée à partir du potentiel matriciel mesuré durant la période de croissance.

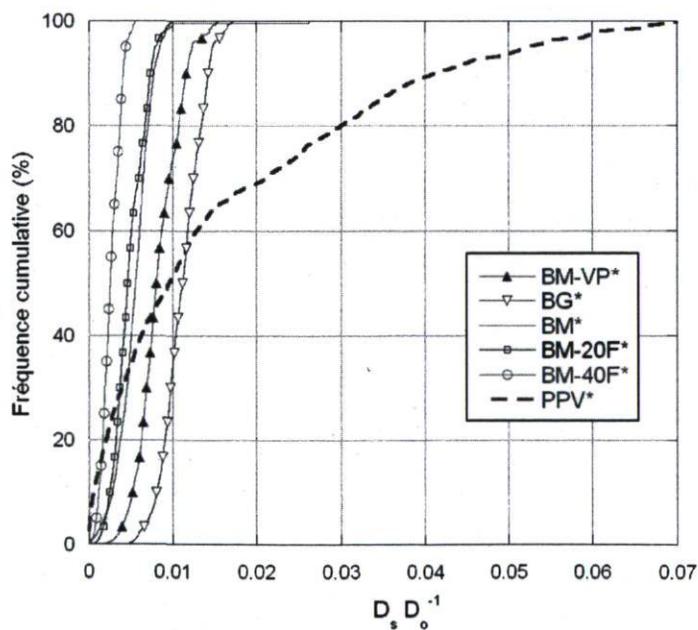


Figure 3.4. Distribution de fréquence cumulative de $D_s D_0^{-1}$ des substrats étudiés en 2009. La diffusivité relative des gaz fut calculée à partir du potentiel matriciel mesuré durant la période de croissance.

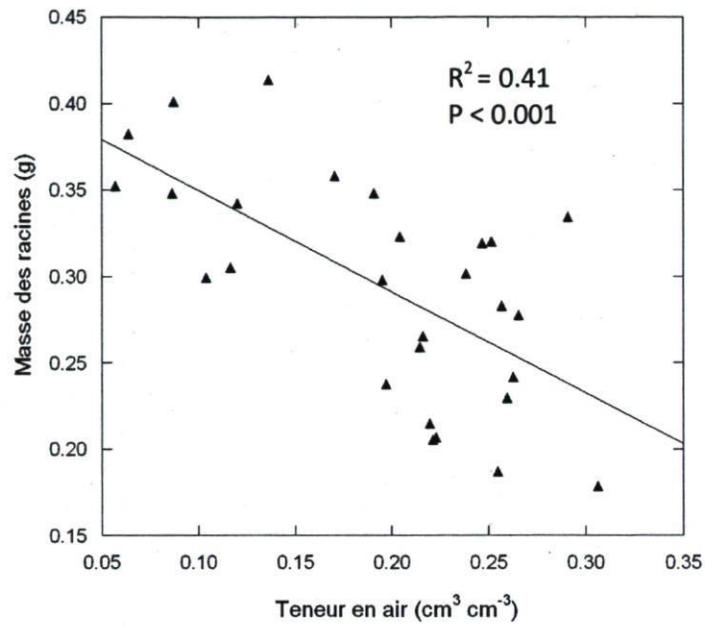


Figure 3.5. Effet de la teneur en air du substrat mesurée après confection sur la masse racinaire des plants d'épinette blanche en 2008.

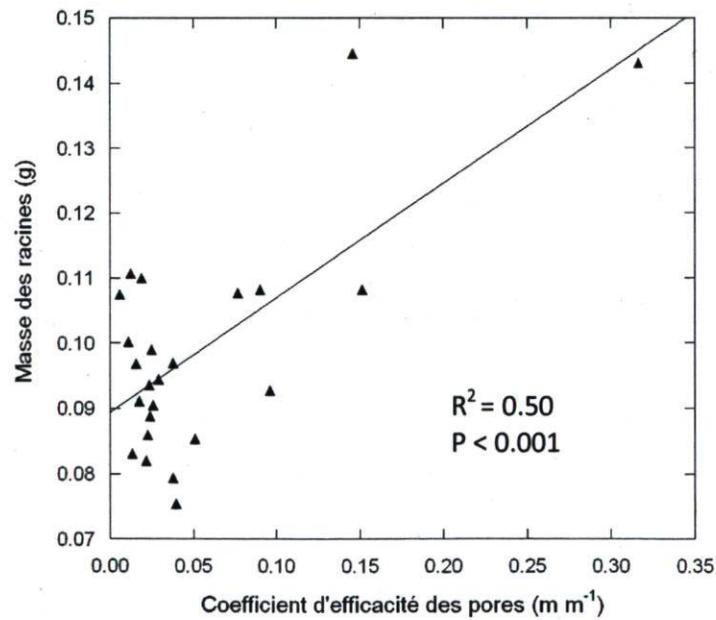


Figure 3.6. Effet du coefficient d'efficacité des pores mesuré après confection des substrats sur la masse des racines de l'épinette blanche en 2009.

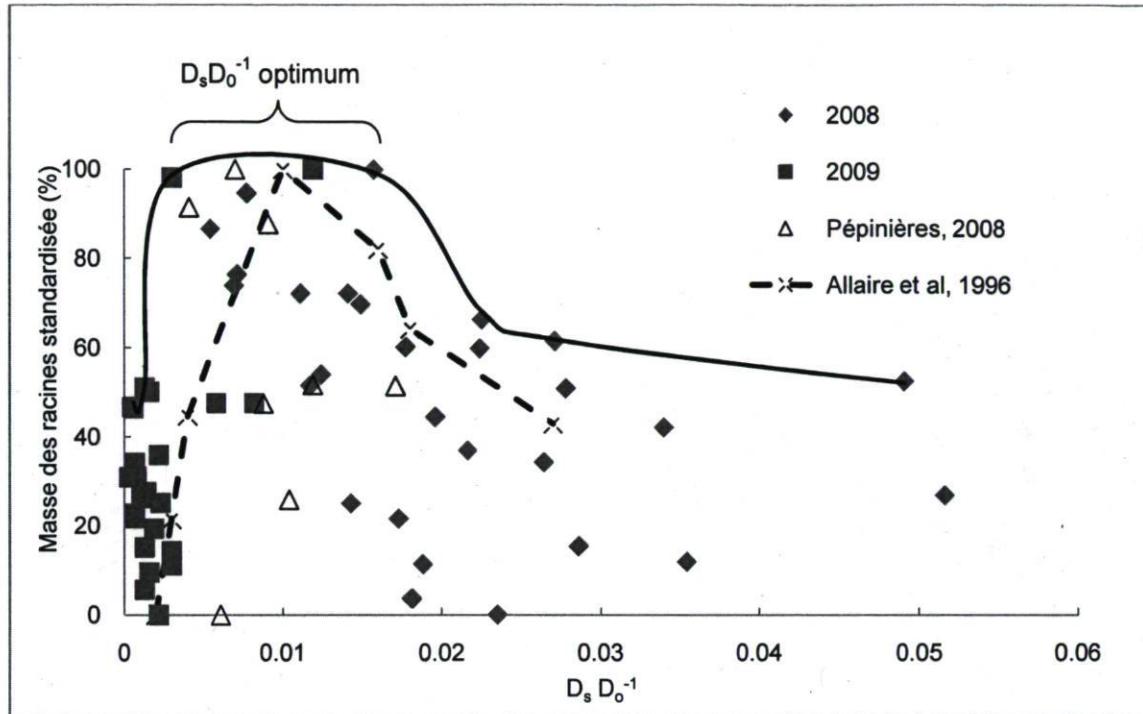


Figure 3.7. Effet de $D_s D_0^{-1}$ estimée en 2008 et 2009 sur la masse racinaire standardisée de l'épinette blanche. Une courbe de rendement maximum, déterminée selon la méthode des points de bordure, a été utilisée pour déterminer la zone de $D_s D_0^{-1}$ la plus susceptible d'offrir une croissance racinaire maximale. Cette courbe est comparée avec celle tirée des données d'Allaire *et al.* (1996) pour *P. cistenea*. Les données provenant des substrats issues des pépinières (chapitre 2) sont situés dans la zone d'aération optimale.

Conclusion générale

Par ces travaux d'estimation des effets des propriétés chimiques et physiques des substrats, ces résultats pourraient permettre aux pépiniéristes de standardiser leurs substrats de culture à l'aide de l'utilisation de variables du substrat jugées importantes pour le développement et la croissance de l'épinette blanche. Cette expérience a permis de déterminer quelles étaient les conditions physiques et chimiques des substrats employés par plusieurs pépinières forestières du Québec (chapitre 2). L'aération des substrats utilisés par les pépinières n'a pas eu d'effet limitant sur la croissance et le développement des plants d'épinette blanche (1+0) produits en récipient 25-310. La culture sous tunnel effectuée durant la première année de production est caractérisée par une irrigation contrôlée propice au maintien de teneurs en eau et en air adéquates. Les faibles teneurs en air à capacité en pot et les faibles indices de $D_s D_0^{-1}$ observés dans certains substrats pourraient toutefois constituer un problème pour la croissance racinaire lorsque les plants sont soumis à des précipitations prolongées une fois à l'extérieur des tunnels durant la deuxième année de culture. Un effet positif de l'augmentation de la densité a été observé sur la masse racinaire. Les croissances maximales des racines ont été obtenues avec une masse volumique située entre 0.09 et 0.1 g cm⁻³. De plus, une augmentation de la teneur en air à capacité en pot était reliée à une réduction de la masse aérienne et les valeurs optimales de teneur en air étaient situées entre 0.07 et 0.14 cm³cm⁻³.

Ces travaux ont permis, à l'aide d'une expérience contrôlée en milieu opérationnel, de déterminer quels étaient les effets des propriétés du substrat sur la croissance et le développement de l'épinette blanche 1+0 (chapitre 3). Il est apparu que les propriétés physiques des substrats expliquaient mieux la croissance des plants que les propriétés chimiques. En 2008, avec une régie d'irrigation plus sèche ($\psi_{\text{moy}} \approx -1.75$ à -5 kPa), l'augmentation de la teneur en air a eu un effet négatif sur les variables de croissance. En 2009, avec une régie d'irrigation plus humide ($\psi_{\text{moy}} \approx -0.75$ à -1.4 kPa), l'augmentation du coefficient d'efficacité des pores était la principale variable expliquant l'augmentation du développement des parties aérienne et racinaire de l'épinette blanche. Les croissances maximales des racines pour ces deux essais ont été observées lorsque le substrat possédait une diffusivité relative des gaz ($D_s D_0^{-1}$) située entre 0.003 et 0.016.

Il est à noter que l'utilisation de tourbe ayant une $D_5D_0^{-1}$ élevée devrait être testée avec une régie d'irrigation plus humide. L'emploi d'un tel type de substrat requerra cependant l'utilisation accrue d'eau et de fertilisants pour combler les pertes par lessivage. Une régie plus sèche pourrait aussi être testée sur les substrats présentant une faible $D_5D_0^{-1}$ afin d'accroître l'aération et favoriser la croissance des racines. Toutefois, l'emploi d'un tel substrat pourrait rendre les plants fragiles à une surirrigation, particulièrement lors de la deuxième année de culture où les plants sont placés à l'extérieur et soumis aux précipitations naturelles (Heiskanen, 1993a). Comme cette étude a démontré une augmentation de la diffusivité des gaz en 2008, mais une très faible augmentation chez les substrats les plus asphyxiants au cours de la période de culture de 2009, il semble risqué de s'en remettre à la possibilité d'une amélioration des propriétés d'aération durant la saison de croissance (Allaire-Leung *et al.*, 1999). Cependant, la croissance racinaire ayant été faible dans les substrats en 2009, cela a pu limiter l'accroissement de l'aération durant la période de croissance.

Références bibliographiques

- Allaire-Leung, S. E., J. Caron et L. E. Parent. 1999. Changes in physical properties of peat substrates during plant growth. *Canadian Journal of Soil Science* **79**:137-139.
- Allaire, S. E., J. Caron et J. Gallichand. 1994. Measuring the saturated hydraulic conductivity of peat substrates in nursery containers. *Canadian Journal of Soil Science* **74**:431-437.
- Allaire, S., J. Caron, I. Duchesne, L. E. Parent et J. A. Rioux. 1996. Air-filled porosity, gas relative diffusivity and tortuosity: indices of *Prunus x cistena* growth in peat substrate. *J. Am. Soc. Hort. Sci.* **121**:236-242.
- Bernier, P. Y. et A. Gonzalez. 1995. Effects of the physical properties of Sphagnum peat on the nursery growth of containerized *Picea mariana* and *Picea glauca* seedlings. *Scandinavian Journal of Forest Research* **10**:176-183.
- Bernier, P. Y., J. D. Stewart et A. Gonzalez. 1995. Effects of the physical properties of Sphagnum peat on water stress in containerized *Picea mariana* seedlings under simulated field conditions. *Scandinavian Journal of Forest Research* **10**:184-189.
- Bigras, F. J. et D. Dumais. 2005. Root-freezing damage in the containerized nursery: impact on plantation sites - a review. *New Forests* **30**:167-184.
- Brown, O. D. R. et E. R. Emino. 1981. Response of container-grown plants to six consumer growing media. *HortScience* **16**:78-80.
- Bunt, A. C. 1976. *Modern potting composts: a manual on the preparation and use of growing media for pot plants*. Pennsylvania University Press, University Park.
- Bunt, A. C. 1988. Media and mixes for container-grown plants. Dans U. Hyman, éditeur. (2^{ème} édition), London.
- Carles, S., J. Beaulieu, M. S. Lamhamedi, D. C. Stowe et H. A. Margolis. 2005. Improving root development: genetic selection, cultural practices or both? 0319-9118, Forest Research Information Paper - Ontario Forest Research Institute. 2005. 160, 83.
- Carles, S., D. Stowe, M. Lamhamedi, J. Beaulieu, F. Colas, B. Fecteau, B. Pierre et H., Margolis., 2007. Croissance racinaire des plants d'épinette blanche : irrigation, fertilisation et/ou génétique? .in Dir. rech. for., Ministère des Ressources Naturelles, éditeur. Carrefour de la recherche forestière, Québec.
- Carlson, L. W. 1981. *Conseils pour la culture en récipient des semis de conifères dans les provinces des Prairies*. Centre de rech. forestière du Nord, Service Canadien des forêts, Environnement Canada.

- Caron, J., P. Morel, L. M. Rivière et G. Guillemain. 2010. Growth limitations with large particles in growing media: physical and methodological issues. *Canadian journal of soil science*. Sous presse.
- Caron, J., P. H. Morel et L. M. Rivière. 1999. Aeration in growing media containing large particule size. *Acta Horticulturae* **548**:229-234.
- Caron, J. et N. V. Nkongolo. 2004. Assessing gas diffusion coefficients in growing media from in situ water flow and storage measurements. *Vadose Zone Journal* **3**:300-311.
- Caron, J. et L. M. Rivière. 2003. Quality of peat substrates for plants grown in containers. *Dans* L. E. Parent et P. Ilnicki, éditeurs. *Organic soils and peat materials for sustainable agriculture*. Boca Raton CRC Press LLC, Fla.
- Caron, J., L. M. Rivière et G. Guillemain. 2005. Gas diffusion and air-filled porosity: Effect of some oversize fragments in growing media. *Canadian Journal of Soil Science* **85**:57-65.
- Carter, M. R., éditeur. 1993. *Soil Sampling and Methods of Analysis*. Canadian Society of Soil Science. Lewis publishers.
- Chow, T. L., H. W. Rees, I. Ghanem et R. Cormier. 1992. Compactibility of cultivated sphagnum peat material and its influence on hydrologic characteristics. *Soil Science* **153**:300-306.
- CPVQ. 1997. *Méthodes d'analyse des sols, des fumiers et des tissus végétaux*, 2^{ème} mise à jour.
- da Silva, F. F., R. Wallach et Y. Chen. 1993. Hydraulic properties of *Sphagnum* peat moss and tuff (scoria) and their potential effect on water availability. *Plant and Soil* **154**:119-126.
- DABS. 2007. *Spécification technique, Tourbe de sphaigne*, Ministère des ressources naturelles et de la faune. DGA-S-8720-1. Centre de services partagés, Québec.
- Danjon, F., D. Pot, A. Raffin et F. Courdier. 2000. Genetics of root architecture in 1-year-old *Pinus pinaster* measured with the WinRHIZO image analysis system: preliminary results. Ed. A. Stokes. . Pages 77-81 *dans* A. Stokes, éditeur. *The supporting roots of trees and woody plants: form, function and physiology*. Kluwer academic publishers, Netherlands.
- De Boodt, M. 1975. Caractères physiques et disponibilité en eau des substrats. *Annales de Gembloux* **81**:59-72.
- De Boodt, M. et O. Verdonck. 1972. The physical properties of the substrate in horticulture. *Acta Horticulturae* **26**:37-44.
- De Rouin, N. 1988. *Étude de l'influence des propriétés des substrats artificiels sur la croissance et le développement de la tomate de serre*. Université Laval, Québec.
- DGPSP. 2009. *Inventaire de qualification des plants résineux cultivés en récipients*. Direction générale des pépinières et des stations piscicoles, MRNF.

- Énergies, Mines et Ressources Canada. 1981. Canada-Degrés-jours de croissance. L'atlas national du Canada, 5ème édition.
- Espiau, P. et A. Peyronel. 1976. L'acidité d'échange dans les sols-Méthode de détermination de l'aluminium échangeable et des protons échangeables. *Sci. du Sol* **3**:161-175.
- Fecteau, B., Communication personnelle. Saint-Louis-de-Blandford. 2008.
- Folk, R. S., V. R. Timmer et J. B. Scarratt. 1992. Evaluating peat as a growing medium for jack pine seedlings. 1. Conventional quality indices. *Canadian Journal of Forest Research* **22**:945-949.
- Girard, D., J. Gagnon et C. G. Langlois. 2001. Plantec: un logiciel pour gérer la fertilisation dans les pépinières forestières. Note de recherche forestière #111. Direction de la recherche forestière. Ministère des Ressources naturelles et de la Faune.
- Glinski, J. et J. Lipiec. 1990. *Soil physical conditions and plant roots*. 1st ed. CRC Press, Fla.
- Glinski, J. et W. Stepniewski. 1985. *Soil aeration and its role for plants*. CRC Press, Boca Raton, Florida.
- Gonzalez, A. 1981. Bref aperçu des propriétés chimiques et physico-chimiques de la tourbe utilisée dans les conteneurs du Québec (CRIQ). Environnement Canada, Service Canadien des forêts.
- Gras, R. 1987. Propriétés physiques des substrats. Page 409 *dans* INRA, éditeur. *Les cultures hors sol*, Paris.
- Hamann, J. 2003. Mission tourbières : Les tourbières à l'état naturel se font de plus en plus rares car elles sont largement exploitées. Les chercheurs regardent maintenant comment les restaurer. *Contact* **17**.
- Hammond, R. F. 1975. The origin, formation and distribution of peatland resources. Pages 1-22 *dans* D. W. Robinson et J. G. D. Lamb, éditeurs. *Peat in horticulture*. Academic Press, London.
- Heiskanen, J. 1990. The effect of sample handling on the water retention of growth peat substrate. *Suo* **41**:91-96.
- Heiskanen, J. 1993a. Favourable water and aeration conditions for growth media used in containerized tree seedling production: a review. *Scandinavian Journal of Forest Research* **8**:337-358.
- Heiskanen, J. 1993b. Variation in water retention characteristics of peat growth media used in tree nurseries. *Silva Fennica* **27**:77-97.
- Heiskanen, J. 1994a. Effect of peat-based two-component growth media on the growth of containerized Scots pine seedlings. *Suo* **45**:17-29.

- Heiskanen, J. 1994b. Mechanical container filling alters texture and water retention of peat growth media. *HortTechnology* **4**:286-288.
- Heiskanen, J. 1995a. Irrigation regime affects water and aeration conditions in peat growth medium and the growth of containerized Scots pine seedlings. *New Forests* **9**:181-195.
- Heiskanen, J. 1995b. Physical properties of two-component growth media based on Sphagnum peat and their implications for plant-available water and aeration. *Plant and Soil* **172**:45-54.
- Heiskanen, J. 1995c. Water Status of Sphagnum Peat and a Peat-Perlite Mixture in Containers Subjected to Irrigation Regimes. *HortScience* **30**:281-284.
- Heiskanen, J. 1999. Hydrological properties of container media based on sphagnum peat and their potential implications for availability of water to seedlings after outplanting. *Scandinavian Journal of Forest Research* **14**:78-85.
- Heiskanen, J. et R. Rikala. 1998. Influence of different nursery container media on rooting of Scots pine and silver birch seedling after transplanting. *New Forests* **16**:27-42.
- Heiskanen, J., L. Tervo et J. Heinonen. 1996. Effects of mechanical container-filling methods on texture and water retention of peat growth media. *Scandinavian Journal of Forest Research* **11**:351-355.
- Hook, D. D. et J. R. Scholtens. 1978. Adaptation and flood tolerance of tree species. *Dans* D. D. Hook et R. M. M. Crawford, éditeurs. *Plant life in anaerobic environment*. Ann Arbor Sciences Publishers, Ann Arbor, Michigan.
- Hook, W. R., N. J. Livingston, Z. J. Sun et P. B. Hook. 1992. Remote diode shorting improve measurement of soil water by time domain reflectometry. *Soil Science Society of America Journal* **56**:1384-1391.
- Johnson, P. 1968. *Horticultural and agricultural uses of sawdust and soil amendments*. Paul Johnson, National City, California.
- Kemper, W. D. et R. C. Roseneau. 1986. Aggregate stability and size distribution. Pages 425-441 *dans* A. Klute, éditeur. *Methods of soil analysis*. Agronomy Monograph no 9: Part 1. 2nd ed. , Madisson, WI.
- King, J. A. et K. A. Smith. 1987. Gaseous diffusion through peat. *Journal of Soil Sciences* **38**:173-177.
- Kormanik, P. P., J. L. Ruehle et H. D. Muse. 1990. Frequency distribution and heritability of first-order lateral roots in loblolly pine seedlings. *Forest Science* **36**:802-814.
- Kozłowski, T. T. 1997. Responses of woody plants to flooding and salinity. *Tree physiology monograph* **1**:1-29.

- Lackey, M. et A. Alm. 1982. Evaluation of growing media for culturing containerized red pine and white spruce. *Tree Planters' Notes* **33**:3-7.
- Lambany, G., L. Robidas et P. Ballester. 1997. Measurement of soil water content in a peat-vermiculite medium using time domain reflectometry (TDR): a laboratory and field evaluation. *Tree Planters' Notes* **47**:88-93.
- Lamhamedi, M. S., G. Lambany, H. Margolis, M. Renaud, L. Veilleux et P. Y. Bernier. 2001. Growth, physiology, and leachate losses in *Picea glauca* seedlings (1+0) grown in air-slit containers under different irrigation regimes. *Canadian Journal of Forest Research* **31**:1968-1980.
- Lamhamedi, M. S., P. Y. Bernier et C. Hebert. 1997. Effect of shoot size on the gas exchange and growth of containerized *Picea mariana* seedlings under different watering regimes. *New Forests*. 1997. **13**: 209-223.
- Lamhamedi, M. S., L. Labbe, H. A. Margolis, D. C. Stowe, L. Blais et M. Renaud. 2006. Spatial variability of substrate water content and growth of white spruce seedlings. *Soil Science Society of America Journal* **70**:108-120.
- Lamhamedi, M. S., H. Margolis, M. Renaud, L. Veilleux et I. Auger. 2003. Effect of different irrigation regimes on the growth, mineral nutrition and nutrient leaching in seedlings of black spruce (1+0) produced in air-slit containers in a forest nursery. *Canadian Journal of Forest Research* **33**:279-291.
- Lamhamedi, M. S., M. Renaud et L. Veilleux. 2004. Determination of thresholds of frost tolerance of white spruce 1+0 plants in forest nurseries across the ecological regions of Quebec. *Memoire de Recherche Forestiere - Direction de la Recherche Forestiere, Ministere des Ressources Naturelles, de la Faune et des Parcs*.
- Lamhamedi, M. S., Communication personnelle. Québec. 2008.
- Landis, T. D. 1985. Mineral nutrition as an index of seedling quality. Pages 29-48 *dans* Evaluating seedling quality: principles, procedures, and predictive abilities of major tests. Corvallis, Forest Research Laboratory, Oregon State University.
- Landis, T. D., R. W. Tinus et J. P. Barnett. 1989a. Containers and growing media. Vol 2. The container tree nursery manual. Agric. Handbk. 674. USDA Forest Service, Washington, DC.
- Landis, T. D., R. W. Tinus et J. P. Barnett. 1989b. Seedling nutrition and irrigation. Vol. 4. The container tree nursery manual. Agric. Handbk. 674. . USDA Forest Service, Washington, DC.
- Landis, T. D., R. W. Tinus, S. E. McDonald et J. P. Barnett, éditeur. 1989c. The Biological Component: Nursery Pests and Mycorrhizae, Vol 5, The container tree nursery manual. Agric. Handbk. 674. USDA Forest Service, Washington, DC.
- Langerud, B. R. 1986. A simple *in situ* method for the characterization of porosity in growth media. *Plant and Soil* **93**:413-425.

- Langerud, B. R. et M. Sandvik. 1987. Development of containerized *Picea abies* (L.) Karst. seedlings growth with heavy watering on various peat, perlite and mineral wool mixtures. *New Forests* **1**:89-99.
- Langlois, C. G. et J. Gagnon. 1993. A global approach to mineral nutrition based on the growth needs of seedlings produced in forest tree nurseries. Pages 303-306 *dans* XII International plant nutrition colloquium. Kluwer Academic Publishers, Perth, Western Australia.
- Lemaire, F., A. Dartigues, L. M. Rivière, S. Charpentier et P. Morel. 2003. Culture en pots et conteneurs, principes agronomiques et applications. Deuxième édition revue et augmentée. INRA Éditions.
- Lucas, R. E., P. E. Rieke et R. S. Farnham. 1965. Peats for soil improvement and soil mixes. *Farm Sci. Ser. Ext. MI: Michigan State University, Cooperative Extension Service. Bull.* **516**:11.
- Mari, S., G. Jansson et A. Jonsson. 2003. Genetic variation in nutrient utilization and growth traits in *Picea abies* seedlings. *Scandinavian Journal of Forest Research* **18**:19-28.
- McMillin, J. D. et M. R. Wagner. 1995. Effects of water stress on biomass partitioning of ponderosa pine seedlings during primary root growth and shoot growth periods. *Forest Science* **41**:594-610.
- Milk, R. R., W. C. Fonteno et R. A. Larson. 1989. Hydrology of horticultural substrates: I. Mathematical models for moisture characteristics of horticultural container media. *Journal of the American Society for Horticultural Science* **114**:48-52.
- MRN. 1997. Maladies et insectes importants dans les pépinières forestières au Québec. 72 Page Ministère des Ressources Naturelles.
- Mustin, M. 1987. Le compost : gestion de la matière organique. *Édité par* F. Dubusc, Paris. 954 p.
- MRNF. 2009. Page consultée le 10 février 2010. La production de semences et de plants de reboisement. [En ligne] URL: <http://www.mrnf.gouv.qc.ca/forets/semences/index.jsp>.
- Naasz, R., J. C. Michel et S. Charpentier. 2006. Microbial respiration and its consequences on oxygen availability in peat substrate. *Acta Horticulturae* **779**:91-96.
- Nemati, M. R., J. Caron, O. Banton et P. Tardif. 2002. Determining air entry value in peat substrates. *Soil Science Society of America Journal* **66**:367-373.
- Nienstaedt, H. et J.-C. Zasada. 1990. *Picea glauca* (Moench) Voss. Pages 204-234 *dans* R. M. Burns et B. H. Hankala, éditeurs. *Silvics of North America Volume 1. Conifers*. USDA Forest Service, Washington, DC.
- Nkongolo, N. V. et J. Caron. 1999. Bark particle sizes and the modification of the physical properties of peat substrates. *Canadian Journal of Soil Science* **79**:111-116.

- Nkongolo, N. V. et J. Caron. 2006a. Pore space organization and plant response in peat substrates: I. *Prunus x cistena* and *Spiraea japonica*. *Scientific Research and Essays* **1**:77-86.
- Nkongolo, N. V. et J. Caron. 2006b. Pore space organization and plant response in peat substrates: II. *Dendratherum morifolium* Ramat. *Scientific Research and Essays* **1**:93-102.
- Ouimet, R., J. Charbonneau, L.-E. Parent, J. Blain, P. Joyal et A. Gosselin. 1990. Effets de la composition du substrat tourbeux et du volume des sacs de culture sur la productivité de la tomate de serre. *Canadian Journal of Plant Science* **70**:585-590.
- Paquet, J. M., J. Caron et O. Banton. 1993. In-situ determination of the water desorption characteristics of peat substrates. *Canadian Journal of Soil Science* **73**:329-339.
- Puustjarvi, V. et R. A. Robertson. 1975. Physical and chemical properties. Page 170 *dans* D. W. Robinson et J. G. D. Lamb, éditeurs. *Peat in horticulture*. Academic Press, London.
- Puustjirvi, V. 1969. Water-air relationships of peat in peat culture. Pages 43-55. *Peat plants Yearbook*.
- Scarratt, J. B. 1986. An evaluation of some commercial soluble fertilizers for culture of jack pine container stock. Inf. Rep., Canadian Forestry Service, Great Lakes Forestry Service. , Sault Ste. Marie, ON.
- Tilt, K. M., T. E. Bilderback et W. C. Fonteno. 1987. Particle size and container size effects on growth of three ornamental species. *Journal of the American Society of Horticultural Science* **112**:981-984.
- Timmer, V. R. 1991. Interpretation of seedling analysis and visual symptoms. Pages 113-134 *dans* R. van den Driessche, éditeur. *Mineral nutrition of conifer seedlings*. CRC Press, Boston, Mass.
- Timmer, V. R. et W. J. Parton. 1982. Monitoring nutrient status of containerized seedlings. Pages 48-58 *in* Ontario Ministry of Natural Resources Nurseryman's Meeting; 1982 June, Thunder Bay, ON. Toronto.
- Tinus, R. W. 1974. Characteristics of seedlings with high survival potential. Pages 276-282 *in* North American Containerized Forest Tree Seedling Symposium, 1974 August 26-29. Great Plains Agricultural Council, Denver, CO.
- Tomlinson, J. D. 1985. The effects of sand and Terra-Sorb on the physical properties of a pine bark medium and their effect on the growth of three ornamental species. North Carolina State University, Raleigh.
- Topp, J. C., J. L. Davis et A. P. Annan. 1980. Electromagnetic determination of soil water content: measurement in coaxial transmission lines. *Water Resources Research* **16**:852.
- Tourigny, M. 2009. DGPSP, MRNF. Fréquence des défauts morphologiques des plants PFD en 2009. Données non publiées.

- Vomocil, J. A. et W. J. Flocker. 1961. Effect of soil compaction on storage and movement of soil air and water. *Transactions of the American Society of Agronomical Engineering* 4:242-246.
- Walinga, I., J. J. Van Der Lee, V. J. G. Houba, W. Van Vark et I. Novosamsky. 1995. *Plant analysis manual*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, the Netherlands.
- Warncke, D. D. 1986. Analyzing greenhouse growth media by the saturation extraction method. *HortScience* 21:223-225.
- Wesseling, J. et W. R. Wijk. 1957. Land drainage in relation to soil and crops I. Soil physical conditions in relation to drain depth. Pages 461-504 *dans* J. N. Luthin, éditeur. *Drainage of agricultural land*. American Society of Agronomy, Wisconsin.

Annexe 1

Annexe 1 Transformation des variables pour le respect des conditions du test de LSD protégé pour les analyses du chapitre 3.

Année	Moment de la mesure de la variable	Variable (x)	Transformation effectuée
2008	En début de culture	1_4mm	$\ln(x)$
2009	En début de culture	DsD0-1	$(x)^{1/2}$
2009	En début de culture	γ	$(x)^{1/2}$
2009	En début de culture	Contenu en P	$\ln(x)$
2009	En fin de culture	DsD0-1	$\ln(x)$
2009	En fin de culture	γ	$\ln(x)$