

**EFFET DU MICROSITE SUR LA CROISSANCE DE L'ÉPINETTE NOIRE
PLANTÉE APRÈS SCARIFIAGE AU BRÄCKE OU AU TTS
– BILAN 22 ANS APRÈS LA PLANTATION**

**Par
Denis Walsh
Daniel Lord**



Consortium de
recherche sur la
forêt boréale commerciale

Octobre 2011

UQAC

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC
À CHICOUTIMI

Illustration de la couverture :

Photo fournie par Dick Johnsson, représentant de Sylvania Import Trading Inc.

Ce document est disponible en format PDF à l'adresse suivante : <http://dsf.uqac.ca/boreale/>

© Consortium de recherche sur la forêt boréale commerciale, 2011.

Le contenu de ce document peut être reproduit en autant que la source soit mentionnée.

Correspondance

Université du Québec à Chicoutimi

Partenaire du Consortium de recherche sur la forêt boréale commerciale

Département des Sciences fondamentales

a/s Daniel Lord

555, boul. de l'Université

Chicoutimi, Québec, G7H 2B1

Tél. : 418-545-5011, poste 5064; Télécopieur : 418-545-5012

Courrier électronique : Daniel_Lord@uqac.ca

TITRE :

EFFET DU MICROSITE SUR LA CROISSANCE DE L'ÉPINETTE NOIRE
PLANTÉE APRÈS SCARIFIAGE AU BRÄCKE OU AU TTS
– BILAN 22 ANS APRÈS LA PLANTATION

Par :

Denis Walsh, M. Sc., professionnel de recherche
Daniel Lord, PhD, professeur chercheur
Université du Québec à Chicoutimi
Département des Sciences fondamentales
555, boul. de l'Université
Chicoutimi, Québec, Canada, G7H 2B1

Collaborateur :

Jean-Pierre Girard
Agent de recherche et de planification socioéconomique
Responsable régional de la production de semences et de plants
Direction des opérations intégrées du Saguenay – Lac-St-Jean
Ministère des Ressources naturelles et de la Faune

Université du Québec à Chicoutimi
et
Consortium de recherche sur la forêt boréale commerciale

Octobre 2011

REMERCIEMENTS

Ce travail a été financé par le Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec, direction régionale du Saguenay-Lac-St-Jean. Les auteurs sont redevables en premier lieu à M. Jean-Pierre Girard du Ministère des Ressources naturelles et de la Faune (MRNF), région 02 qui a planifié le remesurage du site étudié et qui est à l'origine de ce projet. Nous adressons aussi des remerciements à Mme Audrey Murray, technicienne au Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec, région 02 qui a prise et compilée les données. Nous remercions aussi M. Pierre-Yves Plourde, professionnel de recherche à l'UQAC qui a réalisé le travail de dendrochronologie.

RÉSUMÉ

Cette étude compare après 22 ans de croissance le rendement d'une plantation d'épinette noire reboisée sur différents microsites formés par le passage soit d'un scarificateur Bräcke ou d'un scarificateur à disques TTS. Les deux sites sont localisés sur la même unité physiographique dans la pessière à mousse de l'ouest tout près de Chibougamau. Le dispositif n'a pas été construit à l'origine pour permettre les comparaisons statistiques entre les deux traitements de préparation de terrain étant donné l'absence de vraies répétitions; les comparaisons statistiques entre les microsites à l'intérieur de chaque site sont cependant valides. Les gains de croissance des plants du Bräcke par rapport à ceux du TTS sont donc donnés à titre indicatif. La hauteur, le diamètre et le volume de la tige des arbres reboisés sur le monticule formé par le Bräcke étaient significativement plus grands que ceux reboisés à l'épaulement ou dans le poquet. Nous n'avons pas observé de différences significatives entre les plants reboisés dans le fond ou l'épaulement formé par le scarificateur à disques. Après 22 ans en plantation, le gain en volume des plants sur le monticule était de 165% plus élevé comparativement aux plants reboisés après passage du scarificateur à disques TTS. Cette différence s'explique par une croissance radiale annuelle accélérée des plants sur le monticule à partir de la 4^{ième} année en plantation sur une période s'étendant sur 19 ans. Le volume marchand prédit par les équations des modèles de prédiction actuels serait supérieur de 60 m³/ha à 60 ans pour une plantation d'épinette noire réalisée sur des monticules comparativement à une préparation traditionnelle par un scarificateur à disques.

Mots-clés : plantation, épinette noire, picea-mariana, forêt boréale, scarification, scarificateur à disques, TTS, Bräcke, monticule, épaulement, IQS.

ABSTRACT

This study compares 22 years old black spruce stands planted on different microsites made by a Bräcke moulder or a disk trencher. The two sites are located on the same physiographic unit in the boreal forest near Chibougamau, northeastern Quebec. The experimental design was not planned for comparison between treatments since treatments were not replicated but comparisons between microsites inside each treatment are still valid. Increased yield of mounding treatment compared to the disk trenching treatment are given for information only. Spruce height, diameter and stem volume were significantly larger on Bräcke mound than for seedlings planted in the Bräcke patch or hinge position. Stem growth was not different for the seedlings planted in the furrow or the hinge position in the disk trenching treatment. After 22 years, stem volume of seedlings planted on the Bräcke mound was 165% higher than those in the disk trenching treatment. Annual radial growth of seedlings located on mound has increased faster than those on the disk trenching treatment after a delay of four years and this vigorous growth rate was maintained for at least 19 years. Stand commercial volume was estimated to be 60 m³/ha higher after 60 years for the mounding treatment compared to the more conventional disk trenching treatment.

Key words: plantation, black spruce, picea-mariana, boreal forest, mechanical site preparation, disk trenching, TTS, Bräcke, mound, hinge position, site index.

TABLES DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	iii
RÉSUMÉ.....	v
ABSTRACT.....	vii
TABLE DES MATIÈRES.....	ix
LISTE DES TABLEAUX.....	xi
LISTE DES FIGURES.....	xiii
INTRODUCTION.....	1
MATÉRIEL ET MÉTHODE.....	4
Localisation des sites.....	4
Mesures 2009.....	4
IQS et rendement prédit par les tables de rendement.....	5
Analyses statistiques.....	5
RÉSULTATS.....	5
DISCUSSION.....	7
RÉFÉRENCES.....	12
ANNEXE.....	15

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Analyse de variance de l'effet du microsite sur la hauteur, le DHP et le volume des tiges des épinettes noires plantées après une préparation de terrain au Bräcke ou au TTS.....	5
Tableau 2. Test de vraisemblance sur le nombre de défauts de tige des épinettes noires plantées dans le site Bräcke; 202 plants ont été évalués.....	7
Tableau 3. Calculs des différents paramètres dendrométriques de l'épinette noire prédits à partir des équations de Prégent <i>et al.</i> (1996) . L'IQS prédit par les équations est à 25 ans.....	7

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Vue transversale d'un sillon formé par un scarificateur à disques ainsi que les trois positions de plantation : fond du sillon, l'épaulement ainsi que le monticule. Tiré de Burton et al. (2000)	1
Figure 2. Coupes transversales d'un sillon réalisé par un scarificateur à disques en fonction de différents dépôts et drainages. Les chiffres indiquent les positions recommandées pour la plantation d'épinette noire ou de pin gris; lorsqu'elles sont barrées, ces positions ne sont pas recommandées. Tirée de Sutherland et Foreman (1995)	2
Figure 3. A-) Séquence montrant la formation d'un monticule par un scarificateur de type Bräcke. B-) Bräcke-monticule M36 (photo fournie par Dick Johnsson, représentant de Sylvania Import Trading Inc.).....	2
Figure 4. Positions de plantation recommandées sur des sites scarifiés par un Bräcke-monticule en fonction de différents dépôts-drainage. Tiré d' Orlander et al. (1990)	3
Figure 5. Coupes transversales des poquets réalisés par un Bräcke-monticule. Les chiffres indiquent les positions recommandées pour la plantation d'épinette noire ou de pin gris; lorsqu'elles sont barrées, ces positions ne sont pas recommandées. Tirée de Sutherland et Foreman (1995)	3
Figure 6. Localisation des plantations opérationnelles du MRNF implantées en 1987. Les chiffres suivis d'une lettre minuscule représentent les sous-domaines bioclimatiques d'après Saucier et al. (2009)	4
Figure 7. Localisation des microsites réalisés par le Bräcke-monticule et qui ont été comparés dans cette expérience: A-) fond du poquet (F); B-) épaulement (É); C-) monticule (M). Tiré de Plante (1987)	4
Figure 8. Effet du microsite sur la hauteur (A - B), le DHP (C - D) et le volume de la tige (E - F) des épinettes noires plantées après un scarifiage au Bräcke ou au TTS; F-) fond du sillon ou du poquet, É-) épaulement, M-) monticule. Moyenne \pm intervalle de confiance à P = 95%. Les moyennes suivies d'une lettre différente sont significativement différentes à P < 0,05.	6
Figure 9. Gains en hauteur, en DHP et en volume des épinettes noires plantées après un scarifiage au Bräcke-monticule par rapport à une plantation après un scarifiage au TTS; F-) fond du sillon ou du poquet, É-) épaulement, M-) monticule.....	7
Figure 10. Accroissement annuel radial. A-) comparaison entre les plants localisés sur l'épaulement (É) et le fond du sillon (F) formé par le TTS. B-) comparaison entre les plants localisés sur le monticule (M) et l'épaulement formé par le Bräcke. C-) comparaison entre les plants localisés sur le monticule formé par le Bräcke et la moyenne (E et F) des deux microsites formés par le TTS. Moyenne \pm intervalle de confiance à P = 95%.	8
Figure 11. Volume marchand de l'épinette noire prédit par les équations de Prégent et al. (1996) pour les plants localisés sur le monticule du Bräcke (M) ou après scarification au TTS (TTS). Ces courbes sont comparées aux prévisions en volume marchand des plantations d'épinette noire des régions écologiques 5 (Sapinière à bouleau blanc) et 6 (Pessière à mousse) publiées par Prégent et Poliquin (2006)	9

Figure 12. Positions recommandées par [Adelskol et Orlander \(1990\)](#) pour la plantation après une scarification par monticule : 1-) position en dessous du niveau du sol minéral; 2-) position au même niveau que le sol minéral; 3-) position sur sol minéral; 4-) minéral sur humus inversé; 5-) humus inversé 6-) monticule sur humus non perturbé.9

INTRODUCTION

Au Québec, la pratique actuelle en matière de régénération forestière favorise la régénération naturelle, mais lorsque le reboisement s'avère nécessaire, le scarifiage est largement pratiqué (Prévost 1992). Si la préparation mécanique du sol n'est pas nécessaire pour assurer la croissance de plants de fortes dimensions (PFD) sur les stations des forêts sub-boréales mixtes du sud du Québec caractérisées par un humus mince (Thiffault *et al.* 2003a) par contre, en forêt boréale, la plantation sur un sol non préparé mécaniquement n'est pas recommandée (Prévost et Dumais 2003; Thiffault *et al.* 2004; Thiffault *et al.* 2005; Hébert *et al.* 2007).

Le choix des microsites appropriés lors de la mise en terre des plants est primordial pour la survie et la croissance initiale des plants. La préparation de terrain mécanique joue un rôle important dans les plantations en créant un environnement favorable à la survie et à l'établissement des plants forestiers et influence les caractéristiques du futur peuplement (Ryans et Sutherland 2001). D'un point de vue opérationnel, le scarifiage mécanique crée des conditions de terrain relativement homogènes, en modifiant la disponibilité de l'eau, le régime thermique, la fertilité et la densité apparente du sol (Prévost 1992). De plus, la productivité des planteurs en Colombie-Britannique augmente de 132-178 arbres/heure sur les sites non scarifiés à 181-258 arbres/heure sur les sites scarifiés (Stjernberf 1991).

Les propriétés de l'humus brut le rendent moins efficace que le sol minéral pour retenir et conduire la chaleur. Sa structure lui donne les caractéristiques thermiques d'un isolant. Les conditions micro-climatiques à la surface du sol sont les facteurs les plus importants pour la première année de croissance; la scarification affecte positivement la température du sol (Brand 1991). Prévost (1996) a montré qu'en forêt boréale, l'enlèvement de la couche isolante d'humus a permis le réchauffement estival important dans les sillons de scarifiage; ainsi, les températures moyennes mesurées dans des profils de sols scarifiés sont de 5 à 10 °C supérieures à celles mesurées dans des profils de sols témoins non scarifiés. L'effet le plus notable a été d'accélérer le réchauffement printanier du sol.

Une proportion substantielle d'éléments nutritifs s'accumule dans l'humus, spécialement l'azote; cependant, la majorité de l'azote dans l'humus est lié à des molécules complexes qui sont immobilisées et donc non disponibles pour les plantes ou les microorganismes (Prescott *et al.* 2000). La préparation de terrain par un scarificateur forme des monticules mélangeant l'humus avec le sol minéral accélérant sa décomposition; l'incorporation de la litière dans le monticule résulte en un enrichissement en éléments minéraux du sol (Prescott *et al.* 2000). Le mélange de la matière organique au sol minéral favorise la minéralisation des litières et constitue donc un endroit privilégié pour la mise en terre des plants forestiers.

Au Québec, on utilise principalement le scarificateur à disque pour la préparation de terrain préalable à la plantation. Les surfaces à reboiser qui ont fait l'objet d'une préparation

de terrain dans les forêts publiques québécoises en 2008-2009 étaient les suivantes : scarifiage 63 168 ha., déblaiement 41 505 ha., labour et hersage 5 636 ha. (Anonyme 2010). Typiquement, le scarifiage à disques ou à cônes produit un sillon dont le profil peut être divisé en trois positions potentielles de plantation : le fond du sillon, l'épaulement (ou talus) et la butte ou monticule (Figure 1; Burton *et al.* 2000). Dans les sites xériques, le fond du sillon est recommandé, dans les sites mésiques l'épaulement est recommandé et sur les sites très humides la butte est recommandée (Burton *et al.* 2000). À ces trois positions, nous pouvons ajouter le sol non perturbé entre les sillons. Le document «Qualité des plantations — guide de l'évaluateur» produit par le Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec recommande que sur les superficies scarifiées, les plants soient mis en terre dans la partie supérieure du talus formé lors du scarifiage (Anonyme 2006).

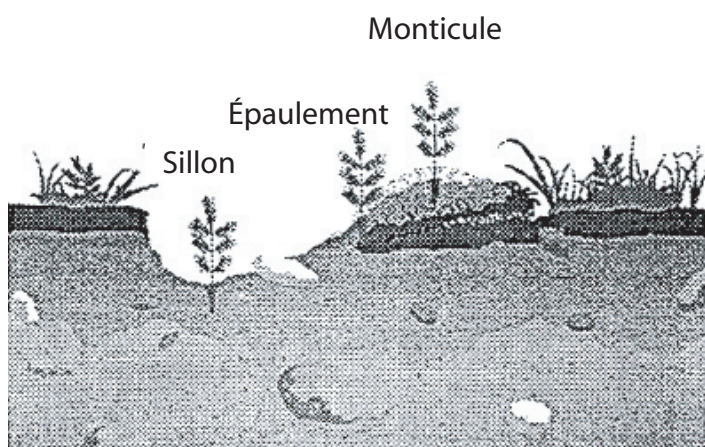


Figure 1. Vue transversale d'un sillon formé par un scarificateur à disques ainsi que les trois positions de plantation: fond du sillon, l'épaulement ainsi que le monticule. Tiré de Burton *et al.* (2000).

De façon générale, le scarifiage laisse une base de sol ferme au fond des sillons, un mélange meuble de matière organique – sol minéral au sommet des monticules et un sol de densité intermédiaire sur l'épaulement des monticules (Prévost 1992). Thiffault (2005) a publié une revue de littérature sur la formation de divers microsites par le scarifiage tandis que Sutton (1993) s'est attardé plus spécifiquement aux microsites par scarifiage par monticule. Parmi ces microsites, l'épaulement apparaît clairement comme étant le choix le plus approprié sur les stations mésiques (Sutherland et Foreman 1995; Bedford et von der Gonna 1994; Burton *et al.* 2000). Sur les stations mésiques ou hydriques, les creux sont toutefois à éviter à cause des risques d'accumulation d'eau. Dans les cuvettes, les risques plus élevés de gel sont également à considérer. La plantation dans le fond du sillon est cependant recommandée pour le reboisement de l'épnette noire et du pin gris dans les sites sableux sur station sèche (Sutherland et Foreman 1995). Le fond du sillon serait approprié sur les stations sèches puisque le système racinaire serait alors plus proche de la nappe phréatique. Cette position permet également de réduire l'insolation et les pertes en eau excessives. La figure 2 montre les microsites suggérés par Sutherland et Foreman (1995) en fonction du

type de dépôt et de drainage. Les buttes et autres positions surélevées ne sont pas recommandées pour la plantation de l'épinette noire ou du pin gris (Sutherland et Foreman 1995). Burton et al. (2000) ont montré que le taux de survie cinq ans après la plantation est significativement plus faible pour les semis plantés sur la butte comparativement aux autres microsites. Lorsque la couche d'humus est trop épaisse, il est recommandé de faire deux passages sur le même sillon, le premier enlève les débris et une portion de la couche d'humus et le deuxième pénètre plus profondément incorporant le sol minéral dans le profil (Bedford et von der Gonna 1994).

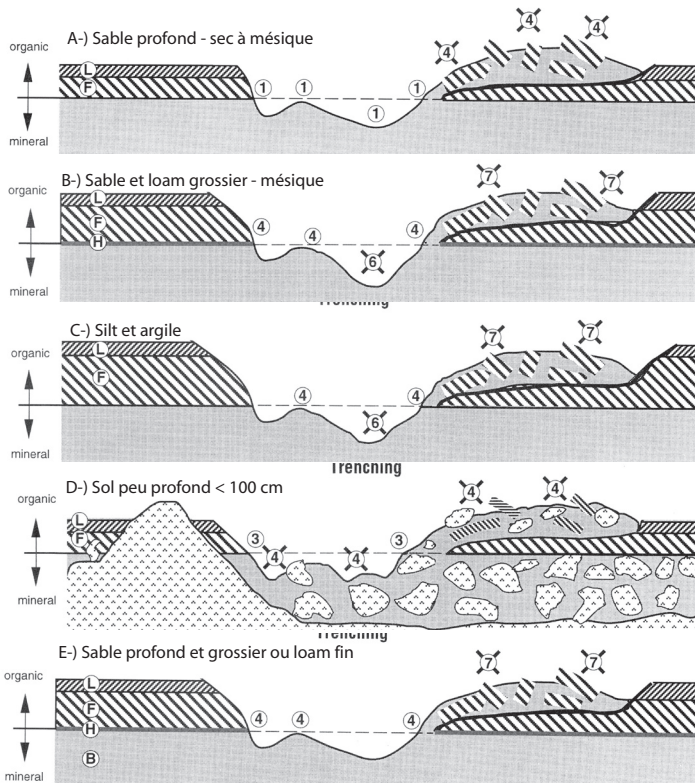


Figure 2. Coupes transversales d'un sillon réalisé par un scarificateur à disques en fonction de différents dépôts et drainages. Les chiffres indiquent les positions recommandées pour la plantation d'épinette noire ou de pin gris; lorsqu'elles sont barrées, ces positions ne sont pas recommandées. Tirée de Sutherland et Foreman (1995).

La technique de préparation de terrain par monticule, ou mise en butte, consiste à produire de façon artificielle des monticules de sol afin de créer un ou plusieurs microsites en vue du reboisement. Les buttes ainsi créées peuvent être de dimension et de hauteur variables selon l'essence à reboiser, les caractéristiques du site et la machinerie utilisée. (Gagné et Paquette 2008). Le premier prototype de scarificateur formant des monticules a été développé par la firme Robur Maskin AB et introduit en Suède en 1974 (Hunt et McMinn 1988). Les essais sur la préparation de terrain par monticule ont débuté en Suède en 1974 et cette manière de faire est devenue opérationnelle en 1976 (Edlund et Jonsson 1986). Différentes machineries forestières sont utilisées pour produire des monticules; le Bräcke-monticule, le scarificateur Sinkkila HMF, le Ministry/Rivtow, le Doranen 870H, le Oje et différents types d'excavatrice (McMinn et Hedin 1990). Le plus connu,

le scarificateur Bräcke est formé d'une paire de roues munies de pioches dentelées; lorsque les roues tournent, elles arrachent et traînent la matière organique et le sol minéral formant un poquet et un monticule (Figure 3). Cet équipement est tiré par une débusqueuse. Le Bräcke Moulder crée des monticules qui sont de petites tailles, soit des buttes qui sont composées d'à peine 2 à 6 centimètres de sol minéral (Bedford et al. 2000). L'appareil offre une bonne productivité et des résultats assez uniformes, mais il est déconseillé sur les parterres forestiers présentant de nombreux débris de coupe (von der Gonna 1992; dans Gagné et Paquette 2008).

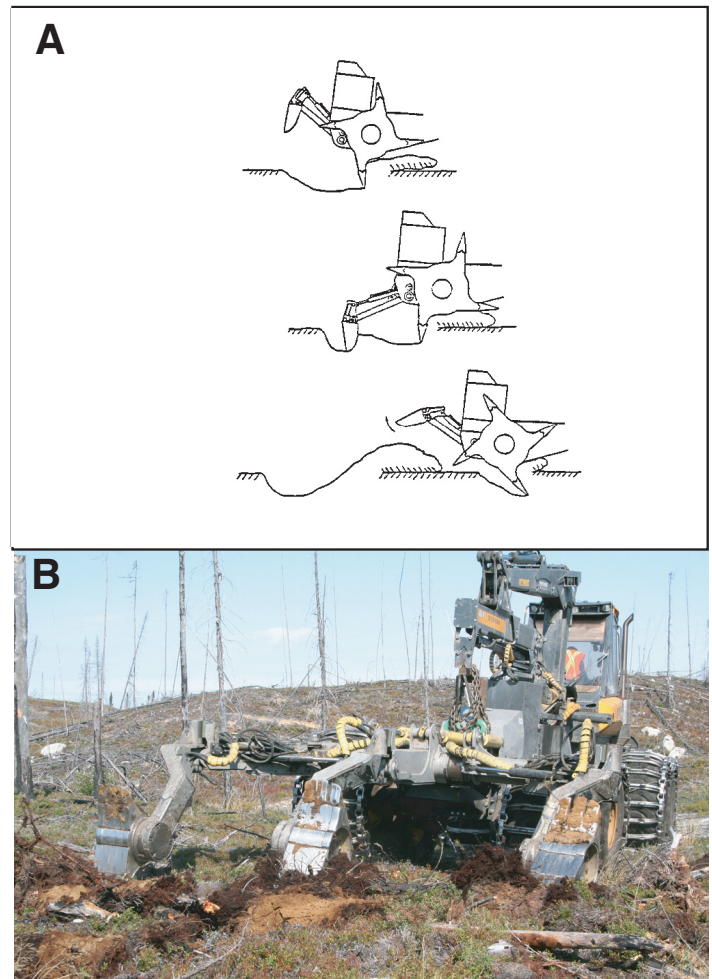


Figure 3. A-) Séquence montrant la formation d'un monticule par un scarificateur de type Bräcke. B-) Bräcke-monticule M36 (photo fournie par Dick Johnsson, représentant de Silvania Import Trading Inc.).

En Ontario, des études sur la préparation de terrain par monticule pour la plantation du pin gris et de l'épinette noire ont été initiées à partir de 1979 (Smith et al. 1989; Sutton 1991). La préparation de terrain par le Bräcke a été étudiée en Colombie-Britannique au début des années 80 (Boateng et al. 2006; Boateng et al. 2009). Vingt ans après la plantation, la croissance de l'épinette blanche était meilleure sur les monticules formés par le Bräcke comparativement à l'épaulement ou au fond de la cuvette scarifiée (Boateng et al. 2006). L'effet des divers microsites engendrés par le Bräcke sur la croissance de *Pinus contorta* a été étudié par Marek (1986); les semis les plus grands

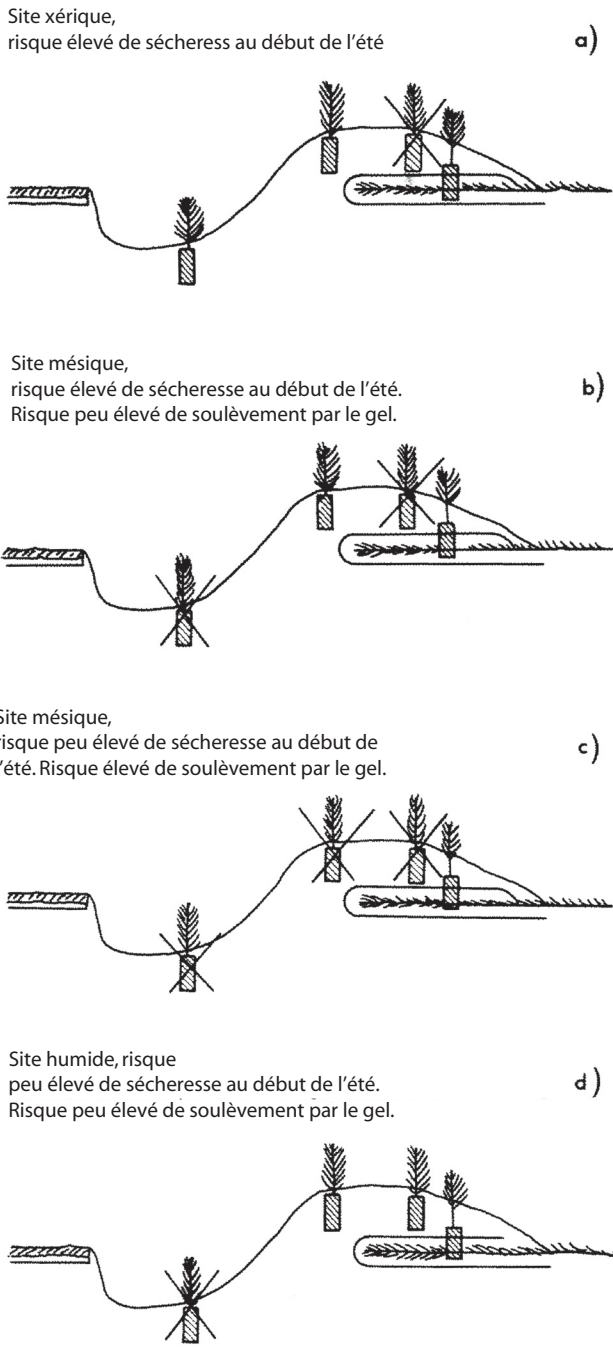


Figure 4. Positions de plantation recommandées sur des sites scarifiés par un Bracke-monticule en fonction de différents dépôts-drainages. Tiré d'Orlander *et al.* (1990).

se retrouvaient sur l'humus inversé du monticule et les concentrations foliaires en minéraux étaient plus élevées.

Selon plusieurs auteurs, cette technique de préparation de terrain présente plusieurs avantages. Elle peut être utilisée notamment afin d'améliorer le drainage des microsites et l'aération du sol tout en réduisant la végétation de compétition. Les monticules créent des microsites favorables à l'établissement et à la croissance rapide des conifères. Le microsite surélevé augmente la température du sol autour des racines, améliore le drainage dans les sites humides, augmente l'aération dans les sols argileux humides, réduit l'impact de la compétition et procure un substrat d'enraci-

nement riche en matière organique (Haeussler 1989). Elle favorise également une augmentation de la température du sol dans la zone d'enracinement des plants (Gagné et Paquette 2008). Puisque la création de monticules forme des microsites surélevés, ceux-ci favorisent nettement un réchauffement du sol autour des racines du plant. De plus, au printemps, le sol des monticules se réchauffe beaucoup plus rapidement que le parterre forestier (Haeussler 1989). Tel que mentionné précédemment, un accroissement de la température du sol favorise une augmentation de l'activité microbienne, ce qui a des effets bénéfiques sur la minéralisation des nutriments dans le sol et sur le développement des racines (Sutherland et Foreman 1995).

Orlander *et al.* (1990) recommandent de planter sur le monticule et d'éviter le fond du poquet sauf sur les sites xériques. De plus, la plantation plus profonde des plants limite le stress hydrique sur les monticules (Figure 4). La plantation profonde est importante et est un facteur décisif pour limiter les stress hydriques et le soulèvement par le gel. Le ministère des Richesses naturelles de l'Ontario a publié un guide sur l'utilisation de différents types d'équipement pour la préparation de terrain (Sutherland et Foreman 1995). La figure 5 montre les différents types de microsites de plantation réalisés par un Bracke-monticule et les microsites recommandés pour la plantation du pin gris ou de l'épinette noire.

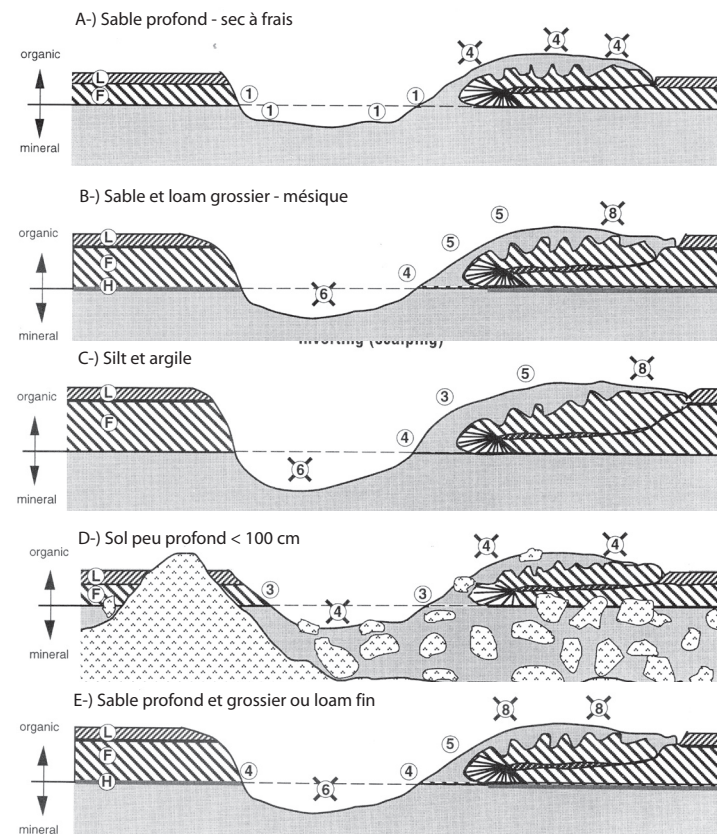


Figure 5. Coupes transversales des poquets réalisés par un Bracke-monticule. Les chiffres indiquent les positions recommandées pour la plantation d'épinette noire ou de pin gris; lorsqu'elles sont barrées, ces positions ne sont pas recommandées. Tiré de Sutherland et Foreman (1995).

À ce jour au Canada, les travaux de recherche en matière de scarifiage par monticule ont surtout été effectués en Ontario et en Colombie-Britannique; en raison des conditions météorologiques particulières et de la courte durée de la saison de croissance, des recherches spécifiques seraient nécessaires pour déterminer les effets réels de ce traitement du sol sous les conditions québécoises (Prévost 1992). En 1985, le ministère Énergie Ressources du Québec a expérimenté dans le secteur de Chibougamau le scarificateur Bräcke sur une surface de 200 hectares. Un suivi opérationnel de la plantation a été réalisé (Plante 1987). Un des sites scarifié au Bräcke-monticule a été remesuré en 2009, de même qu'un site similaire à proximité, localisé sur la même unité physiographique et dont la préparation de terrain a été réalisée par un scarificateur de type TTS. L'objectif de cette étude est de présenter les résultats de croissance des épinettes noires plantés sur différents microsites créés par un scarificateur Bräcke ou TTS. De façon plus spécifique, nous voulons déterminer quel est le meilleur microsite pour la plantation de l'épinette noire dans la pessière à mousse du nord québécois en fonction de chaque type de préparation de terrain utilisée. Ce type d'expérimentation, appelé étude type ou «case study» en anglais ne permet pas les comparaisons statistiques entre les deux traitements étant donné l'absence de vraies répétitions. Les comparaisons statistiques entre les microsites à l'intérieur de chaque site sont cependant valides. Les gains de croissance des plants d'un traitement par rapport à l'autre ne sont donnés qu'à titre indicatif.

MATÉRIEL ET MÉTHODE

Localisation des sites

Les sites Bräcke-monticule et TTS-témoin sont localisés près de Chibougamau (73°58' O; 49°58' N) (Figure 6) dans le domaine de la pessière à mousse de l'ouest, région écologique 6f de Saucier *et al.* (2009). Le dépôt est formé d'un till indifférencié (1A, 1AY) ou d'un dépôt juxtaglaciaire (2A) d'épaisseur moyenne supérieure à 1 m. Le sol est composé d'un loam à texture moyenne à drainage mésique de classes de drainage 20 ou 30. Le type écologique est RE22. Le peuplement d'origine (EE B2 90) a été récolté par coupe totale en 1983. Le site a été reboisé en 1987 avec des plants d'épinette noire cultivés en récipients 45-110 produits par la pépinière Pampev après une préparation de terrain par un scarificateur à disques de type TTS-35 ou par un Bräcke-monticule. Dans le cas du Bräcke-monticule, les plants étaient mis en terre soit dans le fond du poquet, à l'épaulement ou sur le monticule (Figure 7). Dans le cas du TTS, les plants étaient mis en terre soit au fond du sillon ou sur l'épaulement de la butte formé par le scarificateur à disques.

Mesure 2009

Les épinettes noires plantées dans le site Bräcke ont été mesurées en octobre 2009 tandis que celles du site TTS ont été mesurées en partie en juin 2009 (parcelles 5-6-7-8-9) et en partie en octobre 2009 (parcelles 1-2-3-4-11 et 12). Les arbres ont été échantillonnés dans dix parcelles circulaires de 5,64 m de rayon (1/100ième d'hectare) dans le site Bräcke tandis que 12 parcelles de même grandeur ont été mesurées

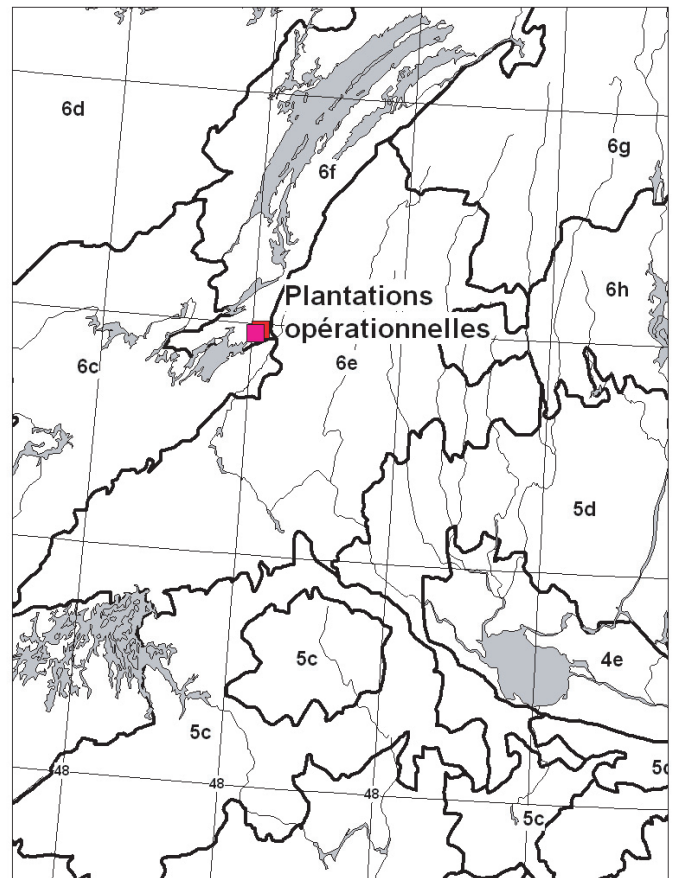


Figure 6. Localisation des plantations opérationnelles du MRNF implantées en 1987. Les chiffres suivis d'une lettre minuscule représentent les sous-domaines bioclimatiques d'après Saucier *et al.* (2009).

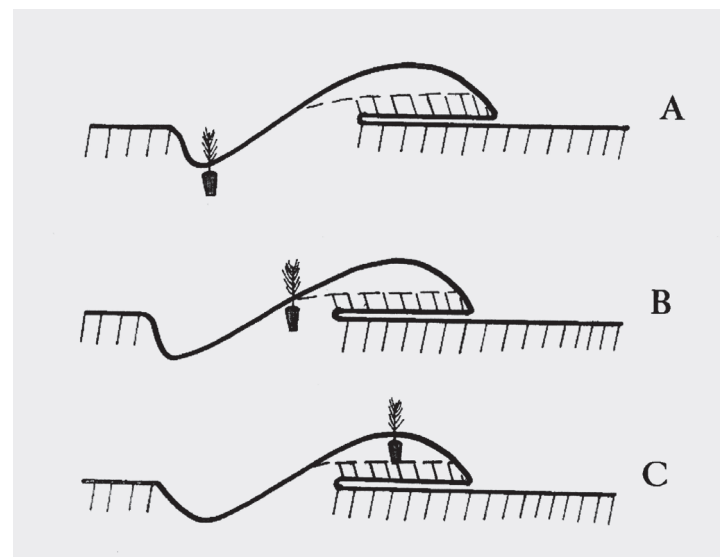


Figure 7. Localisation des microsites réalisés par le Bräcke-monticule et qui ont été comparés dans cette expérience: A-) fond du poquet (F); B-) épaulement (É); C-) monticule (M). Tiré de Plante (1987).

dans le site TTS. La hauteur de la tige, sans la pousse apicale a été mesurée au cm près à l'aide d'une perche de mesure; cette mesure correspond à la hauteur de l'arbre atteinte à l'automne 2008. Le DHP a été mesuré au mm près à l'aide d'un gallon circonférentiel. Le DHP des arbres des parcelles

mesurés à l'automne 2009 a été corrigé pour soustraire la croissance radiale de l'année en cours pour obtenir le DHP atteint à l'automne 2008. Pour ce faire, des microcarottes ont été prélevées sur 42 individus, le cerne de croissance de l'année en cours mesuré et le diamètre corrigé ainsi : $DHP_{cor} = DHP_{2009} - (2 \times r)$ où r est la largeur moyenne du cerne de croissance de l'année en cours.

Le volume de la tige des épinettes noires a été calculé en prenant la formule d'un paraboloïde décrit dans Forslund et Paterson (1994). La formule apparaît dans l'annexe.

Une carotte au niveau du sol a été prélevée à l'aide d'une sonde de Pressler sur 20 arbres localisés dans le fond du sillon creusé par le TTS, 18 arbres sur l'épaulement, 18 arbres sur l'épaulement formé par le Bräcke et 19 arbres sur le monticule du Bräcke. Les carottes ont été séchées à l'air libre et sablées avec un papier sablé très fin (grade 400 grains/po²). L'accroissement annuel en diamètre a été mesuré à $\pm 0,01$ mm sur une table Henson et les mesures ont été interdatées visuellement.

IQS et rendement prédit par les tables de rendement

Les huit arbres les plus grands ont été choisis par type de microsite pour calculer la hauteur des arbres dominants correspondant aux 200 plus hautes tiges à l'hectare. Les modèles tirés de Prégent et al. (1996) ont été utilisés pour calculer l'indice de qualité de station (IQS), la surface terrière totale, la surface terrière marchande, le volume total et le volume marchand. Les formules utilisées apparaissent en annexe. L'extrapolation du volume marchand entre 36 et 60 ans a été faite en suivant la méthode décrite dans Prégent et al. (1996). Brièvement, le volume marchand a été calculé pour des âges entre 15 et 35 ans, puis afin d'éviter la baisse soudaine de volume marchand causé par l'extrapolation du modèle, l'accroissement annuel moyen en volume marchand a été maintenu constant à partir de l'âge auquel l'accroissement atteint une valeur maximale jusqu'à 60 ans.

Analyses statistiques

Les données de mesures 2009 ont été traitées suivant un dispositif en blocs répliqués en utilisant l'analyse de variance (Quinn et Keough 2002). Les blocs correspondent aux parcelles circulaires et l'interaction parcelles x microsite à l'erreur expérimentale. La procédure REML a été utilisée pour calculer les statistiques de l'ANOVA (SAS Institute Inc. 2009). Le graphique de la distribution des résidus en fonction des valeurs prévues a été utilisé pour vérifier l'homoscédasticité des données (Quinn et Keough 2002). La normalité des rési-

dus a été vérifiée en utilisant le test de Shapiro-Wilk (Shapiro et Wilk 1965). Les données de volume ont été transformées en $\ln(\text{Vol} + 1)$ pour respecter les prérequis de l'analyse de variance. Les moyennes des moindres carrés et les intervalles de confiance des données brutes sont présentés dans les résultats. Lorsque l'analyse de variance était significative, les types de microsites étaient comparés entre eux par un test de comparaisons multiples de Student (Kirk 1982; Saville 1990). Les pourcentages de tiges présentant des défauts ont été analysés en utilisant un test de vraisemblance (Scherrer 1984). Les différences étaient jugées significatives à un seuil de $P \leq 0,05$. Toutes les données ont été analysées en utilisant le logiciel JMP vs 8.0.2 (SAS Institute Inc. 2009). Les comparaisons statistiques entre les deux traitements sont cependant impossibles à réaliser en utilisant l'ANOVA en l'absence de «vraies répétitions». Les deux traitements sont donc comparés visuellement l'un par rapport à l'autre en terme de gain de croissance et les prévisions de leur production en volume marchand sont comparées à celles des données de la Sapinière à bouleau blanc et de la Pessière à mousses colligées par Prégent et Poliquin (2006).

RÉSULTATS

L'analyse de variance du tableau 1 indique que la hauteur de la tige des arbres plantés sur les trois différents microsites formés par le Bräcke différaient significativement entre eux ($P = 0,0002$). La hauteur des épinettes noires était significativement plus grande sur les monticules comparativement aux plants localisés sur l'épaulement ou le fond du poquet (Figure 8A). Les plants localisés sur le monticule mesuraient 4,4 m en moyenne comparativement à 3,7 m sur l'épaulement et à 2,7 m pour ceux localisés dans le fond du poquet. Dans le cas du TTS, la hauteur des plants d'épinette noire n'était pas statistiquement différente entre ceux localisés sur l'épaulement du sillon et ceux localisés au fond du sillon ($P = 0,4780$) (Tableau 1; Figure 8B). En moyenne, les plants mesuraient 3,3 m de hauteur dans le site TTS.

Dans le cas du Bräcke, le DHP des plants localisés sur le monticule était significativement plus grand que celui des plants localisés sur l'épaulement ou le fond du poquet ($P < 0,0001$) (Tableau 1; Figure 8C). Le DHP moyen des plants localisés sur le monticule était de 5,5 cm en moyenne comparativement à 4,1 cm sur l'épaulement. Par contre, les plants dans le fond du sillon n'étaient pas différents de ceux plantés sur l'épaulement. Dans le cas du dispositif TTS, les plants situés sur l'épaulement n'étaient pas significativement différents de ceux situés au fond du poquet ($P = 0,3371$) (Tableau 1; Figure 8D). Le DHP

Tableau 1. Analyse de variance de l'effet du microsite sur la hauteur, le DHP et le volume des tiges d'épinette noire plantées après une préparation de terrain au Bräcke ou au TTS.

Préparation de terrain	d.l. num.	Hauteur			DHP			Volume de la tige		
		d.l. dén.	Rapport F	Prob. > F	d.l. dén.	Rapport F	Prob. > F	d.l. dén.	Rapport F	Prob. > F
Bräcke	2	11,1	19,4	0,0002	16,7	17,1	< 0,0001	16,6	17,3	< 0,0001
TTS	1	10,3	0,5	0,478	10,7	1,01	0,3371	10,6	0,8	0,3780

*: le volume a été transformé en $\ln(\text{Vol} + 1)$ pour corriger l'hétéroscédasticité des variances.

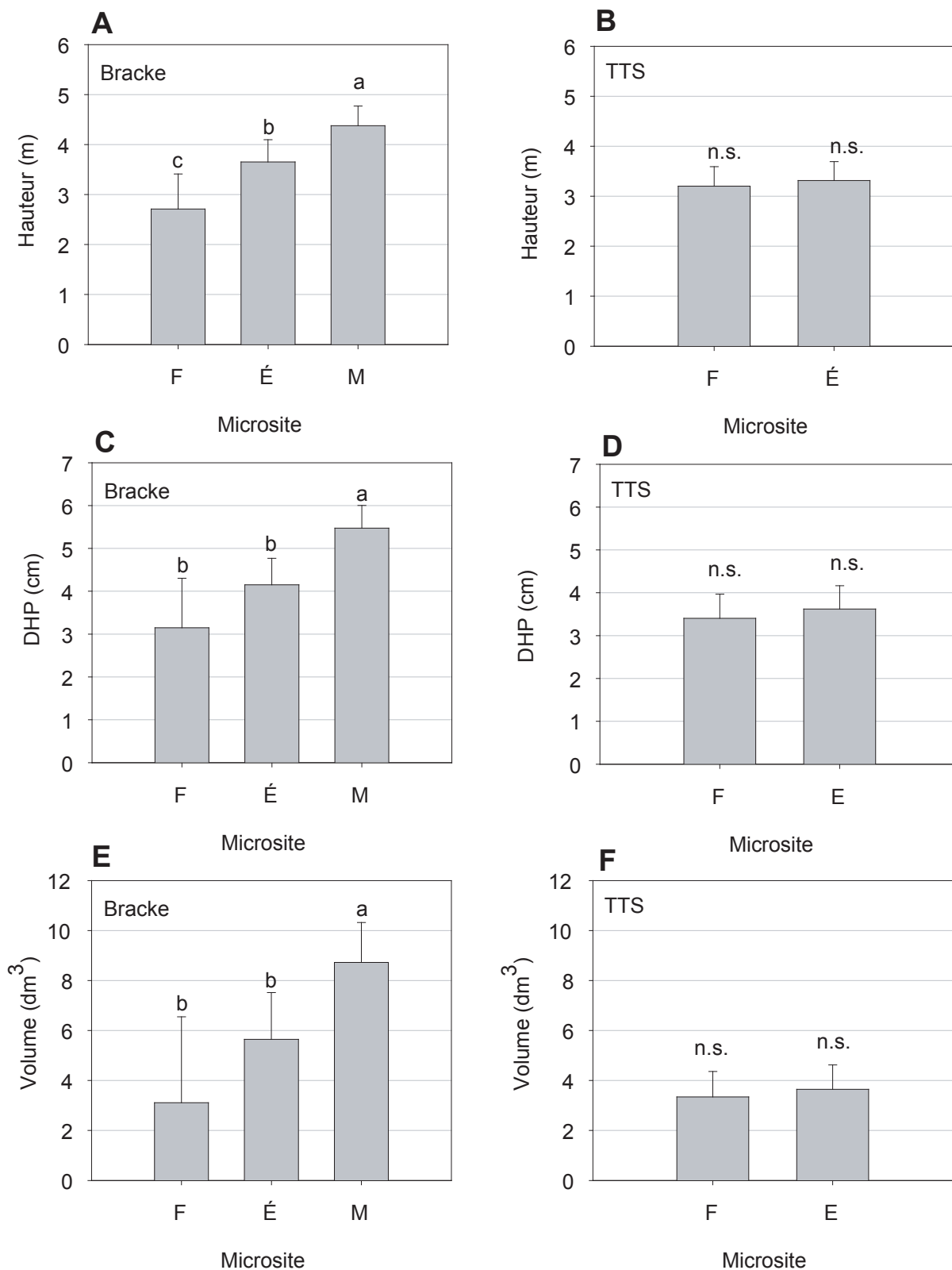


Figure 8. Effet du microsite sur la hauteur (A - B), le DHP (C - D) et le volume de la tige (E - F) des épinettes noires plantées après un scarifiage au Bracke ou au TTS; F-) fond du sillon ou du poquet, É-) épaulement, M-) monticule. Moyenne \pm intervalle de confiance à $P = 95\%$. Les moyennes suivies d'une lettre différente sont significativement différentes à $P < 0,05$.

des plants du dispositif TTS était de 3,6 cm en moyenne.

Le volume individuel des tiges d'épinette noire des arbres localisés sur l'épaulement était significativement plus grand que ceux localisés sur l'épaulement ou le fond du poquet (Figure

8E). Le volume des tiges des épinettes noires localisés sur le monticule formé par le Bracke était de 8,7 dm³ comparativement à 5,6 dm³ pour ceux localisés sur l'épaulement et 3,1 dm³ pour ceux du fond du poquet. Pour le dispositif TTS, le volume ne variait pas significativement entre les deux microsites,

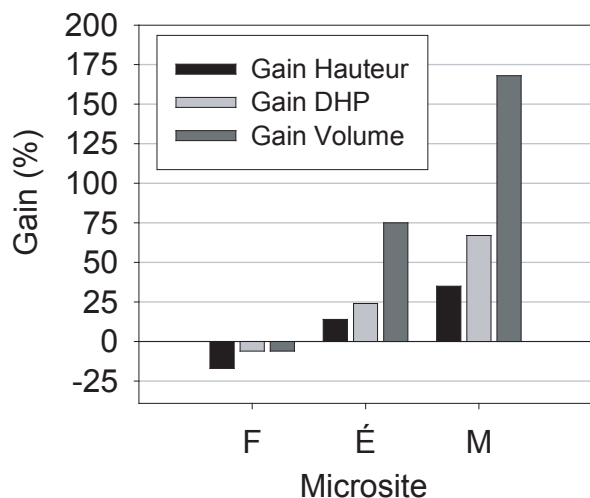


Figure 9. Gains en hauteur, en DHP et en volume des épinettes noires plantés sur le monticule après un scarifiage au Bräcke par rapport à une plantation après un scarifiage au TTS; F-) fond du sillon ou du poquet, É-) épaulement, M-) monticule.

soit 3,6 dm³ en moyenne (P = 0,3780) (Tableau 1; Figure 8F).

La figure 9 présente les gains relatifs en hauteur, en DHP et en volume des arbres plantés sur différents microsites formés par le Bräcke par rapport à ceux plantés sur l'épaulement formé par le TTS. Le gain en hauteur était de 35%, celui du DHP de 67% et celui du volume individuel des tiges de 168%. Les gains relatifs des arbres plantés sur l'épaulement sont beaucoup plus faibles et même négatifs lorsque les arbres sont plantés dans le fond du poquet formé par le Bräcke-monticule.

La courbe d'accroissement annuel en diamètre des épinettes noires localisés dans le fond du sillon du TTS est très semblable à celle des arbres localisés sur l'épaulement (Figure 10A). L'accroissement radial augmente linéairement dans les deux cas jusqu'en 2005 (19 ans après la plantation). L'accroissement radial des arbres localisés à l'épaulement est légèrement plus grand sur une courte période de temps, soit entre 1998 et 2005. Dans le cas du Bräcke, l'accroissement radial des arbres sur le monticule est plus grand comparativement à ceux sur l'épaulement sur une plus longue période de temps, soit de 1994 à 2009 (Figure 10B). Si on compare l'accroissement radial du Bräcke-monticule avec celui de la moyenne des deux microsites du TTS, on remarque un écart important entre les deux courbes en faveur du premier (Figure 10C). On observe pour le Bräcke-monticule une période de latence de quatre ans environ après la plantation suivie d'une accélération de la croissance radiale jusqu'en 1996 suivie d'une stabilisation. L'accroissement radial annuel du Bräcke-monticule est plus grand que celui du TTS sur toute la période de temps qui suit la période de latence de quatre ans.

Lors du remesurage, les défauts sur la tige ont été notés. Les défauts étaient principalement des fourches et des flèches terminales doubles. Le choix du microsite n'a pas eu d'effet significatif sur le nombre de défaut de tige (P = 0,8711) (Tableau 2). Le pourcentage de plants avec des défauts ne dépassait pas 11%. Le déchaussement était un problème

Tableau 2. Test de vraisemblance sur le nombre de défauts de tige des épinettes noires plantées dans le site Bräcke; 202 plants ont été évalués.

Test	Khi carré	Prob. > Khi
Rapport de vraisemblance	0,276	0,8711

Localisation	n	Défaut (%)
Fond	1	8
Épaulement	5	9
Monticule	14	11

mineur, seul un plant déchaussé a été noté dans le fond du poquet du dispositif Bräcke sur un total de 202 plants évalués.

Le tableau 3 présente les différents paramètres dendrométriques prédits par les équations de Prégent *et al.* (1996). Les arbres qui ont poussé sur les monticules du Bräcke ont le plus fort IQS, soit 6,7 m comparativement à 3,6 m pour les arbres qui ont été plantés dans le fond du poquet. Le volume total à 24 ans était de 30,8 m³/ha dans le premier cas pour seulement 3,4 m³/ha pour le fond du poquet (Tableau 3). L'extrapolation du volume marchand par la méthode décrite dans Prégent *et al.* (1996) permet d'estimer un volume marchand à 60 ans de 195 m³/ha pour les arbres plantés sur les monticules et de seulement 136 m³/ha pour ceux plantés sur l'épaulement du TTS (Figure 11).

DISCUSSION

Nos résultats montrent que la position de plantation influence grandement la croissance en hauteur des épinettes noires plantées après une préparation de terrain par le Bräcke-monticule. Le monticule représente la meilleure position de plantation suivie de l'épaulement et du fond du poquet.

Tableau 3. Calculs des différents paramètres dendrométriques de l'épinette noire prédits à partir des équations de Prégent *et al.* (1996). L'IQS prédit par les équations est à 25 ans.

	Bräcke			TTS	
	F ¹	É ²	M ³	F ¹	É ²
Nb. arbres	8	8	8	8	8
Âge total	24	24	24	24	24
Hauteur des dominants (m)	3,4	5,6	6,5	4,9	5,0
Hauteur moyenne (m)	2,7	3,7	4,4	3,2	3,3
DHP des dominants (cm)	3,75	6,93	8,45	5,80	5,96
DHP moyen (cm)	3,16	4,15	5,47	3,40	3,62
IQS (m)	3,6	5,9	6,7	5,0	5,2
Espacement (m)	2	2	2	2	2
Surface terrière totale prédite (m ² /ha)	1,4	7,7	10,7	5,2	5,6
Surface terrière marchande prédite (m ² /ha)	0	3,4	6,7	0,6	1,0
Volume total prédit (m ³ /ha)	3,4	20,0	30,8	12,2	13,3
Volume marchand prédit (m ³ /ha)	0	3,2	12,2	0	0

Note : l'âge total est l'âge en plantation plus l'âge en pépinière.
1- Fond du poquet ou du sillon; 2- Épaulement; 3- Monticule.

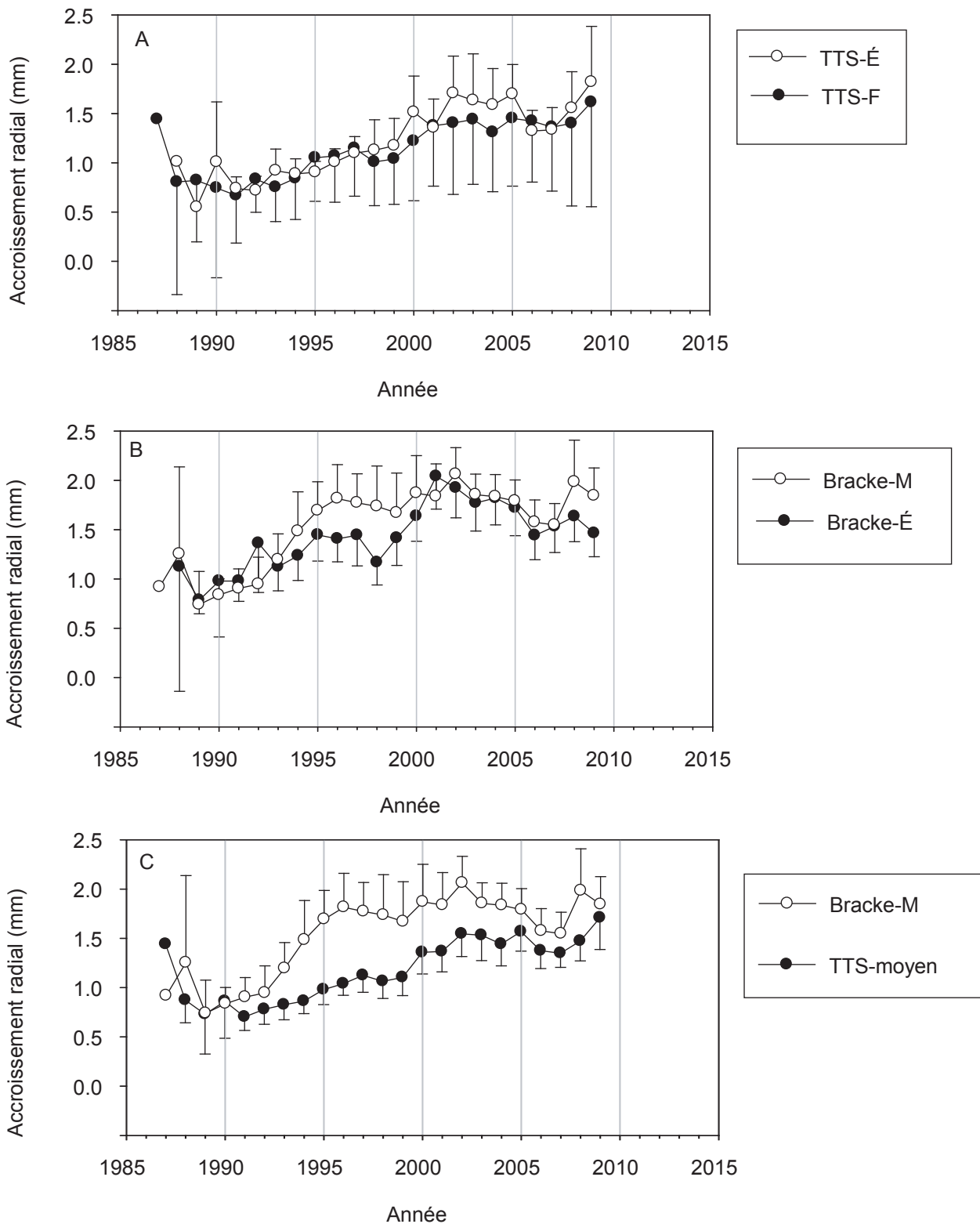


Figure 10. Accroissement annuel radial. A-) Comparaison entre les plants localisés sur l'épaule (É) et le fond du sillon (F) formé par le TTS. B-) Comparaison entre les plants localisés sur le monticule (M) et l'épaule formé par le Bracke. C-) Comparaison entre les plants localisés sur le monticule formé par le Bracke et la moyenne (E et F) des deux microsites formés par le TTS. Moyenne \pm intervalle de confiance à P = 95%.

L'IQS à 25 ans calculé à partir des mesures des plants reboisés sur l'épaule est de 7 m ce qui correspond à l'IQS moyen de l'épinette noire pour le sous-domaine bioclimatique de la pessière à mousses de l'ouest de la forêt boréale québécoise publié par [Prégent et Poliquin \(2006\)](#); ce réseau

de la mesure des effets réels de plantation comporte près de 800 parcelles sur l'ensemble du territoire forestier québécois et ce rapport présente les résultats obtenus lors de deux premiers mesurages effectués 8 et 13 ans après la mise en terre. La plantation sur le monticule du Bracke permet proba-

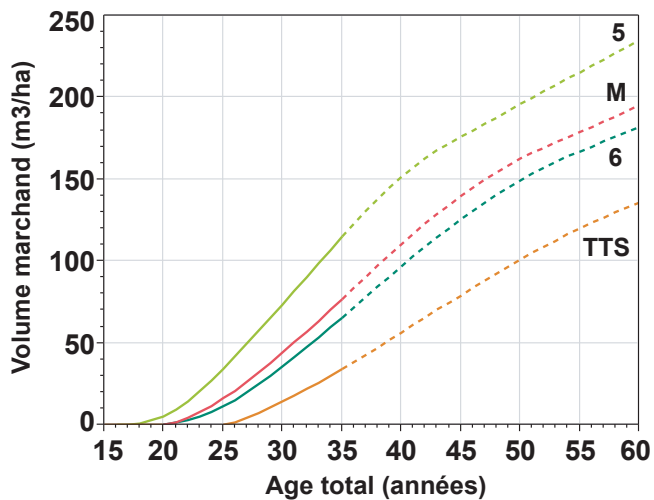


Figure 11. Volume marchand de l'épinette noire prédit par les équations de [Prégent et al. \(1996\)](#) pour les plants localisés sur le monticule du Bräcke (M) ou après scarification au TTS (TTS). Ces courbes sont comparées aux prévisions en volume marchand des plantations d'épinette noire des régions écologiques 5 (Sapinière à bouleau blanc) et 6 (Pessièrre à mousses) publiées par [Prégent et Poliquin 2006](#).

blement de mieux «exploiter» la fertilité de cette station. [Prégent et Végiard \(2000\)](#) concluent d'ailleurs que les sols ayant une capacité d'échange cationique inférieure à 15 méq/100 g sont associés à des stations moins fertiles qui ont un IQS peu élevé. [Prégent et Poliquin \(2006\)](#) ont démontré que la croissance et le rendement des plantations d'épinette noire localisées dans le domaine de la pessièrre à mousse est caractérisée par une forte variabilité qui s'expliquerait, partiellement du moins, par des conditions hétérogènes des caractéristiques de sol induites et non par la préparation de terrain.

Nos résultats sont en accord avec ceux d'une étude réalisée

en Nouvelle-Écosse montrant que le % de survie (+3%), la longueur de la pousse apicale et la hauteur moyenne à 10 ans (+17%) des semis d'épinette blanche étaient supérieures sur le monticule par rapport au fond des sillons formés par une charrue ([Anonyme 1990](#)). En Suède, le choix du microsite de plantation après une préparation de terrain au Bräcke est fonction du risque de sécheresse et de la texture du sol ([Adelskol et Orlander 1990](#)). Sur les sols xériques, les positions 1, 2 et 3 doivent être privilégiées (Figure 12). Sur les sols mésiques, moraine de sable fin, les microsites 3 et 4 sont meilleurs. Sur les sols mésiques, silt et sols humides, les positions 4, 5 et 6 sont à privilégier.

Dans ce dernier cas, les semis doivent être plantés plus profondément pour éviter la sécheresse ; les plants peuvent être enfouis jusqu'à ½ de leur taille ([Adelskol et Orlander 1990](#)). En Suède, 16% des semis sont plantés sur l'humus non perturbé (6), 50% dans le sillon ou le poquet (1-2) et 34% sur le monticule (3-4-5). L'épaisseur du sol minéral sur le monticule doit se situer entre 5 et 20 cm et le volume entre 10 et 40 L. [Bedford et al. \(2000\)](#) ont observé que la croissance de l'épinette blanche est meilleure sur les monticules formés par le Bräcke recouverts de 14 à 20 cm de sol minéral. [Bedford et von der Gonna \(1994\)](#) suggèrent un recouvrement de sol minéral entre 15-20 cm. Sur les stations xériques, les microsites 5 et 6 présentent plus de risques de sécheresse. Sur les stations plus fraîches, le microsite 1 est à déconseiller à cause du faible drainage et des températures du sol plus froides. En Colombie Britannique, les semis sont généralement plantés sur le monticule et enfouis plus profondément que le collet pour que le système racinaire soit en contact avec l'humus inversé ([Bedford et von der Gonna 1994](#)).

Dans notre étude, on remarque aussi une plus forte croissance en diamètre des tiges plantés sur le monticule comparativement aux autres positions ce qui a un impact impor-

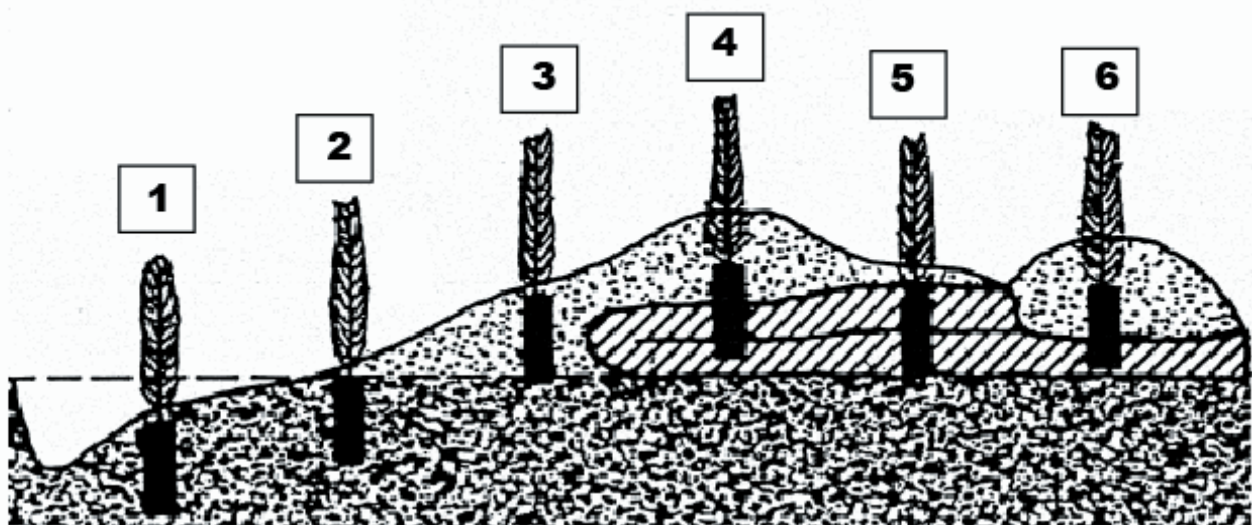


Figure 12. Positions recommandées par [Adelskol et Orlander \(1990\)](#) pour la plantation après une scarification par monticule : 1-) position en dessous du niveau du sol minéral; 2-) position au même niveau que le sol minéral; 3-) position sur sol minéral; 4-) minéral sur humus inversé; 5-) humus inversé 6-) monticule sur humus non perturbé.

tant sur le volume de la tige. Par contre, Sutton (1991) n'a pas observé de différences significatives de la hauteur, du diamètre ou du volume des plants à racines-nues d'épinette noire ou de pin gris reboisés sur différents microsites après une préparation au Bräcke cinq ans après la plantation; cependant, les microsites monticule minéral sur minéral ou minéral sur organique semblent généralement supérieurs aux autres. Comme le note l'auteur, on peut supposer que la période de croissance étudiée était trop courte pour discerner des différences significatives entre les différents microsites.

Notre analyse dendrométrique montre que l'effet du microsite monticule perdure sur longue période de temps après une période de latence de quatre ans après la plantation. On peut supposer que cette période correspond au temps nécessaire pour que la couche de matière organique emprisonnée sous le monticule se décompose et que les éléments minéraux deviennent disponibles pour les arbres.

Sur le site de plantation préparé par le TTS-35, le choix de la position de plantation (fond du sillon versus épaulement) n'a pas influencé la croissance en hauteur, en diamètre ou en volume. Contrairement à nos résultats, Bedford et Sutton (2000) ont observé un accroissement du volume de la tige du pin tordu planté à l'épaulement du sillon 2,7 fois supérieur à ceux plantés au fond du sillon. Ces résultats sont en accord avec ceux de Burton *et al.* (2000) qui ont prouvé que la plantation sur l'épaulement est supérieure au niveau de la croissance des plants par rapport à la position dans le fond du sillon. Dans une expérience en Colombie-Britannique, la croissance en hauteur et en volume 10 ans après la plantation du pin tordu était significativement plus grande pour les semis plantés à l'épaulement comparativement au fond du sillon de scarifiage du TTS-Delta même si le taux de survie était plus faible; malgré tout, le taux de survie était d'au moins 93% dans le pire des cas (Bedford et Sutton 2000). Une autre étude réalisée en Colombie Britannique a montré des différences spectaculaires de croissance entre les plants reboisés sur l'épaulement des sillons formé par un scarificateur à disques et ceux plantés dans le sillon; après 5 ans les semis dans le sillon mesurait 71 cm comparativement à 112 cm pour ceux de l'épaulement. L'écart entre les deux était encore plus grand pour le volume de la tige soit 72 cm³ dans le sillon comparativement à 228 cm³ sur l'épaulement (Bedford et von der Gonna 1994). Lorsque les plants sont reboisés assez haut sur l'épaulement le système racinaire est en contact avec la matière organique qui est une source de nutriments pour la croissance du plant et le volume de la tige peut augmenter par un facteur de trois (Bedford et von der Gonna 1994). Neddoly et Van Rees (1998) ont démontré que les concentrations des éléments minéraux N, P et S au sein des buttes formés par le scarificateur TTS-Delta étaient plus élevées comparativement aux valeurs observées dans les tranchées sur des sols luvisol et brunisol du nord de la Saskatchewan. Coates et Haussler (1990) recommandent aussi de reboiser les plants sur l'épaulement formé par le scarificateur à disques sur les sites froids puisque la température est plus élevée et le drainage est meilleur ce qui favorise la croissance des plants. Dans un essai réalisé à Terre-Neuve comparant différents microsites créés par un

scarificateur à disques, English (1996, 1998) a démontré que les plants d'épinette noire reboisés à l'épaulement ou sur le monticule avaient une croissance en hauteur plus fortes que les plants reboisés dans le sillon; les recommandations à Terre-Neuve sont que les plants doivent être reboisés à l'épaulement ou sur le monticule et le fond du sillon doit être évité sauf si aucun autre microsite n'est disponible.

La raison pour laquelle dans la présente expérience les plants reboisés à l'épaulement ne se distinguent pas de ceux plantés au fond du sillon demeure inconnue. On peut spéculer qu'à l'époque (1987), la scarification réalisée par le TTS-35 n'était pas assez agressive comparativement aux scarificateurs à disques hydrauliques plus récents; les sillons formés étaient peu profonds et les deux microsites (fond/épaulement) se différenciaient peu l'un de l'autre.

Cette plantation opérationnelle ne permet pas une comparaison statistique entre le Bräcke et le TTS puisqu'il n'y pas de «vraies» répétitions de la méthode de préparation de terrain; par contre, la comparaison entre les microsites à l'intérieur de chaque méthode de préparation de terrain reste valide statistiquement. Nonobstant cela, nous jugeons important d'évaluer ces deux méthodes l'une par rapport à l'autre puisqu'à notre connaissance, il n'y a pas d'autres études réalisées au Québec qui permet d'évaluer le rendement d'une plantation après préparation au Bräcke-monticule sur une aussi longue période de temps. Nos résultats montre qu'après 24 ans, le volume de la tige des plants reboisés sur le monticule du Bräcke serait 165 % plus élevé que ceux des plants reboisés après un scarifiage au TTS tel que pratiqué traditionnellement au Québec. Le gain en hauteur était lui de 62%. Les deux sites sont localisés sur la même unité cartographique en utilisant la même provenance de plants d'épinette noire qui ont été reboisés simultanément ce qui permet d'inférer que les différences de croissance sont causées probablement par la méthode de préparation de terrain et la position du microsite de reboisement.

Ces résultats sont en accord avec ceux provenant de la Scandinavie et la Colombie-Britannique où la plantation sur monticule est utilisée opérationnellement depuis des années. Orlander *et al.* (1998) ont montré que le poids sec de la tige des plants d'épinette de Norvège reboisés sur le monticule du Bräcke était le double de ceux planté dans le fond ou l'épaulement du sillon formé par un scarificateur à disques, quatre ans après la plantation. En Suède, après 10-12 ans de croissance, la hauteur des pins tordus (*Pinus contorta*) plantés sur les monticules formés par un scarificateur Brake était 1,5 fois plus élevée comparativement à ceux localisés dans le poquet et le volume de la tige 5,8 fois plus élevé (Edlund et Jonsson 1986). Dans le même ordre de grandeur, dans deux essais de plantation en Colombie-Britannique, les plants d'épinette blanche avaient une biomasse trois fois plus importante lorsqu'ils étaient plantés sur le monticule plutôt que dans le poquet formé par le Bräcke (Bedford *et al.* 2000). Dans une expérience réalisée en Saskatchewan, Archibold *et al.* (2000) n'ont pas noté de différence significative de la hauteur des plants d'épinette blanche reboisés deux ans après une préparation de ter-

rain par un scarificateur à disques ou un Bräcke; cependant la biomasse des semis était 1,5 fois plus grande sur les parcelles traitées au Bräcke. Dans un essai réalisé en Colombie-Britannique, les plants de pin tordu plantés sur les monticules du Bräcke mesuraient 2,94 m après 10 ans comparativement à 2,31 m pour ceux plantés à l'épaulement du sillon d'un scarificateur à disques, soit une augmentation de 27% (Macadam *et al.* 2001). Dans un essai réalisé dans le nord-est de la Colombie-Britannique, la hauteur, le diamètre et le volume de la tige des épinettes blanches étaient plus grands dans tous les traitements de mise en butte comparativement aux épinettes plantées à l'épaulement du poquet; 20 ans après la plantation; la hauteur et le diamètre de la tige était 1,4 fois plus grand sur les buttes recouvertes de 20 cm de sol minéral comparativement à l'épaulement et le volume de la tige était 2,2 fois plus élevé dans le premier cas (Boateng *et al.* 2006). Sur un autre site expérimental, le volume de la tige était 2,9 fois plus grand sur les buttes recouvertes de 10 cm de sol minéral comparativement aux plants reboisés dans le poquet (Boateng *et al.* 2009).

Les rendements après une préparation de terrain par un Bräcke ne sont pas toujours supérieurs à ceux d'une scarification à disques. Orlander *et al.* (1998) n'ont pas discerné de différences significatives dans la croissance des plants de pin tordu ou d'épinette plantés soit après une scarification par disques (Donaren 280) ou par Bräcke. Bedford et Sutton (2000) ont aussi observé après 10 ans que les plants de pin tordu reboisés sur l'épaulement d'un sillon de scarifiage (TTS-Delta) avaient la même hauteur que ceux plantés sur le monticule formé par un Bräcke. En Suède, Mattsson et Bergsten (2003) n'ont pas noté après 17 ans de différences significatives dans la croissance des plants de pin tordu plantés sur un site préparé par un scarificateur à disque ou par un Bräcke (plantation sur le monticule). Bassman (1989) a remarqué une augmentation de la température du sol sur les buttes mais aussi un potentiel hydrique et un contenu en eau plus faible; l'effet bénéfique de l'augmentation de la température du sol était contrebalancé par une augmentation du stress hydrique durant les deux premières années en plantation. À la troisième année de croissance, l'extension racinaire des plants sur le monticule était 50% plus grande comparativement aux plants situés dans le sillon de scarifiage (Bassman 1989).

Les effets du scarifiage au Bräcke-monticule sur la croissance à long terme des plants sont très peu documentés à l'heure actuelle. Cortini *et al.* (2010) ont utilisé des modèles de croissance pour prédire sur la période de rotation du peuplement l'effet de différentes préparations de terrain; le labourage, le brûlage dirigé donneraient les meilleurs rendements soit un volume marchand estimé à 323 m³/ha à 60 ans pour le pin tordu tandis que la plantation dans le fond du sillon formé par le scarificateur à disques Delta serait le pire traitement pour un rendement de 290 m³/ha. Les meilleurs traitements pour l'épinette blanche seraient le labourage, le brûlage dirigé ou le désherbage à l'herbicide; le volume marchand est estimé à 621 m³/ha à 80 ans, le pire étant la plantation à l'épaulement du sillon d'une scarification à disques de type Delta pour volume marchand de

442 m³/ha. En Colombie-Britannique, la plantation d'épinette blanche sur monticule formé par un labourage d'inversion («*plow-inverting*») pourrait réduire la rotation des peuplements de 12 à 16 ans comparativement aux peuplements témoins sans préparation de terrain (Boateng *et al.* 2009).

Le rendement futur des plantations peut être prédit par l'indice de qualité de station lequel est basé sur la relation âge-hauteur dominante (Prégent et Végiard 2000). La hauteur dominante est le meilleur paramètre pour faire des prévisions de rendement à long terme des plantations d'épinette noire en forêt boréale (Prégent et Poliquin 2006). Les rangs centiles provincial et régional de l'indice de qualité de station permettent de situer les peuplements quant à leur potentiel de croissance; un rang centile compris entre 80 et 100 correspond aux stations les plus productives (Prégent et Lévesque 2001). Ainsi pour notre essai, la plantation reboisée sur les monticules se situe au 51^{ème} rang centile provinciale (98 placettes d'épinette noire dans la région 02 étudiées par Prégent et Lévesque (2001)) tandis que la plantation reboisée suite au scarifiage à disques se situe au 35^{ème} rang centile régional. L'augmentation du volume marchand serait d'environ 60 m³/ha à 60 ans en plantant l'épinette noire sur le monticule. Ces résultats sont basés sur une extrapolation au-delà de 35 ans des courbes de rendement des plantations d'épinette noire dans la partie méridionale du Québec calculés par Prégent *et al.* (1996) et doivent donc être interprétés avec prudence. Les tables de rendement plus précises pour la forêt boréale ne sont pas encore disponibles pour l'épinette noire et le seront seulement lorsque le nombre de plantations de plus de 50 ans sera appréciable. À défaut d'autres choses, nous ne disposons que de ces tables pour estimer le rendement. Ces résultats sont donnés à titre indicatif et sont seulement valides pour ce cas type et peut ne pas être représentatif pour d'autres peuplements forestiers à cause des limites du plan expérimental.

Le rendement anticipé des plantations devrait influencer une part importante de la possibilité forestière de la région du Saguenay – Lac-Saint-Jean (Prégent et Végiard 2000). Les rendements minimaux pour l'épinette noire prévus au Manuel d'aménagement forestier sont de 150 m³/ha à 60 ans pour la plus faible qualité de station trouvée par Prégent *et al.* (1996) soit celle de 6 m (hauteur dominante à un âge de référence de 25 ans) (Anonyme 2000). Prégent et Végiard (2000) ont montré subséquentement qu'en forêt boréale, près de 32% des placettes mesurées d'épinette noire ont un IQS de 5 m et moins. Pour cette raison, il est impératif d'augmenter la productivité de nos forêts pour être compétitif sur les marchés mondiaux. Cet enjeu est d'autant plus important que dans l'avenir, les plantations fourniront une part de plus en plus importante du bois mis en marché. L'atteinte de cet objectif passe par l'utilisation de nouvelles techniques de production de plants, l'amélioration génétique des arbres de même que les traitements sylvicoles plus intensifs (Thiffault *et al.* 2003b). Cet objectif de productivité devrait aussi inclure l'amélioration des techniques de préparation de terrain avant le reboisement notamment par la plantation sur monticule. Toutefois, des expériences devraient être réalisées préalablement pour optimiser les paramètres d'utilisation

de la plantation sur monticule (par Brække ou autre) avant une utilisation à grande échelle, tout en tenant compte des conditions prévalentes dans la forêt boréale québécoise.

RÉFÉRENCES

- Adekskold, G. et G. Orlander 1990. Planting spot selected on mechanically prepared sites. Result No. 8; Forskningsstiftelsen Skogsarbeten. [An unofficial translation by Ernst Stjernberg, R.P.F. FERIC, Western Division]. Silviculture Branch, Victoria, B.C. 7 p.
- Anonyme 1990. Planting on furrows and mounds : 10-year result. N.-S. Dept. of Land and Forests. Truro, N.S. 3 p.
- Anonyme 2000. *Mise à jour du Manuel d'aménagement forestier*. Documents d'annexes – Annexe 1 - Les tables de rendement. Dans Manuel d'aménagement forestier. 4e édition. Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec. Direction des relations publiques. 82 p.
- Anonyme 2006. Qualité des plants – guide de l'évaluateur. MRNF. Ste-Foy, Québec. 48 p.
- Anonyme 2010. Ressources et industries forestières portrait statistique édition 2010. MRNF, Québec. <http://www.mrnf.gouv.qc.ca/forets/connaissances/connaissances-statistiques-complete.jsp#0>
- Archibold, O.W., Acton, C. et E.A. Ripley 2000. Effect of site preparation on soil properties and vegetation cover, and the growth and survival of white spruce (*Picea glauca*) seedlings, in Saskatchewan. For. Ecol. Manage. 131: 127-141.
- 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.
- Bedford, L. et M. von der Gonna 1994. Site preparation : microsite selection and planting stock performance. Regeneration Note 5. Silviculture Branch Victoria, B.C. 8 p.
- Bedford, L. et R.F. Sutton 2000. Site preparation for establishing lodgepole pine in the sub-boreal spruce zone of interior British Columbia : the Bednesti trial, 10-year results. For. Ecol. Manage. 126: 227-238.
- Bedford, L., Sutton, R.F., Stordeur, L. et M. Grismer 2000. Establishing white spruce in the boreal white and black spruce zone. New For. 20: 213-233.
- Boateng, J.O., Heineman, J.L., McClarnon, J. et L. Bedford 2006. Twenty year responses of white spruce to mechanical site preparation and early chemical release in the boreal region of northeastern British Columbia. Can. J. For. Res. 36: 2386-2399.
- Boateng, J.O., Heineman, J.L., Bedford, L., Harper, G.J. et A.F.L. Nemeč 2009. Long-term effects of site preparation and postplanting vegetation control on *Picea glauca* survival, growth and predicted yield in boreal British Columbia. Scand. J. For. Res. 24 : 111-129.
- Brand, D.G. 1991. The establishment of boreal and sub-boreal conifer plantations – an integrated analysis of environment conditions and seedling growth. For. Sci. 37: 68-100.
- Burton, P., Bedford, L., Goldstein, M. et M. Osberg 2000. Effects of disk trench orientation and planting spot position on a ten-year performance of lodgepole pine. New For. 20(1): 23-44.
- Coates, D. et S. Haeussler 1990. Mechanical site preparation for cold site management. B.C. For. Serv. Victoria. FRDA Memo No. 160. 7 p.
- Cortini, F., Comeau, P.G., Boateng, J.O., et L. Bedford 2010. Yield implications of site preparation treatment for lodgepole pine and white spruce in northern British Columbia. Forests 1: 25-48.
- Edlund, L. et F. Jonsson 1986. Swedish experience with ten years of mounding site preparation. Dans Northern Forest Silviculture and Management 1986 (8th annual) Workshop. Developing site specific forest renewal prescriptions: Grand Prairie, Alberta, Can., aug. 22-23 1986: 1-8 p.
- English, B. 1994. Row scarification planting position trial: first year results. Newfoundland Forest Service. Silviculture and Research Division. Corner Brook, Nfl. 8 p.
- English, B. 1996. Row scarification planting position trial: third year update. Newfoundland Forest Service. Silviculture and Research Division. Corner Brook, Nfl. 4 p.
- Forslund, R.R. et J.M. Paterson 1994. Nondestructive volume estimates of 11-year-old jack pine and black spruce using the power function volume model. For. Chron. 70(6): 762-767.
- Gagné, P. et A. Paquette 2008. Revue de littérature sur la préparation de terrain mécanique pour les mélèzes. Centre d'étude de la forêt, UQAM. Montréal, Québec, 22 p.
- Haeussler, S. 1989. Mounding for site preparation. B.C. Min. of For. FRDA memo no. 100. Victoria, B.C. 12 p.
- Hébert, F., Tremblay, P., Allaire, J., Walsh, D. et D. Lord 2007. Remise en production des milieux ouverts sur

- stations sèches dans la pessière à mousses du Saguenay-Lac-Saint-Jean, Chibougamau Chapais : Résultats 5 ans après plantation. Université du Québec à Chicoutimi, Saguenay, Québec. 37 p.
- Hunt, J.A. et R.G. McMinn 1988. Mechanical site preparation and forest regeneration in Sweden and Finland: implications for technology transfert. B.C. Ministry of Forests and Lands. Victoria, B.C. 58 p.
- Kirk, R.E. 1982. Experimental design : procedures for the behavioral sciences. Second Edition. Brooks/Cole, Belmont, Calif. 911 p.
- Macadam, A. et D. Henderson 2006. Disk trenching for pine and spruce in the SBS and ESSF: result at five years, B.C. Ministry of Forests. Research Note. 4 p.
- Marek, K.I. 1986. Growth of *Pinus contorta* Dougl. on three microsites produced by the Bräcke Moulder on three site types in Northern Sweden. PhD thesis, Lakehead University School of Forestry. Thunder Bay, Ont. 59 p.
- Mattson, S. et U. Bergsten 2003. *Pinus contorta* growth in northern Sweden as affected by soil scarification. New For. 26: 217-231.
- McMinn, R.G. et I.B. Hedin 1990. Site preparation mechanical and manual. Chap. 12. *Dans* Regenerating British Columbia's forests. D.P. Lavender, R. Parish, C.M. Johnson, G. Montgomery, A. Wise, R.A. Willis et D. Winston eds. Univ. of British Columbia Press, Vancouver: 150-163.
- Orlander, G., Gemmel, P. et J. Hunt 1990. Site preparation: a Swedish overview. Victoria, B.C. Ministry of Forests. 61 p.
- Orlander, G., Hallsby, G., Gemmel, P. et C. Wilhelmsson 1998. Inverting improves establishment of *Pinus contorta* and *Picea abies* – 10 years results from a site preparation trial in Northern Sweden. Scand. J. For. Res. 13: 160-168.
- Plante, M. 1987. Plantation sur terrain scarifié au Bräcke monticule. Projet 261-86-057. Rapport technique et financier. MRNF, Unité de gestion (26) Chibougamau, Chibougamau, Can. 14 p.
- Prégent, G. et S. Végiard 2000. Rendement anticipé des plantations d'épinette noire dans les domaines écologiques de la pessière noire. MRNF. Note de recherche forestière no. 109. Ste-Foy, Québec. 11 p.
- Prégent, G. et Y. Lévesque 2001. Bilan de l'établissement des placettes pour la mesure des effets réels des plantations d'épinette, de mélèze laricin et de pin gris. Rapport interne no. 470. MRN, Dir. Rech. For. Gouvernement du Québec. 59 p.
- Prégent, G. et R. Poliquin 2006. Bilan du second mesurage de la mesure des effets réels des plantations d'épinette blanche, noire, rouge et de Norvège, de mélèze laricin et de pin gris. Gouvernement du Québec. Ministère des Ressources naturelles et de la Faune. Direction de la recherche forestière. Ste-Foy, Québec. Rapport interne no. 491. 54 p.
- Prégent, G., Bertrand, V. et L. Charrette 1996. Tables de rendement pour les plantations d'épinette noire au Québec. MRN. Mémoire de recherche forestière no. 118. Ste-Foy, Québec. 70 p.
- Prescott, C.E.D., Maynard, G. et R. Laiho 2000. Humus in northern forests: friend or foe ? For. Ecol. Manage. 133(1-2): 23-36.
- Prévoist, M. 1992. Effet du scarifiage sur les propriétés du sol, la croissance des semis et la compétition: revue des connaissances actuelles et perspectives de recherche au Québec. Ann. des Sci. For. 49 : 277-296.
- Prévoist, 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.
- Prévoist, M. et D. Dumais 2003. Croissance et statut nutritif de marcottes, de semis naturels et de plants d'épinette noire à la suite du scarifiage : résultats de 10 ans. Can. J. For. Res. 33(1): 2097-2107.
- Quinn, G.P. et M.J. Keough 2002. Experimental design and data analysis for biologist. Cambridge University Press, Cambridge UK. 537 p.
- Ryans, M. et B. Sutherland 2001. Site preparation – mechanical. *Dans* Regenerating the canadian forests: principles and practices for Ontario. R.G. Wagner et S.L. Colombo eds. Fitzhenry & Whiteside, Markham: 177-199.
- SAS Institute Inc. 2009. JMP® 8, Statistics and Graphics Guide, Second Edition. SAS Institute Inc. Cary, NC.1230 p.
- Saucier, J.P., Grondin, A., Robitaille, A., Gosselin, C., Morneau, P., Richard, J.H., Brisson, J., Sirois, L., Leduc, A., Morin, H., Thiffault, É., Gauthier, S., Lavoie, S. et S. Payette 2009. Écologie forestière. *Dans* Ordres des Ingénieurs forestiers du Québec, Manuel de foresterie, 2ième édition. Ouvrage collectif. Editions Multimonde. Québec : p. 165-316.
- Saville, D.J. 1990. Multiple comparison procedures: the practical solution. Amer. Stat. 44(2): 174-179.
- Scherrer, B. 1984. Biostatistique. Gaetan Morin Éditeur, Chicoutimi, Can. 850 p.

- Shapiro, S.S. et M.B. Wilk 1965. An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika* 52: 591–611.
- Smith, C.R., Sutherland, B.J. et S. Andersen 1989. Practice and biology of mechanical site preparation : why bother ? *Dans Proc. of a workshop*, Fort Frances, Ontario, sept 27-28, 1988. Northwestern Ontario Forest technology development Unit. Thunder Bay and Kenora, Ontario. Technical Workshop Report no. 2: 4-27.
- Stjernberf, E. 1991. Planter productivity in prepared and unprepared ground: a case study. *Silv. Techn. Note TN-162*. FERIC, Vancouver, B.C.
- Sutherland, B.J. et F.F. Foreman 1995. Guide to the use of mechanical site preparation equipment in Northwestern Ontario. Natural Resources Canada, Can. For. Serv., Great-Lakes Forestry Center. Sault Sainte Marie, Ont. 186 p.
- Sutton, R.F. 1991. Mounding site preparation for jack pine and black spruce in boreal Ontario : five-year results. Great Lakes Forestry Centre. Forestry Canada-Ontario Region. Sault Ste Marie, Ont. 42 p.
- Sutton, R.F. 1993. Mounding site preparation: a review of European and North American experience. *New For.* 7: 151-192.
- Thiffault, N. 2005. Choix d'un microsite sur sol scarifié en forêt boréale – quelques remarques. *MRNF. Ste-Foy, Québec*. 6 p.
- Thiffault, N, Jobidon, N. et A.D. Munson 2003a. Performance and physiology of large containerized and bare-root seedlings in relation to scarification and competition in Quebec (Canada). *Ann. Sci. For.* 60: 645-655.
- Thiffault, N., Roy, V., Prigent, G., Cyr, G., Jobidon, R. et J. Ménérier 2003b. La sylviculture des plantations résineuses au Québec. *Nat. Can.* 127(1) : 63-80.
- Thiffault, N., Cyr, G., Prigent, G., Jobidon, R. et L. Charrette 2004. Régénération artificielle des pessières noires à éricacées : effet du scarifiage, de la fertilisation et du type de plants après 10 ans. *For. Chron.* 80(1) : 141-149.
- Thiffault, N., Munson, A.D., Fournier, R. et R. Bradley 2005. La relation éricacées – conifères bonheur d'oppression ? *Nat. Can.* 129(2) : 57-61.
- von der Gonna, M.A. 1992. Fundamentals of mechanical site preparation. FRDA report 178. B.C. Ministry of Forests. Victoria, BC. 27 p.

ANNEXE Formules utilisées

Volume d'une tige

Le volume de la tige des épinettes noires a été calculé en prenant la formule d'un paraboloidé décrit dans [Forslund et Paterson \(1994\)](#) :

$$V_{DHP} = 1/2 (1 - 3/H)^{(-1)} \pi (DHP^2/4) H C \quad \text{où}$$

V_{DHP} : volume en dm^3 ;

H : la hauteur de l'arbre en m;

DHP : le diamètre à hauteur de poitrine en cm;

C : une constante égale à 0,1 pour obtenir des unités de volume en dm^3 .

IQS et rendement prédits par les tables de rendement

Les huit arbres les plus grands ont été choisis par type de microsite pour calculer la hauteur des dominants correspondants aux 200 plus hautes tiges à l'hectare. Le modèle suivant tiré de [Prégent et al. \(1996\)](#) a été utilisé pour calculer l'indice de qualité de station (IQS) :

$$IQS = \frac{Hdo}{0,003613279(Age^{1,904730104})0,980710034^{Age}} \quad \text{où}$$

IQS : indice de qualité de station prédit (m), âge de référence à 25 ans;

Hdo : hauteur dominante (m);

Age : Âge total (années en pépinière et en plantation).

Les modèles suivants tirés de [Prégent et al. \(1996\)](#) ont été utilisés pour calculer la surface terrière totale et la surface terrière marchande:

$$Gt = \left[-0,186304 + (0,866568Hd) - (0,025474Hd^2) - (0,483665ESP) \right]^2 - 1$$

$$Gm = -5,08195 + (1,095841Gt)$$

Gt : surface terrière totale prédite (m^2/ha);

Gm : surface terrière marchande prédite (m^2/ha);

Hd : hauteur dominante (m);

ESP : espacement initial moyen entre les plants (m).

Les équations suivantes tirées de [Prégent et al. \(1996\)](#) ont été utilisées pour calculer le volume total et marchand par hectare :

$$Vt = \left[-0,696772 + (0,319922Gt) + (0,464719Hd) - (0,010687Gt(Hd)) + (0,274384ESP) \right]^2$$

$$Vm = -55,651588 + (0,851779Gt) - (0,008986Hd) + [0,248131Gt(Hd)] + (20,775526ESP)$$

Vt : volume total prédit (m^3/ha);

Vm : volume marchand prédit (m^3/ha);

Gt : surface terrière totale (m^2/ha);

Hd : hauteur dominante (m);

ESP : espacement initial moyen entre les plants (m).

