

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

**CROISSANCE ET FONCTIONS HYDRIQUES DE PLANTS D'ÉPINETTE NOIRE
(*PICEA MARIANA* (MILL.) B.S.P.) ET DE PIN GRIS (*PINUS BANKSIANA* LAMB.)
TROIS ANS APRÈS PLANTATION DANS DES PESSIÈRES NOIRES À LICHENS
DE LA FORÊT BORÉALE COMMERCIALE**

MÉMOIRE

PRÉSENTÉ À

L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À CHICOUTIMI

comme exigence partielle

de la maîtrise en ressources renouvelables

PAR

FRANÇOIS HÉBERT B. Sc.

juin 2004



Mise en garde/Advice

Afin de rendre accessible au plus grand nombre le résultat des travaux de recherche menés par ses étudiants gradués et dans l'esprit des règles qui régissent le dépôt et la diffusion des mémoires et thèses produits dans cette Institution, **l'Université du Québec à Chicoutimi (UQAC)** est fière de rendre accessible une version complète et gratuite de cette œuvre.

Motivated by a desire to make the results of its graduate students' research accessible to all, and in accordance with the rules governing the acceptance and diffusion of dissertations and theses in this Institution, the **Université du Québec à Chicoutimi (UQAC)** is proud to make a complete version of this work available at no cost to the reader.

L'auteur conserve néanmoins la propriété du droit d'auteur qui protège ce mémoire ou cette thèse. Ni le mémoire ou la thèse ni des extraits substantiels de ceux-ci ne peuvent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

The author retains ownership of the copyright of this dissertation or thesis. Neither the dissertation or thesis, nor substantial extracts from it, may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

REMERCIEMENTS

Je tiens d'abord à remercier mon directeur, M. Daniel Lord, pour m'avoir donné l'opportunité de réaliser ma maîtrise à l'UQAC. Malgré son emploi du temps chargé, il a toujours été disponible lorsque le besoin s'en faisait sentir et m'a toujours prodigué de précieux conseils. De plus, il a toujours mis à ma disposition le plus de ressources financières, matérielles et humaines possibles pour la bonne réalisation de mon projet. Je le remercie pour la grande confiance qu'il a eue envers moi, en tant qu'étudiant... et en tant que gardien de but.

Je veux remercier particulièrement mon co-directeur, M. Jean-François Boucher, pour sa disponibilité, pour son encouragement, pour ses connaissances et pour son soutien moral. C'est en grande partie grâce à lui si j'en suis rendu à ce point dans mon cheminement académique. Il a toujours été présent dans les moments difficiles pour m'encourager à poursuivre et à ne pas lâcher. Grâce à sa précieuse collaboration, j'ai acquis une confiance en mes moyens que je n'avais pas auparavant.

Je tiens à remercier aussi M. François Girard, avec qui j'ai formé une équipe formidable pendant mon projet. Grâce à son amitié et à son support, j'ai passé deux des plus belles années de ma vie.

Je tiens à souligner le support inconditionnel de ma copine, Édith Cadieux pendant cette période même lorsque je n'étais pas du monde. À ma famille, qui même s'ils ont un peu de difficulté à comprendre ce que je fais a toujours été là pour moi, et à mes amis qui m'ont toujours encouragé dans la poursuite de mes recherches.

J'aimerais remercier la contribution de quelques personnes à mon projet dont Jacques Allaire, Dominic Dufour, Michaël Tremblay et Sébastien Audet pour leur aide technique en plus de Denis Walsh et Pascal Sirois pour les questions statistiques. De plus, je voudrais souligner l'aide apporté par M. Pierre Y. Bernier et M. Sébastien Dagneault du Centre de Foresterie des Laurentides pour certains aspects précis de mon travail.

Finalement, j'aimerais remercier le support financier (personnel et de mon projet) des organismes suivants:

- Le consortium de recherche sur la forêt boréale commerciale
- Le fond de recherche de la nature et des technologies du Québec
- MAGE-UQAC
- AES
- Abitibi-Consolidated

RÉSUMÉ

L'épinette noire (*Picea mariana* (Mill.) B.S.P.) est adaptée pour se régénérer après un feu. Il peut arriver cependant qu'une suite d'accidents de régénération (feux à intervalle rapproché) mène à un recrutement déficitaire par rapport au peuplement initial, créant ainsi un peuplement de plus faible densité, pouvant même devenir pessière à lichens à terme. La prépondérance des éricacées et des lichens contribue, selon toutes vraisemblances, à créer un milieu impropre à la croissance de l'épinette noire en causant une forte compétition pour les nutriments et l'eau disponible. Ayant des évidences que les pessières noires à lichens ont déjà supporté des peuplements d'épinette noire fermés et denses, la remise en production par la plantation devient envisageable. Les fonctions hydriques des plants de conifères priment lors des premières années suivant une plantation. De plus, les conditions hydriques peuvent être modifiées par l'application de traitements de préparation de terrain comme le scarifiage. Les objectifs de ce projet de recherche sont de i) mesurer l'effet de différentes préparations de terrain sur la croissance et les fonctions hydriques de semis d'épinette noire et de pin gris plantés dans les pessières noires à lichens non-perturbées et ii) de comparer, pour les mêmes variables, la réponse des mêmes semis plantés dans les pessières noires à mousses scarifiées qui avaient été préalablement récoltées. Le dispositif expérimental de ce projet fut un plan factoriel en cinq blocs 4X2, comprenant en parcelle principale quatre traitements de préparation de terrain soit, un scarifiage TTS à la fois dans les pessières noires à mousses et les pessières noires à lichens (scarifié p.l. et scarifié p.m.), taupage dans les pessières noires à lichens (taupe) et d'un traitement planté sans préparation de terrain dans les pessières noires à lichens (sans). Les deux espèces étudiées (pin gris et épinette noire) étaient en sous-parcelle. Des mesures de croissance (hauteur, diamètre, biomasse totale, ratio biomasse racinaire/aérienne et foliaire/aérienne) et de physiologie (conductance stomatique à lumière saturante, potentiel hydrique pré-aube du plant) en plus du contenu volumétrique en eau du sol lors de quatre échantillonnages en 2002 ont été prises dans des pessières noires à lichens et des pessières noires à mousses du nord de la forêt boréale commerciale (50° parallèle). Un modèle prédictif du potentiel hydrique du sol a été élaboré à partir du contenu volumétrique en eau du sol et du contenu en matière organique.

La croissance globale en biomasse, après trois ans, des plants des pessières noires à lichens s'est avérée comparable à celles des plants des pessières noires à mousses malgré des hauteurs et des diamètres supérieurs des plants récoltés dans les pessières noires à mousses. Ces différences de croissance n'ont pu être expliquées par les fonctions hydriques des plants, semblables entre les différents traitements. De plus, les mesures des conditions hydriques de chacun des traitements indiquent que les pessières noires à lichens n'ont pas créé de conditions hydriques plus asséchantes pour les plants d'épinette noire et de pin gris que les pessières noires à mousses adjacentes. Dans les pessières noires à lichens, la différence de croissance, après trois ans, en faveur du traitement scarifié face aux autres traitements ne peut être expliquée par la réponse physiologique des plants d'épinette noire

puisque'elle fut la même dans chaque traitement de préparation de terrain. Pour le pin gris, les valeurs supérieures de conductance stomatique observées dans le traitement scarifié ne seraient qu'un reflet de la meilleure croissance obtenue dans ce traitement trois ans après plantation. À la lumière des résultats obtenus en termes de croissance et de fonctions hydriques, il serait envisageable de reboiser les pessières noires à lichens, à condition d'effectuer des travaux de scarifiage avant plantation.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	ii
RÉSUMÉ	iv
TABLE DES MATIÈRES	vi
LISTE DES FIGURES	vii
LISTE DES TABLEAUX	viii
CHAPITRE 1: INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 2: MATÉRIEL ET MÉTHODES	11
Description des sites	12
Dispositif expérimental.....	14
Mesures édaphiques	16
Échantillonnage et mesure des plants	18
Analyses statistiques	21
CHAPITRE 3: RÉSULTATS	23
Variables morphologiques	24
Variables physiologiques	28
Variables édaphiques	30
Régression.....	31
CHAPITRE 4: DISCUSSION	32
Pessières noires à lichens scarifiées vs pessières noires à mousses scarifiées.....	33
Effets des traitements de préparation de terrain dans les pessières noires à lichens	35
CHAPITRE 5: CONCLUSION	41
CHAPITRE 6: RÉFÉRENCES.....	44

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Potentiel hydrique du sol (Ψ_s) estimé en fonction des valeurs obtenues avec les courbes de rétention d'eau.	17
Figure 2. Effet des traitements et des espèces sur la variable de biomasse totale (a), de hauteur totale (b) et de diamètre de la tige (c) des plants récoltés en septembre 2002.	27
Figure 3. Valeurs moyennes de conductance stomatique des différents traitements de préparation de terrain pour l'épinette noire et le pin gris pour l'été 2002.	29
Figure 4 : Relation entre la conductance stomatique à lumière saturante et le potentiel hydrique du sol pour le pin gris échantillonnés en septembre 2002.	31
Figure 5 : Valeurs moyennes du taux de survie (%) des plants d'épinette noire et de pin gris des différents traitements de préparation de terrain pour l'épinette noire et le pin gris pour l'été 2002..	40

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Résumé de l'analyse de variance (valeurs de P , moyennes du carré des écarts des erreurs expérimentales et d'échantillonnage) des mesures morphologiques pour le diamètre de la tige (D_{tige}), la hauteur totale du plant (H_{tot}), la biomasse sèche totale du plant (B_{tot}), le ratio de biomasse sèche racine/tige (Ratio rac/tige), le ratio de biomasse sèche foliaire/aérienne (ratio fol/aé) et la masse sèche par unité de surface foliaire (MSF).....	24
Tableau 2: Résumé de l'analyse de variance (valeurs de P , moyennes du carré des écarts des erreurs expérimentales et d'échantillonnage) du taux relatif de croissance de la biomasse sèche (TRC_{ms}). Les données ont été prélevées lors de quatre échantillonnage (9 juin, 22 juillet, 8 août et 10 septembre 2002..	25
Tableau 3. Résumé de l'analyse de variance (valeurs de P et moyennes du carré des écarts des erreurs expérimentales et d'échantillonnage) sur la conductance stomatique à vapeur saturante (g_{ve}) et du potentiel hydrique pré-aube du xylème (Ψ_x). mesurées lors de quatre échantillonnages (9 juin, 22 juillet, 8 août et 10 septembre 2002) pour la conductance stomatique et de trois échantillonnages (9 juin, 22 juillet et 8 août 2002) pour le potentiel hydrique pré-aube.	28
Tableau 4. Résumé de l'analyse de variance (valeurs de P et moyennes du carré des écarts des erreurs expérimentales et d'échantillonnage) du contenu volumétrique d'eau du sol (θ_v) et du potentiel hydrique du sol (Ψ_s) mesurés lors de quatre échantillonnages lors de l'été 2002 (9 juin, 22 juillet, 8 août et 10 septembre)...	30

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

Les pessières noires à lichens, du domaine de la pessière noire fermée, représentent des îlots de forêts clairsemés de faible densité ligneuse. Ce type de peuplement contient deux étages dominants. Le premier se compose d'arbres épars, principalement d'épinette noire (*Picea mariana* (Mill.) B.S.P) parfois accompagné de pin gris (*Pinus banksiana* Lamb.), qui couvrent moins de 40 % du couvert forestier et dont l'âge du peuplement est supérieur à 90 ans (Payette 1992, Gouvernement du Québec 2003). Le second étage se caractérise par de grandes étendues de lichens du genre *Cladina* et *Cladonia* à plus de 40 % de recouvrement et d'éricacées comme le kalmia à feuilles étroites (*Kalmia angustifolia* L.), le lédon du Groenland (*Ledum groenlandicum* Retzius.), le bleuet (*Vaccinium angustifolium* Ait.) et la cassandre caliculé (*Cassandra calyculata* (L.) D. Don.) (Morneau et Payette 1989, Payette 1992). Il existe deux types de pessières noires à lichens selon la classification forestière du Ministère des Ressources Naturelles, de la Faune et des Parcs du Québec. Il y a d'abord les pessières noires à lichens protégées par le Règlement sur les normes d'intervention dans les forêts du domaine de l'état du Gouvernement du Québec depuis 1996. Ces peuplements, de plus de 90 ans, se caractérisent par un couvert forestier renfermant moins de 40 % d'espèces arborescentes de plus de 7 m de hauteur (densité D) et plus de 40 % de lichens. Certains peuplements classés improductifs, les dénudés secs, dont le recouvrement en lichens dépasse 40 % sont aussi inclus dans ce que l'on appelle des pessières noires à lichens. Ces peuplements sont jugés improductifs puisque la productivité ligneuse est de moins de 30 m³ à l'hectare sur une période de 120 ans. Ces peuplements

d'épinette noire totalisent environ un million d'hectares de forêts sur les quinze millions retrouvés dans la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean. C'est donc près de 7 % du territoire forestier qui ne contribue pas à la possibilité forestière de cette région.

La formation des pessières noires à lichens à l'intérieur de la forêt boréale commerciale est étroitement liée à la dynamique de régénération des pessières noires à mousses. L'épinette noire, tout comme le pin gris, est bien adaptée à se régénérer après feu et le renouvellement des peuplements de cette espèce est souvent lié à ce type de perturbation (Viereck et Johnston 1990, Gagnon et al. 1999). En effet, les cônes de nature semi-sérotineux de l'épinette noire s'ouvrent partiellement à maturité et complètement lors du passage d'un feu ou sous une chaleur intense, permettant l'établissement rapide d'une régénération suffisante et le retour d'un peuplement de densité similaire au peuplement d'origine (St-Pierre et al. 1991, Gagnon et al. 1999). Au sein de la forêt boréale commerciale, le renouvellement cyclique après feu des peuplements denses en épinettes noires en nouveaux peuplements équivalents demeure la norme. Par contre, des recherches démontrent qu'il y a un risque potentiel qu'un peuplement donné connaisse une baisse de sa densité. Cette diminution est provoquée par deux perturbations en rafale, soit par des feux rapprochés ou par un feu suivant une épidémie d'insectes défoliateurs, empêchant l'établissement d'une banque de graines suffisante pour assurer une régénération adéquate (Gagnon et al. 1999, Payette et al. 2000). Lorsque ces accidents de régénération surviennent, l'ouverture du peuplement permet l'envahissement graduel des éricacées suivi

par la colonisation et l'envahissement des lichens menant, à terme, à la création d'une pessière noire à lichens (Payette et al. 2000).

Des conditions biotiques et abiotiques caractéristiques de ces peuplements rendraient difficile la croissance des arbres présents et diminueraient le succès reproductif pour plusieurs générations (Mallik 1987, Bowden 1991, Payette 1992, Steijlen et al. 1995, Riverin et Gagnon 1996). Étant donnée ces évidences, la remise en production des pessières noires à lichens de la forêt boréale commerciale pourrait être envisageable au plan conceptuel et technique.

Lorsque la régénération naturelle suivant une perturbation naturelle semble inadéquate, le maintien de la ressource exige souvent la plantation (Margolis et Brand 1990). Cette opération sylvicole est un moyen éprouvé de remise en production, mais les modalités de mise en place doivent s'ajuster en fonction des particularités biophysiques du milieu (caractéristiques pédologiques, floristiques, topographiques, microclimatiques, etc.) et de l'espèce à introduire. Plusieurs facteurs de l'environnement comme la température du sol, les conditions hydriques, la nutrition et les radiations solaires peuvent affecter l'établissement des plantations de conifères. Ces facteurs sont souvent considérés sub-optimales pour l'établissement et la croissance d'une plantation mais peuvent se modifier par la sylviculture afin d'obtenir une régénération adéquate de la forêt (Brand et Janas 1987).

Plusieurs études ont soulevé que, parmi les processus physiologiques de la plante, les fonctions hydriques étaient déterminantes pour la croissance des plants de conifères en plantation lors de leur phase d'établissement (Grossnickle 1988a, Burdett 1990, Margolis et Brand 1990, Bernier 1993). Un manque de disponibilité en eau pour la plante, souvent appelé « stress hydrique », peut entraîner des dysfonctionnements au niveau de l'assimilation du dioxyde de carbone par les feuilles et de l'assimilation des nutriments au niveau des racines (Schulze 1991). Les stress hydriques rencontrés sur le terrain par les plants sont souvent provoqués par une demande évaporatoire de l'air élevée et/ou une faible disponibilité d'eau du sol. Cette disponibilité semble s'exacerber par un mauvais contact entre le sol et les racines du plant, surtout lors des premières années suivant la plantation (Sands et Nambiar 1984, Bernier 1993).

Une quantité trop importante de végétation compétitive peut aussi contribuer à accentuer un stress hydrique des plants en prélevant une grande partie de l'eau disponible dans le sol (Prévost 1992). L'impact potentiel des éricacées et des lichens, en tant que végétation de compétition, sur la disponibilité de l'eau de l'épinette noire dans les pessières noires à lichens est un aspect qui n'a pas été couvert par les différentes recherches concernant l'effet compétitif des éricacées et des lichens sur la croissance de l'épinette noire. Une des seules études ayant pour objet l'eau et les lichens caractéristiques de ces milieux a démontré que les lichens du genre *Cladonia* pouvaient emprisonner l'eau de précipitations et maintenir un sol humide à 10 cm sous la surface même lors d'épisodes de sécheresse (Kershaw et Rouse 1971).

Une autre cause de stress hydrique peut être une température de sol trop faible qui limite l'entrée d'eau par les racines et ralentit la croissance des racines (Grossnicke 1988b). La croissance racinaire augmente l'absorption d'eau par l'augmentation de la quantité de racines non lignifiées, procurant ainsi un accès à un plus grand volume de sol (Nambiar et al. 1979, Burdett 1990). Donc, un manque de disponibilité d'eau, couplé à d'autres facteurs limite le développement et de la croissance d'une plante.

Un des moyens utilisés pour évaluer les fonctions hydriques du plant emploie des indicateurs physiologiques de stress hydrique comme le potentiel hydrique et la conductance stomatique (Bernier 1993). Le potentiel hydrique du plant mesure l'hydratation des tissus et est estimé en mesurant la pression requise à l'extraction de l'eau du xylème (Burdett 1990). Il est relié à l'équilibre entre l'entrée et la sortie de l'eau dans le continuum sol-plante-atmosphère. L'entrée d'eau dépend principalement de l'aire, de la distribution et de la perméabilité racinaire, du gradient de potentiel hydrique entre le sol et les racines et des résistances au mouvement de l'eau entre le sol et les racines. Les pertes en eau sont fonction de la surface foliaire, de la conductance stomatique et du déficit en pression de vapeur de l'air (Burdett 1990). Le potentiel hydrique pré-aube est un bon indicateur du statut hydrique de la plante puisqu'il reflète le potentiel hydrique du sol autour des racines et donne, ainsi, une indication de l'eau disponible dans le sol (Kramer 1983, Schulze 1991, Ellsworth et Reich 1992, Perry et al. 1994). Durant les assèchements de sol saisonniers, le potentiel hydrique de la plante (mi-jour et pré-aube) peut changer sur

une étendue importante de potentiel hydrique du sol (Schulze 1991). D'autres études montrent que le potentiel hydrique pré-aube des plants de conifères suit le changement saisonnier du potentiel hydrique du sol (Schulze 1991, Grossnickle et Heikurinen 1989). Cette variable s'emploie fréquemment puisque des études ont démontré que le potentiel hydrique pré-aube indique la quantité d'eau du sol actuellement rencontrée par le plant et détermine le statut hydrique dans lequel le plant commencera son activité journalière (Hinckley et al. 1978, Grossnickle et Heikurinen 1989, Garkoti et al. 2003).

La conductance stomatique mesure le contrôle des pertes en eau de la plante via les stomates et est principalement influencée par l'éclairement, la différence de pression de vapeur entre la feuille et l'air, le potentiel hydrique de la plante, la concentration en hormones foliaires, notamment l'acide abscisique, et la concentration interne en dioxyde de carbone (Hinckley et al. 1978, Jarvis 1980, Grossnickle et Blake 1986, Wilkinson et Davies 2002, Aranda et al. 2002). Lorsque le potentiel hydrique diminue ou que la demande évaporatoire de l'air est trop grande, les stomates évitent les pertes en eau en diminuant ou en fermant complètement leurs ouvertures, diminuant par le fait même la conductance stomatique. Cette diminution de conductance causée par un stress hydrique diminue la quantité de dioxyde de carbone assimilé par la plante menant, ainsi, à la diminution de la photosynthèse nette de la plante (Kramer 1983). Certaines espèces, comme l'épinette noire et le pin gris, montrent une diminution de la conductance stomatique suivant une augmentation de la demande respiratoire, et/ou d'une diminution du potentiel hydrique, amenuisant par le fait même les pertes en eau (Jarvis 1980, Grossnickle et Heikurinen

1989, Margolis et Brand 1990, Stewart et al. 1995, Lamhamedi et al. 1998). Par contre, la conductance stomatique peut être un signe d'un manque de contrôle des pertes en eau de la plante si elle a un potentiel hydrique pré-aube relativement faible (Mediavilla et Escudero 2004).

Le pin gris, montre un contrôle plus sensible de ses pertes en eau étant donné que la conductance stomatique diminue brusquement à un certain seuil de potentiel hydrique pour limiter le stress hydrique (Dang et al. 1996). Ce mécanisme de contrôle des pertes en eau et une production plus abondante de nouvelles racines comparativement à l'épinette noire font partie des réponses physiologiques et morphologiques qui peuvent expliquer une partie du plus grand potentiel de croissance en plantation du pin gris comparativement à l'épinette noire (Grossnickle et Blake 1986, Wood 1990, Sutton 1991).

Le type de préparation de terrain souvent rencontrée en forêt boréale québécoise lors de l'établissement d'une plantation est le scarifiage. Ce type de préparation de terrain modifie les conditions hydriques du site et induit aux plants des modifications de leurs fonctions hydriques pouvant améliorer, à court terme, le succès des plantations (Brand 1990, Prévost 1996). En diminuant la végétation compétitive, le scarifiage augmente la disponibilité de l'eau dans le sol pour les racines des plants, améliorant donc le statut hydrique de ceux-ci (Lanini et Radosevich 1986, Fleming et al. 1994). Cette amélioration du statut hydrique des plants de conifères a été démontrée chez le pin blanc où le potentiel hydrique pré-aube de jeunes gaules était supérieur dans les parcelles avec scarifiage, et sur

les plants en racines nues d'épinette blanche et de pin gris (Grossnickle et Heikurinen 1989, Boucher et al. 1998).

Le retrait de la végétation compétitive et l'exposition du sol minéral causé par le scarifiage entraînent également une augmentation de la température du sol (Bassman 1989, Stathers et Spittlehouse 1990). Cette augmentation calorifique a pour effet de stimuler la croissance racinaire, d'augmenter la perméabilité des cellules racinaires et de diminuer la résistance au mouvement de l'eau dans la plante et la viscosité de l'eau, rendant ainsi celle-ci plus disponible pour le plant (Kramer 1983, Margolis et Brand 1990, Bowen 1991, Dodd et al. 2000, Boucher et al. 2001).

L'impact du scarifiage sur la croissance et les fonctions hydriques des plants peut s'avérer également négatif, surtout à court terme. Le scarifiage, par l'exposition du sol minéral, provoque une hausse d'évaporation du sol, réduisant par le fait même la quantité d'eau disponible pour le plant (Stathers et Spittlehouse 1990). Cette hausse d'évaporation du sol s'accroît par une augmentation du vent dans l'entourage des semis, provoquant une transpiration plus importante des plants (Prévost 1992). Finalement, le scarifiage pourrait avoir un impact, à court terme, sur le « pool » de nutriments disponibles pour les plants (Munson et al. 1993).

Lorsque le scarifiage à grande échelle est impossible, le taupage devient un traitement sylvicole approprié. Ce type de préparation de terrain consiste à retirer l'humus

dans un rayon de 30 cm (Tremblay 1996). À plus faible échelle, son impact sur la croissance et la physiologie des plants pourrait ressembler à celui du scarifiage, mais ses impacts spécifiques sur les plants forestiers sont très peu connus.

Les objectifs de ce projet de recherche sont de i) mesurer l'effet de différentes préparations de terrain sur la croissance et les fonctions hydriques de semis d'épinette noire et de pin gris plantés dans les pessières noires à lichens non-perturbées et ii) de comparer, pour les mêmes variables, la réponse des mêmes semis plantés dans les pessières noires à mousses scarifiées qui avaient été préalablement récoltées.

Les hypothèses testés sont i) que la croissance et les fonctions hydriques de l'épinette noire et du pin gris seront supérieurs dans le traitement scarifié comparativement aux deux autres traitements dans la pessière noire à lichens et ii) que la réponse des plants sera similaire entre la pessière noire à mousses scarifiée et la pessière noire à lichens scarifiée.

CHAPITRE 2

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Description des sites

Les travaux ont été réalisés dans cinq blocs répartis dans trois sites dans le domaine de la pessière noire à mousses fermée (Bergeron 1996). Les deux premiers sites se trouvaient à environ 150 km au nord de Dolbeau-Mistassini, près de la rivière Mistassibi (Québec, Canada) (site Mistassibi-Nord, 50°08'60'' N, 71°58'30'' W et Mistassibi-Sud 49°59'24 N, 71°58'12'' W). Le troisième site était localisé à 200 km au nord de St-Ludger-de-Milot, près du lac Péribonka (Québec, Canada) (site Péribonka, 50°10'48'' N, 71°10'12''W).

La température moyenne annuelle en 2002 mesurée à environ 60 km à l'ouest du site Mistassibi-Sud fut de 0,1°C. En juillet, la température moyenne maximale atteignait 22,2°C et la température moyenne minimale fut de 8,9°C. Pour janvier, la température moyenne maximale était de -12,4°C et la moyenne minimale de -22,8°C. Il y a eu, en moyenne, dans le secteur de Chibougamau, des précipitations de 961,3 mm dont 659,7 mm sous forme de pluie (68,5 %) le reste étant sous forme de neige (Environnement Canada 2003).

Les sites présentaient un drainage rapide de classe 1 ou 2 (Saucier et al. 1994) et avaient un humus de type mor, constitué en majorité de sphaigne et/ou de lichens semi-décomposés. Le sol minéral était de type podzolique humo-ferrique (Bergeron 1996).

Le type de dépôt de surface présent pour les sites Mistassibi se composait principalement de tills indifférenciés d'épaisseur moyenne (entre 0,5 et 1 m) ou d'épaisseur supérieure à 1 m (Saucier et al. 1994). Pour le site Péribonka, le dépôt de surface présent dans tous les sites était un till indifférencié d'épaisseur supérieure à 1 m. Les sites étudiés se composaient de deux types de peuplements : des pessières noires à lichens et des pessières noires à mousses adjacentes aux pessières noires à lichens.

La végétation caractéristique des pessières noires à lichens étudiées se composait majoritairement de lichens du genre *Cladina* (*Cladina mitis* (Sandst.) Hustich, *Cladina stellaris* (Opiz) Brodo, *Cladina rangiferina* (L.) Nyl.), d'éricacées comme *Kalmia angustifolia* L., *Ledum groenlandicum* Retzius., *Cassandra clayculata* (L.) D. Don, *Vaccinium angustifolium* Ait. et de mousses du genre *Pleurozium* sp.. Les pessières à lichens, selon le RNI, ont un sol recouvert à plus de 40 % par des lichens. Dans le cas des pessières à mousses, la végétation présente ne diffère pas en espèces mais plutôt dans leur abondance, les mousses et les éricacées étant plus abondantes que les lichens, ceux-ci recouvrant moins de 40 % de la surface du sol.

Dispositif expérimental

Le dispositif était un plan factoriel en tiroirs 4X2 avec cinq blocs, pour un total de 40 unités expérimentales, un bloc sur le site Mistassibi-Nord (bloc 1), deux sur le site Mistassibi-Sud (blocs 2 et 3) et deux sur le site Péribonka (blocs 4 et 5). Le dispositif était constitué en parcelle principale de quatre traitements de préparation de terrain, soit i) scarifiage dans une pessière à mousses normalement productive (scarifié p.m.), ii) scarifiage dans une pessière noire à lichens (scarifié p.l.), iii) taupage dans une pessière noire à lichens (taupe) et iv) sans préparation de terrain dans une pessière noire à lichens (sans).

Le scarifiage a été effectué à l'aide d'un scarificateur à disque TTS hydraulique pour les blocs des sites Mistassibi et d'un scarificateur à disque TTS non-hydraulique pour le site Péribonka. Ce type de préparation de terrain a permis la création de sillons en soulevant le sol et l'humus et en exposant le sol minéral. Les sillons créés avaient en moyenne 67 cm de largeur par 18 cm de profondeur. Les parcelles ont été préparées en 1999 pour tous les traitements scarifiés dans les pessières à lichens (scarifié p.l.) dans les cinq blocs. Les parcelles scarifiées dans la pessière à mousses (scarifié p.m.) avaient tous subi, au préalable, une coupe avec protection de la régénération et des sols (C.P.R.S.) à l'aide d'une abatteuse mécanisée. Le bloc 1 (Mistassibi-Nord) fut récolté en 1997, les blocs 2 et 3 (site Mistassibi-Sud) ont été récoltés en 1994, ceux des blocs 4 et 5 (site

Péribonka) en 1999. Le scarifiage du bloc 1 a été réalisé en 1997, ceux du bloc 2 et 3 en 1998 et ceux des blocs 4 et 5 en 1999.

La préparation de terrain de type taupe visait à exposer un rayon de sol minéral de 30 cm dans le but de créer un microsite de plantation (Tremblay 1996). Le taupage a été effectué à l'aide d'une débroussailleuse mécanisée modifiée pour creuser un trou d'environ 30 cm de diamètre dans l'humus et d'une profondeur suffisante pour exposer le sol minéral. Toutes les parcelles du traitement taupe ont été préparées lors de l'été 1999.

La plantation de toutes les parcelles expérimentales a été réalisée à l'automne 1999. Les plants utilisés pour l'étude avaient été produits en récipients IPL 67-50 et les graines étaient de provenance locale (Saguenay-Lac-St-Jean). La hauteur totale des plants lors de la plantation était en moyenne ($n=120$) de 174 mm pour le pin gris et de 168 mm pour l'épinette noire. Le diamètre était de 2,4 mm pour le pin gris et de 2,0 mm pour l'épinette noire. (MRNFP 2003 données non-publiées).

Ayant déterminé qu'il n'y aurait pas suffisamment de plants pour l'ensemble de l'étude le traitement sans préparation dans la pessière à lichens pour l'épinette noire fut abandonné pour deux blocs expérimentaux (site Péribonka). Ces blocs n'ont pu être remplacés étant donné des contraintes logistiques. De plus, le traitement scarifié p.m. du bloc 1 (Mistassibi-Nord) fut abandonné considérant l'historique différent de ce traitement (feu 1996).

Mesures édaphiques

Un modèle prédictif du potentiel hydrique du sol (Ψ_s) en fonction de la teneur volumétrique en eau du sol (θ_v) et du pourcentage de matière organique du sol (% M_{org}) a été construit avec les données d'un échantillonnage complémentaire permettant l'élaboration de courbes de rétention d'eau du sol organique et minéral par la méthode de Klute (1986). Ce modèle fut ensuite utilisé avec le θ_v et le % MO des microsites des plants expérimentaux, prélevés après chaque mesure, afin d'estimer le Ψ_s propre aux microsites des plants.

Le modèle mathématique de prédiction Ψ_s en fonction de % M_{org} et teneur volumétrique en eau du sol (θ_v) a été obtenu après avoir trouvé le meilleur ajustement possible (R^2 et distribution des résidus) des données, en l'occurrence en utilisant les transformations racine carrée et logarithme naturel (figure 1) :

Le θ_v autour des plants prélevés lors des échantillonnages destructifs fut déterminé par la méthode gravimétrique (Rundell et Jarrell 1991). Pour chaque échantillonnage de plants expérimentaux, le θ_v a été déterminé à partir d'un échantillon composite de trois échantillons de sol d'environ 50 ml récoltés à environ 10 cm de profondeur dans un rayon de 15 cm autour du plant à l'aide d'une sonde ouverte (Soil Moisture inc., CA). Le

pourcentage de matière organique (% M_{org}) présent dans les échantillons composites de sol fut déterminé par la méthode de perte au feu (Nelson et Sommers 1983).

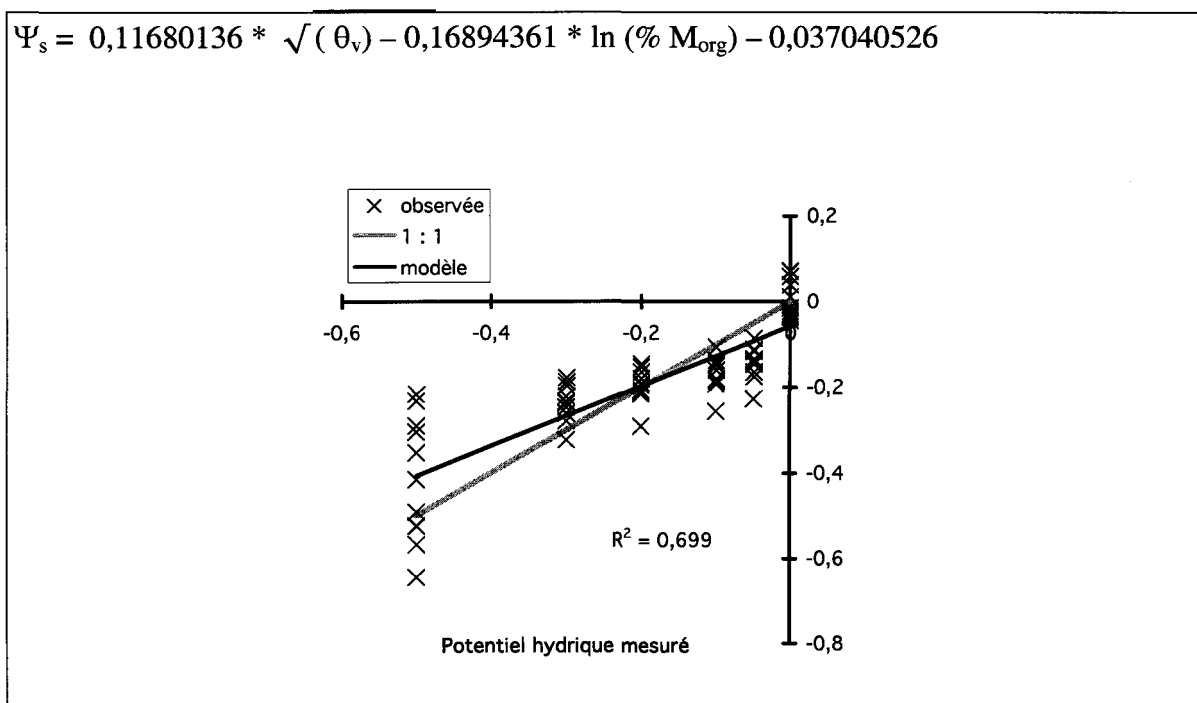


Figure 1 : Potentiel hydrique du sol (Ψ_s) estimé en fonction des valeurs obtenues avec les courbes de rétention d'eau. θ_v = teneur volumétrique en eau du sol. % M_{org} = pourcentage de matière organique du sol.

L'échantillonnage complémentaire a eu lieu à l'automne 2002 et comprenait six échantillons prélevés dans l'horizon minéral et six autres prélevés dans l'horizon organique de sols représentatifs du dispositif expérimental (bordure du bloc 3). Le % M_{org} des échantillons utilisés pour les courbes de rétention a été déterminé subséquemment.

Échantillonnage et mesure des plants

L'échantillonnage permettant la prise de mesures physiologiques s'est déroulé sur quatre (4) périodes au cours de la saison de croissance des plants de l'an 2002, soit du 10 au 13 juin (jours 161 à 164), du 24 au 26 juillet (jours 205 à 207), du 8 au 13 août (jours 220 à 225) et du 17 au 18 septembre (jours 260 et 261). À chaque période d'échantillonnage, deux variables physiologiques ont été mesurées : le potentiel hydrique pré-aube du xylème (Ψ_x) ainsi que la conductance stomatique pour la vapeur d'eau (g_{ve}). Pour la période d'échantillonnage du mois d'août, seules les mesures de g_{ve} ont été prises sur le site Péribonka (bloc 4 et 5), étant donné les conditions météo défavorables. Pour la dernière période d'échantillonnage de septembre, le Ψ_x n'a pas été mesuré, les analyses du potentiel hydrique indiquant dès lors l'absence de différences significatives entre les traitements et entre les espèces.

Pour la mesure du Ψ_x , un plant était sélectionné au hasard dans chaque parcelle expérimentale de chaque bloc. La récolte des échantillons avait lieu avant l'apparition du croissant solaire, c'est-à-dire entre 1h30 et 3h H.N.E.. La pousse apicale était déposée dans des sacs de plastique et entreposée dans une glacière remplie de glace et d'eau. Le Ψ_x de la tige a été déterminé à l'aide d'une chambre à pression (PMS Instruments, Corvallis, OR).

La g_{ve} fut mesurée sur la pousse apicale coupée de l'année de croissance en cours d'un plant sélectionné au hasard dans chaque parcelle expérimentale de chaque bloc. Immédiatement après la coupe, la pousse était déposée dans des sacs de plastiques étanches contenant une éponge humide. Les pousses récoltées étaient maintenues en présence de lumière solaire saturante. Les échantillons étaient mesurés moins de 30 minutes après leur récolte. Des essais préliminaires ont permis de déterminer que les plants d'épinette noire et de pin gris pouvaient demeurer dans des sacs saturés en vapeur d'eau jusqu'à 45 minutes sans que cela n'affecte les mesures de g_{ve} (résultats non montrés). La g_{ve} a été mesurée à l'aide d'un appareil portatif de photosynthèse LI-COR 6200 (LI-COR Inc., Lincoln, Nebr.) avec une cuvette de 0,25 L. Les mesures ont été faites sous éclairement saturant du soleil ($>1200 \mu\text{mol de photons m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) ou, dans le cas d'un passage nuageux, sous une lampe halogène installée à 15 cm au-dessus de la cuvette. Les plants étaient mesurés avant le midi solaire, c'est-à-dire entre 10h00 et 12h00 H.N.E.

Pour chaque plant, un sous-échantillon d'aiguilles incorporées dans la cuvette a été utilisé pour déterminer la surface foliaire. La méthode employée fut de numériser, à très haute résolution (2400 dpi) à l'aide d'un numériseur à plat, des coupes transversales à mi-longueur de 10 aiguilles pour déterminer le périmètre moyen à l'aide d'un logiciel de traitement d'image NIH-image (National Institute of Health, MA). La longueur des 10 aiguilles avait auparavant été mesurée à l'aide du logiciel MacSeed (Regent instruments Inc., Québec, Canada) pour l'épinette noire et manuellement pour le pin gris. La surface des aiguilles est égale au périmètre moyen à mi-longueur multiplié par la longueur moyenne

des aiguilles. Étant donné la forme en pointe des aiguilles de conifères, un facteur de correction a été appliqué à l'équation pour obtenir la surface réelle. Le facteur de correction a été élaboré par la coupe d'une aiguille en 15 sections transversales égales et par le calcul du périmètre de la même façon que mentionné précédemment. La surface réelle de l'aiguille a été déterminée par l'addition de la surface calculée des 15 sections transversales de l'aiguille. Le périmètre de la coupe médiane de chaque aiguille a été mesuré et multiplié par la longueur de l'aiguille pour obtenir la surface estimée. Le rapport entre la surface estimée et la surface mesurée a permis de déterminer le facteur de correction pour chaque espèce. Le facteur de correction a été mesuré sur trois aiguilles pour chaque espèce et la moyenne obtenue a servi de facteur de correction pour la détermination de la surface foliaire des sous-échantillons. Le facteur de correction obtenu est de 0,892 pour l'épinette noire et de 0,915 pour le pin gris.

Les dix aiguilles qui ont servi pour la numérisation ont été séchées à 65°C pendant 48 heures pour déterminer la masse foliaire par unité de surface (MFS). La MFS a permis d'estimer la surface foliaire des aiguilles incluses dans la chambre de mesure de l'appareil de photosynthèse. Les mesures de g_{ve} ont été recalculées à partir des surfaces foliaires réelles.

La partie des plants qui a servi à mesurer les variables physiologiques a été prélevée afin d'effectuer des mesures morphologiques en laboratoire. La hauteur totale (H_{tot}) et le diamètre à l'interface air-sol (D_{tige}) de chaque plant ont été mesurés. Les plants ont été

ensuite séchés à 65°C pendant 48 heures pour obtenir la biomasse sèche de la tige, des aiguilles et des racines.

Analyses statistiques

Des analyses de variances en tiroirs subdivisés (split-split plot) ont été effectuées pour les variables de Ψ_x et de g_{ve} de la pousse apicale, du Ψ_s et du % E_s . Les traitements de préparation de terrain (4) étaient en parcelle principale, le facteur espèce (2) en sous-parcelle et le facteur date d'échantillonnage (4) en sous-sous parcelle.

Des analyses de variance en tiroirs (split plot) ont été effectuées pour les variables de D_{tige} , H_{tot} et biomasse sèche (B_{tot}) ainsi que le ratio biomasse sèche racinaire /biomasse sèche aérienne (ratio rac/tige), biomasse sèche foliaire/aérienne (ratio fol/aér) et du MFS. Les traitements de préparation de terrain (4) étaient en parcelle principale et le facteur espèce (2) était en sous-parcelle. Seuls les échantillons récoltés lors du dernier échantillonnage (septembre) ont servi aux analyses statistiques de ces variables. Des taux relatifs de croissance (TRC) ont été utilisés pour analyser les effets des traitements sur la croissance des plants selon la méthode de Poorter et Lewis (1986). Les variables du ratio rac/tige, fol/aér et du MFS ont été corrigées selon la méthode d'ajustement de Bauce et al. (1994) afin de ne pas déroger des postulats fondamentaux de l'analyse de variance (Zar 1999).

Toutes les données ont été testées pour l'homogénéité des variances par l'analyse visuelle des résidus (Devore et Peck 1994). Des transformations logarithmiques ont été effectuées pour certaines variables afin d'homogénéiser la variance. Dans le cas où les résultats des analyses de variance étaient significatifs, des tests LSD protégés de Fisher ont été effectués afin de comparer les moyennes entre elles (Steel et Torrie 1980).

Une ANOVA a été réalisée pour chacune des espèces pour la variable de g_{ve} où l'interaction traitement*espèce s'est avérée significative (Zar 1999). Chaque analyse de variance était composée en parcelle principale des traitements de préparation de terrain et en sous parcelle du facteur date. Des tests LSD protégés ont été effectués dans le cas où le facteur traitement se révélait significatif.

Des régressions simples ont été effectuées entre différentes variables pour chaque traitement et pour chaque période d'échantillonnage et ce pour chaque espèce, soit : Ψ_x en fonction de Ψ_s , g_{ve} en fonction de Ψ_s , g_{ve} en fonction de Ψ_x . Un test de t sur le R^2 a été effectué sur chaque régression afin de déterminer le niveau de signification des relations observées ($p < 0,05$) (Zar 1999). Seules les régressions significatives comportant plus de dix points seront présentés dans la section résultats.

Les analyses de variance ont été réalisées à l'aide de la procédure GLM du logiciel SAS 8 (SAS Institute, NC). Pour éviter l'inflation d'erreur de type I causé par des ANOVAs multiples (Zar 1999), le seuil de signification (P) a été établi à 0,01.

CHAPITRE 3

RÉSULTATS

Variables morphologiques

Des différences significatives entre les traitements de préparation de terrain et entre les espèces sont présentes pour les variables de diamètre, de hauteur et de biomasse des plants (tableau 1). Aucune différence n'est observée pour le ratio rac/tige ($0,2941 \pm 0,1656$ g), du ratio fol/aé ($0,5181 \pm 0,1604$ g), le TRC_{ms} ($8,9518 \pm 10,724$ g) (tableau 2) et le MSF ($74,032 \pm 0,3909$ g/m²). Aucune interaction des différents facteurs entre eux ni avec le facteur date s'avère significative.

Tableau 1. Résumé de l'analyse de variance (valeurs de *P*, moyennes du carré des écarts des erreurs expérimentales et d'échantillonnage) des mesures morphologiques pour le diamètre de la tige (D_{tige}), la hauteur totale du plant (H_{tot}), la biomasse sèche totale du plant (B_{tot}), le ratio de biomasse sèche racine/tige (Ratio rac/tige), le ratio de biomasse sèche foliaire/aérienne (ratio fol/aé) et la masse sèche par unité de surface foliaire (MSF). Toutes les variables mesurées proviennent de l'échantillonnage de septembre 2002. Les facteurs significatifs sont indiqués en caractères gras.

Source de variation	dl*	D_{tige}	H_{tot}	B_{tot} **	Ratio rac/tige	MSF***	Ratio Fol/aé
Bloc (B)	4	0,7831	0,2642	0,1513	0,4848	0,6142	0,5474
Traitement (T)	3	<0,001	<0,001	<0,001	0,0779	0,1079	0,8374
Erreur exp.	11	2,5464	2257,044	0,3725	0,0053	217,5632	0,0218
Espèce (E)	1	<0,001	<0,001	0,0042	0,3461	0,3141	0,2306
E*T	3	0,1170	0,6126	0,825	0,1418	0,9550	0,2210
Erreur exp.	13	1,7706	5234,923	0,4481	0,0057		0,0180
Erreur éch.	****	1,8453	4306,014	0,38	0,0032	486,7719	0,0264

* dl = degré de liberté

**transformation logarithmique

*** Pour le MSF dl = 13

**** D_{tige} , H_{tot} , B_{tot} , Ratio rac/tige Ratio fol/aé=36

Tableau 2: Résumé de l'analyse de variance (valeurs de P , moyennes du carré des écarts des erreurs expérimentales et d'échantillonnage) du taux relatif de croissance de la biomasse sèche (TRC_{ms}). Les données ont été prélevées lors de quatre échantillonnages (9 juin, 22 juillet, 8 août et 10 septembre). Les facteurs significatifs sont indiqués en caractères gras.

Source de variation	dl*	TRC_{ms}
Bloc (B)	4	0,3579
Traitement (T)	3	<0,001
Erreur exp.	11	1,2086
Espèce (E)	1	0,0075
E*T	3	0,4662
Erreur exp.	13	0,5774
Date (D)	3	<0,001
D*T	9	0,2816
D*E	3	0,119
D*T*E	9	0,9003
Erreur exp.	90	0,2862
Erreur éch.	135	0,2581

* dl = degré de liberté

Aucune différence de B_{tot} n'est constatée entre les traitements taupe et sans préparation dans les pessières à lichens (figure 2a). Les plants recueillis dans ces deux traitements ont environ 20% des B_{tot} des plants du traitement scarifié p.l.. La B_{tot} mesurée n'est pas différente entre les deux milieux à l'étude pour le même traitement sylvicole (scarifiage p.m. et scarifiage p.l.). Les plants de pin gris ont, en moyenne, une biomasse totale plus élevée de 35 % par rapport aux plants d'épinette noire (figure 2a).

La H_{tot} et le D_{tige} des plants montrent une différence significative entre le traitement scarifié p.m. et le traitement scarifié p.l., qui eux sont significativement différents des traitements taupe et sans préparation (figures 2b et 2c). Les plants dans le traitement

scarifié p.m. ont une hauteur totale supérieure de 18 % et un diamètre supérieur de 29 % à ceux du traitement scarifié p.l.. Ces derniers ont, en moyenne, une hauteur supérieure de 27% en plus d'avoir un diamètre plus grand de 63 % que ceux des traitements taupe et sans préparation. Enfin, les plants de pin gris sont significativement plus grands de 37 % en comparaison avec l'épinette noire et ont un diamètre plus grand de 47 %.

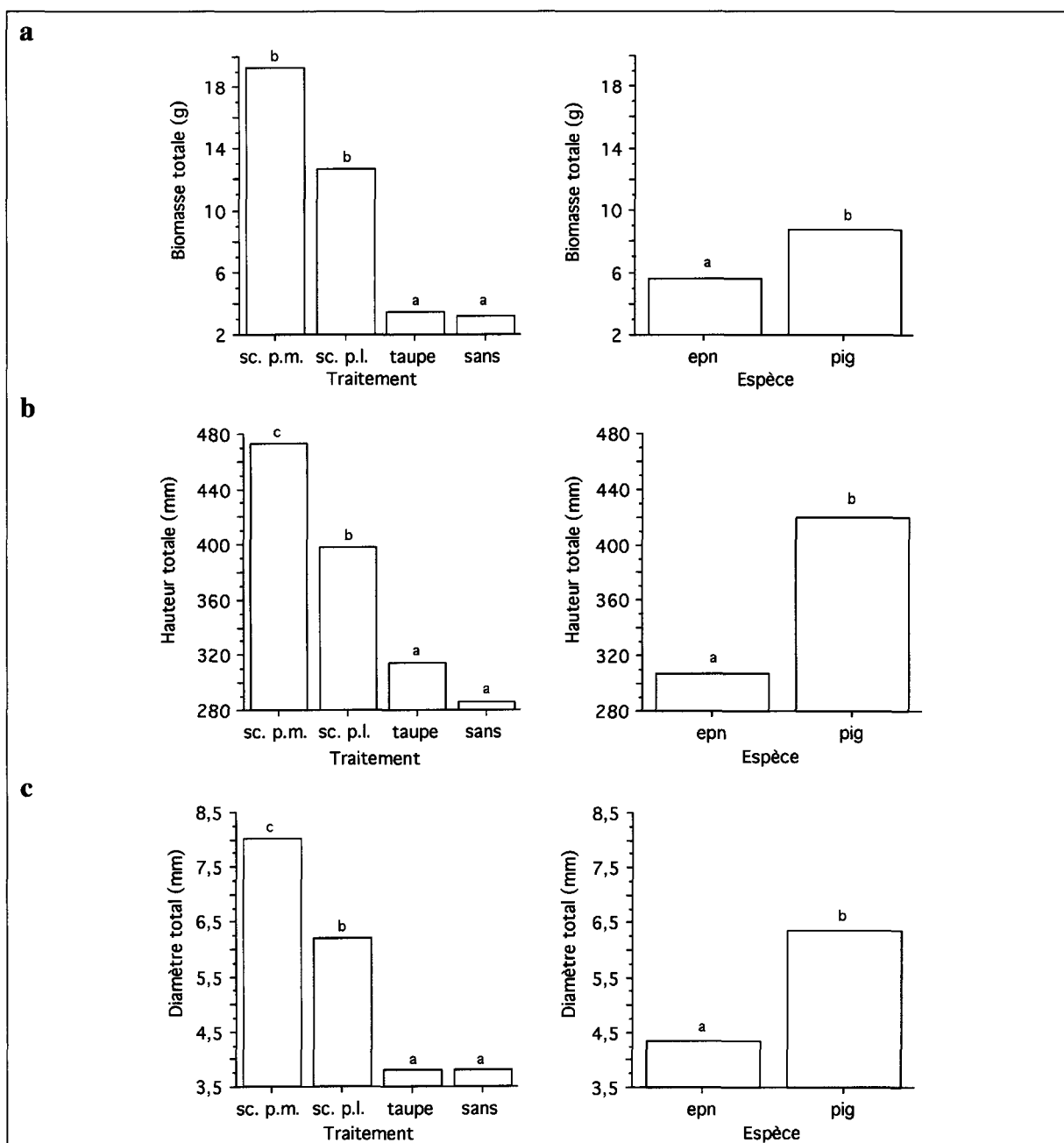


Figure 2. Effet des traitements et des espèces sur la variable de biomasse totale (a), de hauteur totale (b) et de diamètre de la tige (c) des plants récoltés en septembre 2002. Chaque colonne représente la moyenne obtenue pour les cinq blocs (n=20 pour les traitements scarifié p.l. et taupe, n=16 pour les traitements sans préparation et scarifié p.m., n= 38 pour le pin gris et n=34 pour l'épinette noire). Les lettres au-dessus des colonnes indiquent les différences révélées par le test Fisher PLSD. Abréviations : sc. p.m = scarifié dans une pessière à mousses normalement productive, sc. p.l. = scarifié dans une pessière à lichens, taupe = taupage dans une pessière à lichens, sans = sans traitement dans une pessière à lichens, epn = épinette noire et pig = pin gris.

Variables physiologiques

Aucun effet de traitement de préparation de terrain n'est observé pour le Ψ_x , les échantillons mesurés ayant un potentiel hydrique moyen de $-0,5$ Mpa (tableau 2). Par contre, un effet de date d'échantillonnage est présent, principalement lors de l'échantillonnage du mois d'août. L'interaction espèce*traitement est significative pour la variable de g_{ve} (tableau 2) les valeurs de g_{ve} étant différentes significativement dans le temps. Les valeurs de g_{ve} sont significativement plus faibles lors du premier échantillonnage comparativement aux trois autres échantillonnages.

Tableau 3. Résumé de l'analyse de variance (valeurs de P et moyennes du carré des écarts des erreurs expérimentales et d'échantillonnage) sur le potentiel hydrique pré-aube du xylème (Ψ_x) et la conductance stomatique à vapeur saturante (g_{ve}) mesurées lors de trois échantillonnages (9 juin, 22 juillet et 8 août 2002) pour le potentiel hydrique pré-aube et de quatre échantillonnages (9 juin, 22 juillet, 8 août et 10 septembre 2002) pour la conductance stomatique. Les traitements significatifs sont indiqués en caractères gras.

Source de variation	Ψ_x		g_{ve}	
	dl		dl	
Bloc (B)	4	0,9888	4	0,0371
Traitement (T)	3	0,0980	3	0,4459
Erreur expérimentale	11	0,0586	11	0,6342
Espèce (E)	1	0,0221	1	0,0878
E*T	3	0,4053	3	0,0099
Erreur expérimentale	13	0,0268	13	0,2871
Date (D)	2	<0,001	3	<0,001
D*T	6	0,3954	9	0,66
D*E	2	0,2436	3	0,4195
D*T*E	6	0,8690	9	0,7193
Erreur d'échantillonnage	37	0,0345	83	0,8469

Aucune différence significative de g_{ve} n'a été observée chez l'épinette noire entre les différents traitements de préparation de terrain ($0,0395 \pm 0,0029 \text{ mol m}^{-2} \text{ sec}^{-1}$) (figure 3). Pour le pin gris, notons des différences significatives entre les traitements sans préparation et scarifié p.l., ceux du traitement scarifié p.l. ayant une g_{ve} moyenne supérieure de 117 %. Ceux du traitement scarifié p.m. ayant des valeurs moyenne supérieures de 101 % comparativement au traitement sans préparation et des différences entre le traitement taupe et scarifié p.l. ceux du traitement scarifié p.l. ayant une g_{ve} moyenne supérieur de 70%. Par contre, l'analyse révèle aucune différence entre les deux traitement de scarifiage, entre le traitement sans préparation et taupe et entre le traitement taupe et scarifié p.m.

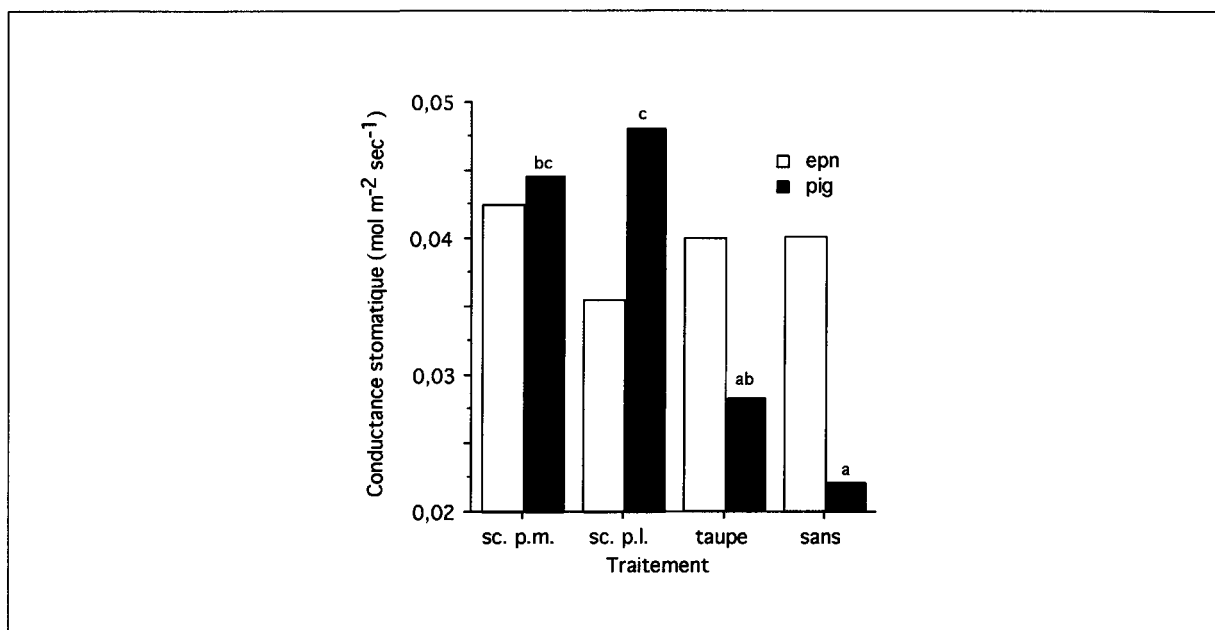


Figure 3. Valeurs moyennes de conductance stomatique des différents traitements de préparation de terrain pour l'épinette noire et le pin gris pour l'été 2002. Le traitement scarifié p.m. représente le traitement scarifié dans une pessière à mousses tandis que les trois autres traitements sont situés dans une pessière à lichens. Les lettres au-dessus des colonnes indiquent les différences révélées lors du test *a posteriori* Fisher PLSD. Voir la figure 2 pour la correspondance des abréviations.

Variables édaphiques

Aucune différence n'a été observée pour θ_v tout au long de la période expérimentale (tableau 3). La moyenne des observations recueillies pour la période d'étude était de $59,5 \pm 12,2 \%$.

L'analyse de variance effectuée sur les données de Ψ_s obtenues à l'aide du modèle établi (figure 1) ne révèle aucune différence entre les différents facteurs pour la période étudiée (tableau 3). La moyenne obtenue de Ψ_s est de $-0,445 \pm 0,281$ Mpa.

Tableau 4. Résumé de l'analyse de variance (valeurs de P et moyennes du carré des écarts des erreurs expérimentales et d'échantillonnage) du contenu volumétrique d'eau du sol (θ_v) et du potentiel hydrique du sol (Ψ_s) mesurés lors de quatre échantillonnages lors de l'été 2002 (9 juin, 22 juillet, 8 août et 10 septembre). Le Ψ_s a été estimé à l'aide d'un modèle de régression (figure 1).

Source de variation	dl	θ_v	Ψ_s
Bloc (B)	4	0,746	0,6314
Traitement (T)	3	0,1198	0,081
Erreur expérimentale	11	642,7426	0,1988
Espèce (E)	1	0,1957	0,1865
E*T	3	0,7965	0,873
Erreur expérimentale	13	616,4893	0,2028
Date (D)	3	0,0916	0,1911
D*T	9	0,6763	0,6804
D*E	3	0,8015	0,4289
D*T*E	9	0,9034	0,3452
Erreur expérimentale	76	290,8802	0,5544
Erreur d'échantillonnage	94	148,592	0,0367

Régression

La relation entre le Ψ_s et g_{ve} pour le pin gris échantillonné au mois de septembre 2002 montre que les plants qui ont les valeurs de g_{ve} les plus grandes (scarifié p.l. par exemple) sont aussi ceux où les valeurs de Ψ_s sont les plus faibles (figure 5)

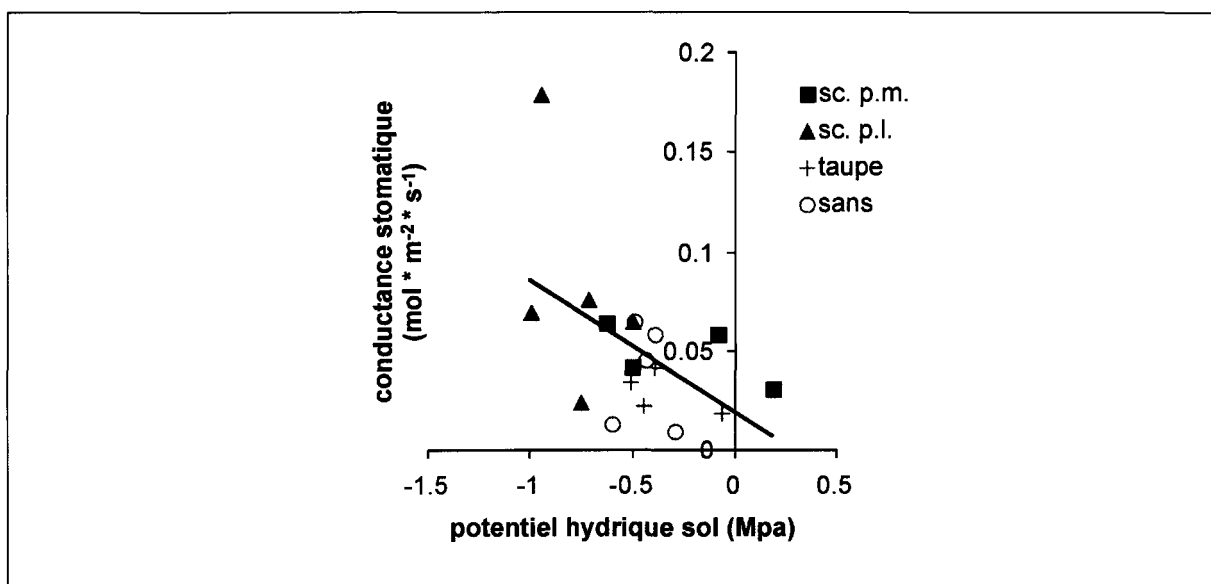


Figure 4 : Relation entre la conductance stomatique à lumière saturante et le potentiel hydrique du sol pour le pin gris échantillonnés en septembre 2002. L'équation de la relation : $y = -0,0665x + 0,0192$, $R^2 = 0,2654$, $P = 0,0201$ et $n = 20$. Voir en figure 2 pour les abréviations des traitements

CHAPITRE 4

DISCUSSION

Pessières noires à lichens scarifiées vs pessières noires à mousses scarifiées

Le présent travail de recherche vise tout d'abord à comparer la croissance et les fonctions hydriques de plants de conifères (épinette noire et pin gris) croissant dans des pessières noires à lichens scarifiées et des pessières noires à mousses scarifiées de la forêt boréale commerciale. L'analyse des résultats permet de faire deux constatations importantes. Globalement, la croissance des plants d'épinette noire ou de pin gris dans les pessières noires à lichens, malgré des valeurs significativement inférieures de hauteur et de diamètre, se compare à celle des plants prélevés dans les pessières noires à mousses lorsque le scarifiage est employé comme préparation de terrain. Cette étude a aussi permis de conclure que les conditions hydriques (Ψ_s et θ_v) des deux milieux ne diffèrent pas entre eux et que les fonctions hydriques des plants (Ψ_x et g_{ve}) ne permettent pas d'expliquer la croissance de ceux-ci trois ans après la plantation. Les valeurs mesurées de Ψ_s et θ_v , en plus des variables physiologiques (Ψ_x et g_{ve}) mesurées sur les plants, démontrent que les pessières noires à lichens ne sont pas des milieux qui créent des conditions plus asséchantes que les pessières noires à mousses normalement productives, du moins pour la saison de croissance 2002. De plus, les résultats indiquent que le scarifiage n'entraîne pas d'assèchements des pessières noires à lichens et ne mène donc pas à un stress hydrique des plants. Des études réalisées dans des milieux différents de cette étude ont démontré les effets positifs du scarifiage sur les fonctions hydriques (Örlander 1986, Boucher et al.

1998). Par contre, aucune autre étude auparavant n'avait porté sur cet aspect dans ces milieux réputés secs que sont les pessières noires à lichens.

La croissance mesurée est tout de même significativement supérieure dans les pessières noires à mousses lorsque l'on analyse strictement les variables de hauteur et de diamètre alors que la variable de biomasse sèche totale ne montre aucune différence significative. La croissance cumulative, supérieure après trois ans, pourrait s'expliquer en bonne partie du fait que les deux milieux étudiés n'ont pas subi le même degré de perturbation avant plantation. En effet, les pessières noires à mousses à l'étude ont subi une récolte (CPRS) avant d'être scarifiées, alors que les pessières noires à lichens n'ont subi que le scarifiage. Ce double passage de la machinerie (récolte et scarifiage) dans les pessières noires à mousses peut avoir eu un effet positif sur l'établissement et la croissance des plants (Örlander et al. 1998). Girard (2004) a d'ailleurs démontré que l'effet de la végétation compétitive résiduelle était inférieur dans les pessières noires à mousses, en plus de démontrer un effet positif du scarifiage sur la température du sol. Ces deux facteurs, reconnus pour améliorer les fonctions racinaires des plants expliqueraient donc la prise d'éléments nutritifs supérieure des plants dans les pessières noires à mousses (Bassman 1989, Grossnickle 2000, Girard 2004).

Effets des traitements de préparation de terrain dans les pessières noires à lichens

L'étude visait aussi à mesurer l'impact de deux types de préparations de terrain (scarifiage et taupe) effectués dans les pessières noires à lichens sur la croissance et les fonctions hydriques des deux espèces conifériennes dominant la forêt boréale. L'analyse des résultats indique que la croissance des deux espèces à l'étude, après trois ans, est significativement plus élevée dans les traitements scarifiés que dans les traitements de taupe et sans préparation. Par contre, les résultats des conditions hydriques de l'épinette noire révèlent que les différents traitements (scarifié p.l., taupe et sans préparation) ne diffèrent pas d'un point de vue hydrique. Les résultats montrent aussi la similitude des fonctions hydriques (Ψ_x et g_{ve}) des plants entre les différents traitements. L'épinette noire possède un mécanisme de rétroaction négative dans lequel g_{ve} diminue avec l'augmentation de déficit en eau de la plante (Sherrif 1977, Grossnickle et Blake 1986, Lamhamedi et Bernier 1994). Ce mécanisme de rétroaction pourrait expliquer la similitude des mesures de g_{ve} entre les traitements. Les fonctions hydriques des plants d'épinette noire n'expliquent donc pas les différences de croissance obtenues entre les différents traitements.

L'absence de réponse physiologique des plants d'épinette noire face aux traitements de préparation de terrain fait contraste à la réponse d'autres espèces face au scarifiage comme chez le pin blanc (*Pinus strobus* L.) où il a causé une augmentation significative du potentiel hydrique pré-aube des gaules (Boucher et al. 1998). Une autre étude a décelé un effet positif de différents types de scarifiage sur le potentiel hydrique pré-aube des plants

de pin gris en phase d'établissement (Grossnickle et Heikurinen 1989). La réduction de végétation de compétition causée par le scarifiage, provoquant souvent une hausse de la demande transpiratoire des plants, ne s'est pas produite chez l'épinette noire, contrairement à d'autres espèces comme le sapin blanc (*Abies concolor* (Gord. & Glend.), le pin ponderosa (*Pinus ponderosa* Dougl. Ex P. & C. Lawson) et le pin sucré [*Pinus lambertiana* Dougl. (Strobus L. Mold.)] (Lanini et Radosevich 1986). D'autre part, une étude semblable réalisée avec des plants d'épinette noire de fortes dimensions a aussi démontré que le scarifiage n'avait pas d'effets significatifs sur le potentiel hydrique pré-aube durant les trois premières années suivant la plantation (Thiffault 2003). Cette étude a aussi démontré, pour des milieux semblables aux nôtres, l'absence d'effets significatifs du kalmia à feuilles étroites, en tant que principale végétation compétitive, sur les fonctions hydriques de l'épinette noire. En plus de ne pas avoir d'effet significatif sur les fonctions hydriques de l'épinette noire, la végétation compétitive présente sur les sites de notre étude diminuait faiblement l'éclairement disponible alors que celui-ci passait de 78 à 88 % de plein éclairement après scarifiage (Girard 2004). Ces résultats, combinées aux variables édaphiques de ce travail, pourraient donc expliquer l'absence de réponse physiologique des plants d'épinette noire face aux traitements de préparation de terrain dans les pessières noires à lichens.

L'absence de liens entre les fonctions hydriques et la croissance de l'épinette noire peut s'expliquer par le fait que cette espèce, tout comme les espèces tolérantes à l'ombre, n'a pas une très grande plasticité physiologique face aux conditions environnementales

d'un point de vue hydrique, et réagit de la même façon dans des milieux où les conditions hydriques diffèrent. Zine El Abidine et al. (1995) ont noté de très faibles différences de fonctions hydriques entre les épinettes noires d'un an provenant de milieux naturels très contrastants, soit des milieux tourbeux et des milieux secs (avec bon drainage) en regard de leur réponse face aux changements journaliers ou saisonniers des conditions environnementales. Les fonctions hydriques des plants d'épinette noire, pour cette étude, ne reflètent donc pas la croissance obtenue entre les différents traitements.

L'analyse des variables physiologiques pour le pin gris révèle que la g_{ve} dans les traitements scarifiés est significativement plus grande que dans les deux autres traitements et ce, malgré la similitude des valeurs de Ψ_x , de Ψ_s et du θ_v semblables entre les traitements. De plus, la relation obtenue entre la g_{ve} et le Ψ_s montre que les plants ayant la plus grande activité physiologique sont aussi ceux dont les conditions hydriques du sol sont les plus défavorables. Ces résultats indiquent donc que la g_{ve} obtenue chez le pin gris traduit l'activité physiologique des plants plutôt que de refléter les conditions hydriques, conditions semblables pour chacun des traitements. Malgré de plus grandes pertes évaporatoires journalières dans les traitements scarifiés, les plants de pin gris réussissent tout de même à récupérer, au cours de la nuit, l'eau perdue, comme en font foi les valeurs de Ψ_x .

La g_{ve} supérieure dans les traitements scarifiés serait le reflet d'une croissance supérieure des pins gris observés dans ce type de préparation de terrain depuis trois ans.

Une plus grande croissance générale et la croissance racinaire supérieure qui s'ensuit lors de l'établissement des semis, améliore l'absorption de l'eau par i) l'augmentation de la surface des racines non-subérisées perméables, ii) par l'accès à un plus grand volume de sol, et iii) par un meilleur contact sol-racine causé par la croissance racinaire (Burdett 1990). De plus, un développement racinaire accru permet une réduction de la résistance au mouvement de l'eau dans le continuum sol-plante-atmosphère (Grossnickle et Blake 1986). Des recherches précédentes ont démontré que les racines du pin gris ont une croissance plus rapide que celles de l'épinette noire lors de l'établissement des semis naturels, leur donnant ainsi un plus grand potentiel pour l'exploration de nouveaux volumes de sol (Thomas et Wein 1985). Finalement, des résultats en plantation indiquent que les plants de pin gris ont une croissance racinaire plus grande que celle de l'épinette noire (Grossnickle et Blake 1986, Wood 1990)

Une partie de l'impact bénéfique du scarifiage sur les deux espèces pourrait être lié à la modification du régime thermique du sol. La radiation solaire a une influence majeure sur la température du sol minéral suite à l'enlèvement de la végétation de compétition et de la matière organique (Bassman 1989, Stathers et Spittlehouse 1990). L'augmentation de la température du sol a des effets directs et indirects sur les fonctions hydriques des plantes. Chez certaines espèces comme le pin blanc, l'augmentation de la température du sol a eu pour effet d'augmenter la g_{ve} (Boucher et al. 2001). Une hausse de la température du sol est reconnue pour avoir des effets bénéfiques sur l'absorption d'eau en diminuant sa viscosité et en augmentant la conductivité hydraulique (Kramer 1983, Bowen 1991, Dodd

et al. 2000, Boucher et al. 2001). De plus, elle accroît la perméabilité et l'activité métabolique des racines (Kramer 1983, Bowen 1991, Lyr et Garbe 1995, Boucher et al. 2001).

Il semble que le taupage ne retire pas assez de matière organique et de végétation compétitive (principalement des lichens) pour créer des microsites procurant des conditions de croissance favorables pour les plants. Le taupage ne s'avère pas un traitement avantageux pour la croissance des plants, et ce malgré un taux de survie comparable au traitement scarifié tel que spécifié par les résultats tirés de Côté et al. (2003) (figure 5). D'un point de vue opérationnel, le taupage coûte deux fois plus cher que le scarifiage et la qualité des microsites produits est inconstante (Blanchet M., MRNFP comm. pers.).

Ce projet de recherche cadrerait dans un objectif plus global visant à remettre en production les pessières noires à lichens de la forêt boréale commerciale. Les résultats confirment l'hypothèse de départ à l'exception des différences de croissance en hauteur et en diamètre des plants observés entre les pessières noires à mousses scarifiés et les pessières noires à lichens scarifiées. Le niveau de perturbation des pessières noire à lichens n'était peut être pas suffisant et pourrait expliquer les croissances inférieures des plants comparativement à ceux des pessières noires à mousses. Malgré la croissance plus rapide du pin gris face à l'épinette noire, l'étude a permis de démontrer que le reboisement de ces milieux avec l'épinette noire est envisageable.

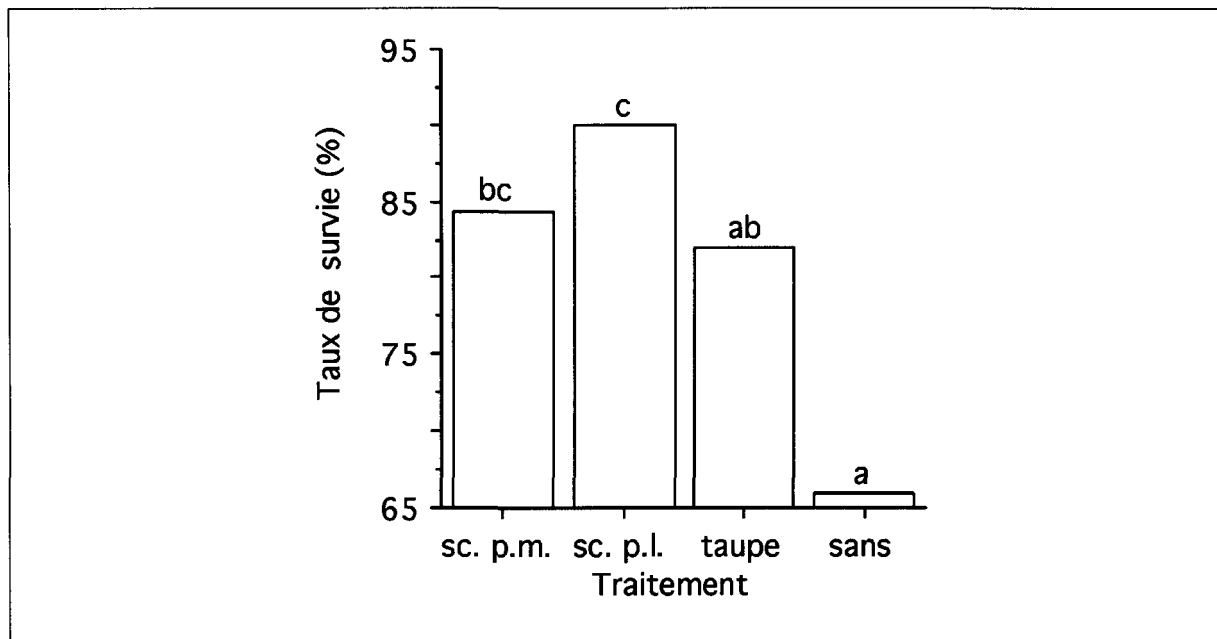


Figure 5 : Valeurs moyennes du taux de survie (%) des plants d'épinette noire et de pin gris des différents traitements de préparation de terrain pour l'été 2002. Le traitement scarifié p.m. représente le traitement scarifié dans une pessière à mousses tandis que les trois autres traitements sont situés dans une pessière à lichens. Les lettres au-dessus des colonnes indiquent les différences révélées lors du test *a posteriori* Fisher PLSD. $P < 0,001$. Voir la figure 2 pour la correspondance des abréviations.

Des recherches futures concernant d'autres aspects comme l'impact de végétation compétitive sur la croissance des conifères pourraient être étudiés. Mentionnons, par exemple, l'impact de cette végétation sur la colonisation des mycorhizes des plants de conifères ou son impact par la libération de substances allélopathiques (Mallik et Zhu 1994, Yamasaki et al. 2002). Finalement, il serait pertinent de refaire cette étude avec des milieux ayant subi le même nombre de perturbations avant la plantation pour permettre une comparaison plus directe entre les pessières noires à mousses et les pessières noires à lichens quant à la réponse des plants.

CHAPITRE 5

CONCLUSION

Le premier objectif de ce projet de recherche était de comparer la réponse des plants d'épinette noire et de pin gris entre des pessières noires à mousses scarifiées et des pessières noires à lichens scarifiées. L'étude a permis de constater une similitude entre les deux milieux d'un point de vue hydrique, tant au niveau du microsite qu'au niveau du plant. La croissance cumulative des plants après trois ans, quoique significativement différente pour les variables de hauteur et de diamètre, s'est avérée comparable entre les deux milieux étudiés lorsque le scarifiage fut employé. Ces résultats ont permis de constater que, d'un point de vue physiologique, les plants ont une réponse semblable et que les fonctions hydriques ne peuvent expliquer les différences obtenues entre les deux milieux. Ces différences de hauteur et de diamètre après trois ans, entre les deux milieux à l'étude, n'impliquent pas nécessairement un potentiel de croissance supérieur des pessières noires à mousses étudiés, ces milieux ayant subi un plus grand nombre de perturbations entropiques subies comparativement aux pessières noires à lichens adjacentes, ce qui a eu un effet sur la prise des nutriments et indirectement sur la croissance des plants après trois ans.

La comparaison entre les différents types de préparation de terrain effectués dans la pessière noire à lichens souligne l'impact positif du scarifiage sur la croissance des deux espèces étudiées, les variables de croissance étant supérieures dans ces traitements. Pour l'épinette noire, les résultats des fonctions hydriques des plants, semblables pour tous les

traitements, ne permettent pas d'expliquer la croissance supérieure des plants des traitements scarifiés. Dans le cas du pin gris, les valeurs supérieures de g_{ve} dans les traitements scarifiés ne seraient qu'un reflet de la meilleure croissance des plants dans ces traitements. Donc, l'effet bénéfique du scarifiage sur la croissance des plants s'expliquerait par d'autres facteurs que les fonctions hydriques du plant et des conditions hydriques du microsite.

CHAPITRE 6

RÉFÉRENCES

- Aranda, I., L. Gil, J.A. Pardos. 2002. Physiological responses of *Fagus sylvatica* L. seedlings under *Pinus sylvestris* L. and *Quercus pyrenaica* Wild. Overstories. For. Ecol. Manag. 162: 153-164.
- Bassman, J.H. 1989. Influence of two site preparation treatments on ecophysiology of planted *Picea engelmannii* X *glauca* seedlings. Can. J. For. Res. 19:1359-1370.
- Bauce, E., M. Crépin et N. Carisey. 1994. Spruce budworm growth, development and food utilization on young and old balsam fir trees. Oecologia 97:499-507.
- Bergeron, J-F. 1996. Manuel de foresterie. Les presses de l'Université Laval, Québec. 1428 p.
- Bernier P. Y. 1993. Comparing natural and planted black spruce seedlings. I. Water relations and growth. Can. J. For. Res. 23:2424-2434.
- Boucher, J.F., S. Wetzel et A.D. Munson. 1998. Leaf level response of planted eastern white pine (*Pinus strobus* L.) seven years after intensive silvicultural treatments. For. Ecol. Manag. 107:291-307.
- Boucher, J.-F., P.Y. Bernier et A.D. Munson. 2001. Radiation and soil temperature interactions on the growth and physiology of eastern white pine (*Pinus strobus* L.) seedlings. Plant Soil. 236:165-174.
- Bowden, R.D. 1991. Inputs, outputs, and accumulation of nitrogen in an early successional moss (*Polytrichum*) ecosystem. Ecol. Monogr. 61:207-223.

- Bowen, G.D. 1991. Soil temperature, root growth, and plant function. *Dans Plant roots: The hidden half*. Eds. Y. Waisel, A. Eshel, A. et U. Kafkafi. Marcel Dekker, Inc., New-York (USA), pp. 309-330
- Brand, D.G. 1990. Growth analysis of responses by planted white pine and white spruce to changes in soil temperature, fertility, and brush competition. *For. Ecol. Manage.* 30:125-138.
- Brand, D.G. et P.S. Janas. 1987. Growth and acclimation of planted white pine and white spruce seedlings in response to environmental conditions. *Can. J. For. Res.* 18:320-329.
- Burdett, A.N. 1990. Physiological processes in plantation establishment and the development of specifications for forest planting stock. *Can. J. For. Res.* 20:415-427.
- Côté, D., J. Allaire, D. Walsh et D. Lord. 2003. Remise en production des pessières noires à lichens. Affiche présentée au Carrefour de la Recherche Forestière. MRNFP.
- Dang Q.L., H.A. Margolis, M.R. Coyea, S. Milailou et G.J. Collatz. 1996. Regulation of branch level gas exchange of boreal trees: roles of shoot water potential and vapor pressure difference. *Tree physiol.* 17:521-535.
- Devore, J. et R. Peck. 1994. Introductory statistics. West Publishing Company. St. Paul, MN, USA. 881p.
- Dodd, I.C., J. He, C.G.N Turnbull, S.K. Lee et C. Critchley. 2000. The influence of supra-optimal root-zone temperatures on growth and stomatal conductance in *Capsicum annuum* L. *J Exp. Bot.* 51:239-248.

- Ellsworth, D. S., et P.B. Reich. 1992. Water relations and gas exchange of *Acer saccharum* seedlings in contrasting natural light and water regimes. *Tree physiol.* 10:1-10.
- Environnement Canada. 2003. Normales et moyennes climatiques, Chibougamau-Chapais, an 2002. Service de l'environnement atmosphérique, Environnement Canada.
- Fleming, R.L., T.A. Black et N.R. Eldridge. 1994. Effects of site preparation on root zone soil water regimes in high-elevation forest clearcuts. *For. Ecol. Manag.* 68:173-188.
- Gagnon, R., H. Morin, D. Lord, C. Krause, S. Cloutier, G. Savard et J. Potvin. 1999. Nouvelles connaissances sur la dynamique naturelle des forêts d'épinette noire au Québec. L'aubelle. Jan-Fev-Mars :10-14.
- Garkoti, S.C., D.B. Zobel et S.P. Singh. 2003. Variation in drought response of sal (*shorea robusta*) seedlings. *Tree Physiol.* 23:1021-1030.
- Girard, F. 2004. Interaction compétitive entre des plants d'épinette noire, des lichens et des éricacées dans les pessières à lichens trois ans après traitements de préparation de terrain. Mémoire de maîtrise. UQAC. 66p.
- Gouvernement du Québec. 2003. Règlement sur les normes d'intervention dans les forêts du domaine de l'état. Loi sur les forêts. Les publications du Québec. Gouvernement du Québec (Canada) : 1-143.
- Grossnickle, S.C. 1988a. Planting stress in newly planted jack pine and white spruce. 2. Changes in tissue water potential components. *Tree Physiol.* 4:85-97.
- Grossnickle, S.C. 1988b. Planting stress in newly planted jack pine and white spruce. 1. Factors influencing water uptake. *Tree Physiol.* 4:71-83.

- Grossnickle, S.C. et T.J. Blake. 1986. Environmental and physiological control of needle conductance for bare-root black spruce, white spruce, and jack pine seedlings on boreal cutover sites. *Can. J. Bot.* 64:943-949.
- Grossnickle, S.C. et J. Heikurinen. 1989. Site preparation: water relations and growth of newly planted jack pine and white spruce. *New For.* 3:99-123.
- Grossnickle, S.C. 2000. Ecophysiology of Northern Spruce species: The performance of planted seedlings. NRC Research press. Ottawa. 409 p.
- Hinckley, T.M., R.G. Aslin, R.R. Aubuchon, C.L. Metcalf et J.E. Roberts. 1978. Leaf conductance and photosynthesis in four species of the Oak-history forest type. *For. Sci.* 24:73-85.
- Jarvis, P.G. 1980. Stomatal response to water stress in conifers. *Dans* Adaptation of plants to water and high temperature stress. Eds. N.C. Turner et P.J. Kramer. New York, pp. 105-122
- Kershaw, K.A. et W.R. Rouse. 1971. Studies on lichen-deminated systems. II The growth pattern of *Cladonia alpestris* and *Cladonia rangiferina*. *Can. J. Bot.* 49 :1401-1410.
- Klute, A .1986. Water Retention: Laboratory methods. *Dans* Methods of soil analysis Part 1: physical and mineralogicals methods. Eds. A. Klute. American society of agronomy . Wisconsin USA, pp. 635-662
- Kramer, P.J. 1983. Water relations of plants. Academic Press, Inc., New-York (U.S.A.). 489 p.

- Lamhamedi, M.S. et P.Y. Bernier. 1994. Ecophysiology and field performance of black spruce (*Picea mariana*): a review. *Ann. Sci. For.* 51:529-551.
- Lamhamedi, M.S., P.Y. Bernier, C. Hébert et R. Jobidon. 1998. Physiological and growth responses of three sizes of containerized *Picea mariana* seedlings outplanted with and without vegetation control. *For. Ecol. Manag.* 110:13-23.
- Lanini W.T. et S.R. Radosevich. 1986. Response of three conifer species to site preparation and shrub control. *For. Sci.* 32:61-77.
- Lyr, H. et V. Garbe. 1995. Influence of root temperature on growth of *Pinus sylvestris*, *Fagus sylvatica*, *Tilia cordata* and *Quercus robur*. *Trees* 9:220-223.
- Mallik, A.U. 1987. Allelopathic potential of *Kalmia angustifolia* to black spruce (*Picea mariana*). *For. Ecol. Manag.* 20:43-51.
- Mallik A.U. et H. Zhu. 1994. Interactions between *Kalmia* and black spruce: isolation and identification of allelopathic compounds. *J. Chem. Ecol.* 20:407-421.
- Margolis A. H. et D. G. Brand. 1990. An ecophysiological basis for understanding plantation establishment. *Can. J. For. Res.* 20:375-390.
- Mediavilla S. et A. Escudero. 2004. Stomatal responses to drought of mature trees and seedlings of two co-occurring Mediterranean oaks. *For. Ecol. Manag.* 187:281-294.
- Morneau C. et S. Payette. 1989. Postfire lichen-spruce woodland recovery at the limit of the boreal forest in northern Quebec. *Can. J. Bot.* 67 : 2770-2782.

- Munson, A. D., H.A. Margolis et D.G. Brand. 1993. Intensive silvicultural treatment: impacts on soil fertility and planted conifer response. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57 : 246-255.
- Nambiar, E.K.S., G.D. Bowen et R. Sands. 1979. Root regeneration and plant water status of *Pinus radiata* D. Don seedlings transplanted to different soil temperatures. *J. Exp. Bot.* 30:1119-1131.
- Nelson, D.W. et L.E. Sommers. 1983. Total carbon, organic carbon and organic matter. *Dans Methods of soil analysis, part3-Chemical methods (second edition)*. Eds. A.L. Page. R.H. Miller et D.R. Keeney. American society of agronomy and soil science society of America, Wisconsin, pp. 961-1001
- Örlander, G. 1986. Effect of planting and scarification on the water relations in planted seedlings of Scots pine. *Studia For. Suec.* 173: 1-17,
- Örlander, G., G. Hallsby, P. Gemmel et C. Wilhelmsson. 1998. Inverting improves establishment of *Pinus contorta* and *Picea abies*-10-year results from a site preparation trial in Northern Sweden. *Scand. J. For. Res.* 13:160-168.
- Payette, S. 1992. Fire as a controlling process in the north American boreal forest. *Dans Systems analysis of the global boreal forest*. Eds. H.H. Shugart. R. Leemans. Et G.B. Bonan. Cambridge University Press, U.K., pp 44-169.
- Payette, S., N. Bhury, A. Delwaide et M. Simard. 2000. Origin of the lichen woodland at its southern range limit in eastern Canada: the catastrophic impact of insect defoliators and fire on the spruce-moss forest. *Can. J. For. Res.* 30:288-305.
- Perry, M.A., R.J. Mitchell, B.R. Zutter, G.R. Glover et D.H. Gjerstad. 1994. Seasonal variation in competitive effect on water stress and pine responses. *Can. J. For. Res.* 24:1440-1449.

- Poorter, H. et Lewis, C. 1986. Testing differences in relative growth rate: A method avoiding curve fitting and pairing. *Physiol. Plant.* 67:223-226.
- Prévost, M. 1992. Effets du scarifiage sur les propriétés du sol, la croissance des semis et la compétition: revue des connaissances actuelles et perspectives de recherches au Québec. *Ann. Sci. For.* 49:277-296.
- Prévost, M. 1996. Effet du scarifiage sur les propriétés du sol et l'ensemencement naturel dans une pessière noire à mousses de la forêt boréale québécoise. *Can. J. For. Res.* 26:72-86.
- Riverin, S. et R. Gagnon. 1996. Dynamique de la régénération d'une pessière à lichen dans la zone de la pessière noire à mousse, nord du Saguenay-Lac-Saint-Jean (Québec). *Can. J. For. Res.* 26:1504-1509.
- Rundel, P.W. et W.M. Jarrell 1991. Water in the environment. *Dans* Plant physiological ecology: Field methods and instrumentation. Eds. R.W. Pearcy, J.R. Ehleringer. J.R. H.A. Mooney et P.W. Rundel. Chapman and Hall . London, pp. 15-29.
- Sands, R. et E.K.S. Nambiar. 1984 Water relations of *Pinus radiata* in competition with weeds. *Can. J. For. Res.* 14:233-237.
- Saucier, J-P., J-P. Berger, H. d'Avignon et P. Racine. 1994. Le point d'observation écologique. Ministère des Ressources Naturelles. Québec, 117 p.
- Schulze, E.D. 1991. Water and nutrient interactions with plant water stress. *Dans* Response of plants to multiple stresses. Eds. H.A. Mooney. W.E. Winner. Et E.J. Pell. Academic Press inc., New York, pp. 89-100.

- Sheriff, D.W. 1977. The effect of humidity on water uptake by and viscous flow resistance of excised leaves of a number of species: physiological and anatomical observations. *J. Exp. Bot.* 28:1399-1407.
- Stathers, R.J. et D.L. Spittlehouse 1990. Forest soil temperature manual. B.C. Min. For., Victoria B.C., FRDA report. 130. 33 p.
- Steel, R.G.D. et Torrie, J.H. 1980. Principles and procedures of statistics: a biometrical approach. McGraw-Hill Publishing Company, New-York, 633p.
- Steijlen, I., M.-C. Nilsson et O. Zackrisson. 1995. Seed regeneration of scots pine in boreal forest stands dominated by lichen and feather moss. *Can. J. For. Res.* 25:713-723.
- Stewart, J.D. A.Z.E. Abidine et P.Y. Bernier. 1995. Stomatal and mesophyll limitations of photosynthesis in black spruce seedlings during multiple cycles of drought. *Tree Physiol.* 15:57-64.
- St-Pierre, H. R. Gagnon et P. Bellefleur. 1991. Distribution spatiale de la régénération après feu de l'épinette noire (*Picea mariana*) et du pin gris (*Pinus banksiana*) dans la forêt boréale, Réserve faunique Ashuapmushuan, Québec. *Can. J. Bot.* 69:717-721.
- Sutton, R.F. 1991. Mounding site preparation for jack pine and black spruce in boreal Ontario: five-year results. COFRDA REPORT. 3311.24 p.
- Thiffault, N. 2003. L'établissement de plantation de conifères en relation avec le scarifiage et la végétation de compétition. Thèse de doctorat. Université Laval, Québec. 174 p.

- Thomas, P.A. et R.W. Wein. 1985. Water availability and the comparative emergence of four conifer species. *Can. J. Bot.* 63:1740-1746.
- Tremblay, P.S. 1996. Manuel de foresterie. Les presses de l'Université Laval, Québec. 1428 p.
- Viereck, L.A. et Johnston, W.F. 1990. *Picea mariana* (Mill.) B.S.P. Black spruce. Dans *Silvics of North America*. Vol. 1, Conifers. Agriculture Handbook 654. Eds. R.M. Burns et B. Honkala. Forest Service, U. S. Dept. Agric., Washington DC, pp 227-237.
- Wilkinson, S. et W.J. Davies. 2002. ABA-based chemical signaling: the co-ordination of responses to stress in plants. *Plant Cell Env.* 25:195-210.
- Wood, J.E. 1990. Black spruce and jack pine plantation performance in boreal Ontario: 10-year results. *Northern Jour. Appl. For.* 7:175-179.
- Yamasaki, S.H., J.M. Fyles et B.D. Titus. 2002. Interaction among *Kalmia angustifolia*, soil characteristics, and the growth and nutrition of black spruce seedlings in two boreal Newfoundland plantations of contrasting fertility. *Can. J. For. Res.* 32: 2215-2224.
- Zar, J.H. 1999. Biostatistical analysis. 4th Edn. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey. 663p.
- Zine El Abidine, A., J.D. Stewart, P.Y. Bernier et A.P. Plamondon. 1995. Diurnal and seasonal variations in gas exchange and water relations of lowland and upland black spruce ecotypes. *Can. J. Bot.* 73:716-722.