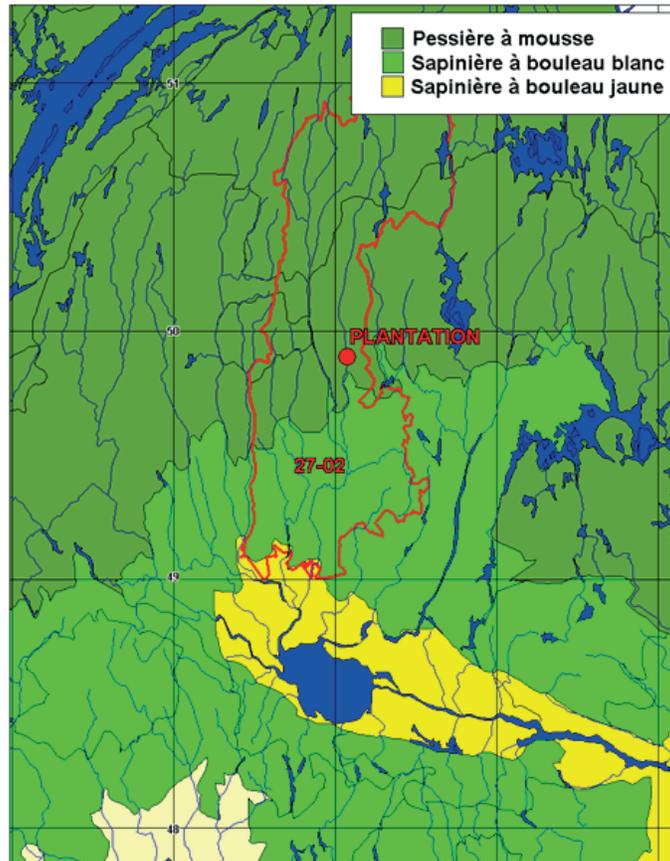


**CALCULS DE L'IQS ET DU VOLUME MARCHAND À 40 ANS
D'UNE PLANTATION EXPÉRIMENTALE DE PINS GRIS:
COMPARAISONS ENTRE
LES PLANTS DE TRÈS PETITES DIMENSIONS
ET
CONVENTIONNELS**

Denis Walsh

Daniel Lord



SEPTEMBRE 2015

Ce document est disponible en format PDF sur le site **Constellation** à l'adresse suivante : <http://constellation.uqac.ca>
Constellation, le dépôt institutionnel de l'Université du Québec à Chicoutimi, est une archive numérique dédiée au rassemblement, à la diffusion et à la préservation de la production intellectuelle de l'ensemble de la communauté universitaire. **Constellation** offre aux chercheurs, auteurs et créateurs de l'UQAC un rayonnement et une diffusion sur l'ensemble du Web.

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

Pour obtenir une copie imprimée de ce document, adressez votre demande à :

Université du Québec à Chicoutimi

Département des Sciences fondamentales

a/s de Daniel Lord

555, boulevard de l'Université

Chicoutimi, Québec, G7H 2B1

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

Courrier électronique : Daniel_Lord@uqac.ca

**CALCULS DE L'IQS ET DU VOLUME MARCHAND À 40 ANS
D'UNE PLANTATION EXPÉRIMENTALE DE PINS GRIS:
COMPARAISONS ENTRE
LES PLANTS DE TRÈS PETITES DIMENSIONS
ET
CONVENTIONNELS**

Par :

Denis Walsh, M. Sc., professionnel de la recherche
Daniel Lord, Ph. D., professeur
Université du Québec à Chicoutimi
Département des Sciences fondamentales
555, boulevard Université
Chicoutimi, Québec. G7H 2B1

Collaborateur :

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

REMERCIEMENTS

Ce travail a été financé par le Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs du Québec, direction régionale du Saguenay-Lac-Saint-Jean. Les auteurs sont redevables en premier lieu à M. Jean-Pierre Girard anciennement à l'emploi du MFFP (région 02) en tant qu'agent de recherche et de la planification socioéconomique et responsable régional de la production des semences et des plants. C'est M. Girard qui a eu l'idée initiale d'utiliser les récipients IPL-126-25 pour la production de plants forestiers du type PTPD et dont la collaboration et son appui ont été indéfectibles tout au long du projet. Nous adressons aussi nos remerciements à Mme Audrey Murray, technicienne forestière au bureau régional du MFFP, qui a participé à la validation du protocole de mesure en 2014, ainsi qu'aux techniciens forestiers du MFFP, Dominic Paradis et Dany Saint-Gelais, qui ont fait les relevés dendrométriques à l'automne 2014.

RÉSUMÉ

Des plants de pin gris de très petites dimensions (PTPD) ont été cultivés dans des récipients de 126 cavités dont les alvéoles contiennent 25 cm³ de substrat afin de réduire les coûts de production en pépinière, ainsi que lors du transport et de la plantation. Il est possible de produire 1 658 plants par mètre carré avec ce type de récipient comparativement à seulement 852 avec le plus petit récipient conventionnel de 67 cavités de 50 cm³. Ces lots ont été reboisés en 2003 sur une terrasse fluvioglacière xérique située à 128 km au nord du Lac-Saint-Jean. Le dispositif expérimental est formé de cinq blocs aléatoires complets comprenant deux facteurs : le type de plants (126-25, 67-50) et la date de plantation (mai, juin, juillet, août, septembre). Ce rapport présente les résultats des mesures de croissance recueillies entre 2003 et 2009, ainsi que les mesures sur les arbres dominants en 2014 dans le but de calculer les IQS et prédire le volume marchand à 40 ans. Le taux de survie après sept ans en plantation est supérieur à 96 % pour l'ensemble des plants, sauf pour la plantation de mai en 126-25 où le taux de survie était de 75 %. Les arbres dominants des parcelles reboisées en 126-25 sont plus petits de 12 cm après 12 ans en plantation. Par contre, le DHP et le volume de la tige ne diffèrent pas de ceux des lots 67-50 au point de vue statistique. Cette différence de hauteur s'explique par la moins bonne performance de la plantation de mai qui a été affectée par un gel tardif. Selon nos estimations, le volume marchand devrait atteindre 190 m³.ha⁻¹ à 40 ans, ce qui fait de la plantation du Km-128 une des meilleures plantations de pin gris en forêt boréale (33% supérieur) au point de vue du rendement forestier. L'amélioration ces dernières années des méthodes culturales du pin gris dans le récipient 113-25 permettent d'obtenir des plants mieux acclimatés lors de la plantation, pouvant ainsi être reboisés sans danger au printemps, ce qui n'était pas le cas lorsque le dispositif Km-128 a été mis en places en 2003.

Mots-clés : récipient, 126-25, 67-50, plant de très petites dimensions, mini-plant, PTPD, reboisement, pin gris, *Pinus banksiana*, forêt boréale.

SUMMARY

To reduce the costs of production in nursery, transport and planting, jack pine mini-seedlings were grown in 126 cavities containers (25 cm³). It is possible to produce 1658 plants per square meter in this type of container compared to only 852 for 67-50 (50 cm³) container. These lots were planted in 2003 on a glaciofluvial xeric terrace located 128 km north of Lac-Saint-Jean. The experimental design was a randomized complete block design combining two factors: the type of plants (126-25, 67-50) and the date of planting (May, June, July, August, September). This report presents the results of growth measurements collected between 2003 and 2009 as well as the measures on dominant trees taken in 2014, in order to calculate the SI and predict the merchantable volume 40 years after plantation. After seven years in plantation, the overall survival rate is greater than 96 %, except for the 126-25 in the may plantation, where survival rate was 75 % after a summer frost that occurred shortly after planting. Dominant trees from the 126-25 lots are smaller than lots 67-50 by 12 cm, even after 12 years in a plantation. The DHB and the stem volume, however, do not differ between the two at a statistical point of view. This height difference is explained by the poor performance of the may plantation which was affected by a late frost. The merchantable volume is expected to reach 190 m³.ha⁻¹ at 40 years, ranging this plantation among one of the best jack pine plantations (33 % above) in the boreal forest of Quebec. Improvement of the Jack Pine cultivation methods in the 113-25 container during the recent years will result in better acclimated plants for early spring plantations, which was not the case in 2003 when the Km-128 project was initiated.

Keywords: container, 126-25, 67-50, mini-seedling, plantation, jack pine, *Pinus banksiana*, boreal forest.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	iii
RÉSUMÉ.....	v
SUMMARY.....	vii
TABLE DES MATIÈRES.....	ix
INTRODUCTION.....	1
MATÉRIEL ET MÉTHODES.....	2
<i>Production des plants reboisés</i>	2
<i>Localisation et dispositif expérimental</i>	3
<i>Échantillonnages</i>	5
<i>Mesures en 2014 des arbres dominants et estimation de l'IQS à 15 ans</i>	5
<i>Analyses statistiques</i>	6
RÉSULTATS.....	6
<i>Survie et climat</i>	6
<i>Croissance en hauteur et en diamètre</i>	8
<i>Croissance de la biomasse</i>	9
<i>Évolution des concentrations foliaires en N-P-K-Ca-Mg</i>	10
<i>Mesures en 2014 des arbres dominants</i>	12
<i>Calcul de l'IQS</i>	13
<i>Estimation du volume marchand à 40 ans</i>	15
DISCUSSION.....	15
<i>Retombées escomptées</i>	19
CONCLUSION.....	20
RÉFÉRENCES.....	21

INTRODUCTION

Dans la forêt publique du Québec, 68 809 hectares ont été reboisés en 2012-2013 avec la mise en terre de 115,2 millions de plants forestiers (Boulay, 2015). Le pin gris est la deuxième espèce la plus reboisée au Québec après l'épinette noire; 24 millions de pins gris sont mis en terre en moyenne annuellement au cours des dernières années (MRNF, 2010). L'éloignement graduel des parterres de coupes qui sont situés entre 200 et 500 km au nord des pépinières qui produisent les plants forestiers fait en sorte d'augmenter les coûts de la plantation. Les coûts associés à un scénario de plantation varient entre 1 136 \$ et 7 368 \$ par hectare (Collectif, 2014a). Les scénarios non rentables économiquement se retrouvent davantage dans les régions nord du sous-domaine bioclimatique 6 Est et 6 Ouest pour les plantations d'épinette noire (Collectif, 2014a).

Un programme de recherche sur la culture de plants de très petites dimensions (PTPD) comparés aux plants dits conventionnels (Conv.)¹ a été initié en 1997 afin de réduire les coûts de production. Les bilans préliminaires des premières plantations d'épinettes noires cultivées dans le récipient 126-25 et sa version modifiée, le 126-15, se sont avérés prometteurs (Lord et coll., 1999, 2000). La production commerciale a rapidement démarré à la suite du transfert technologique vers les pépinières régionales de plants forestiers, effectué par l'UQAC (Hébert et coll., 2005).

Devant ces résultats intéressants, il nous a semblé pertinent d'entreprendre des études sur la faisabilité de reboiser les parterres de coupe de la forêt boréale avec des PTPD de pin gris. La culture du pin gris dans des récipients possédant de petites alvéoles de 25 cm³ et durant une période plus courte serait une solution à envisager pour réduire les coûts de la production en pépinière, du transport et du reboisement. Le reboisement de plants cultivés dans de petites alvéoles durant 7 à 10 semaines est une pratique courante en Scandinavie (Nilsson et coll., 2010). Le pin sylvestre et l'épinette de Norvège sont cultivés dans des récipients de 10-20 ml de volume à des densités de 1 500 à 2 000 plants/m² (Lindström et coll., 2005).

La durée de la culture, la densité (nombre de semis par m²), le volume et la forme de l'alvéole modulent l'architecture de la tige et du système racinaire d'une manière différente

1. (MRN, 2000).

pour chaque espèce (Chapman et Colombo, 2006; Colombo et Chapman, 2005; Dominguez-Lerena et al., 2006; Harris, 1978; Kinghorn, 1978; Persson, 1978; Townend et Dickinson, 1995). La performance sur le site de reboisement est directement reliée à la morphologie du plant (Carlson et Endean, 1976; Endean et Carlson, 1975; Lindström et Rune, 1999; Stefansson, 1978). Pour cette raison, on ne peut pas transférer directement les connaissances et les techniques culturelles développées pour l'épinette noire en 126-25 vers la culture du pin gris dans ce type de récipient. Une première plantation expérimentale réalisée en 2003, le projet Km-128, a permis de tester la faisabilité de la culture du pin gris en récipients 126-25 et la viabilité d'une plantation de ce type en forêt boréale (Walsh et Lord, 2005).

Ce dispositif expérimental comprend des placettes reboisées avec des plants de pin gris cultivés en 126-25 et en 67-50, mises en terre à différentes dates de la saison de reboisement. Les expériences antérieures avec l'épinette noire ont démontré que la date de plantation a un effet significatif sur la survie et la croissance des plants (Walsh et Lord, 2015d, Walsh et coll., 2002, 2011). En forêt boréale, la courte période sans gel limite la durée de la saison de plantation dans sa portion nordique. Le climat y étant plus rigoureux, la fenêtre temporelle visée par les gestionnaires s'étend de préférence entre la mi-juin et la fin août. Connaissant les conditions climatiques très froides du secteur de reboisement visé et sachant que le gel pourrait être le facteur limitant l'emploi des PTPD, nous avons testé ce nouveau type de plants sur une période de plantation plus étendue que ce qui est normalement prescrit sous ses latitudes. Ils seraient avantageux de commencer les plantations à la fin de mai et les prolonger jusqu'en septembre afin d'optimiser l'utilisation de la main d'oeuvre saisonnière et de rattraper les retards qui peuvent survenir au cours de la saison de plantation régulière, particulièrement lorsque les feux de forêt sont abondants.

L'évaluation du potentiel forestier est nécessaire pour planifier l'utilisation des ressources et pour guider l'aménagement des forêts. En Amérique du Nord, l'indice de qualité de station (IQS) est la mesure quantitative la plus souvent utilisée pour exprimer et évaluer le potentiel de croissance d'un peuplement forestier (Alemdag, 1991). La qualité de la station est une variable importante en foresterie; on peut espérer une croissance et un rendement élevé des peuple-

ments situés sur une station fertile ([Ordre des ingénieurs forestiers du Québec 1996](#)). Au Québec, [Bolghari et Bertrand \(1984\)](#) ont établi les tables de rendement pour le pin gris selon les indices de qualité de station et l'espacement initial moyen entre les plants. C'est toujours leurs algorithmes qui sont utilisés au Québec pour établir les tables de rendement qui servent à prédire les volumes de bois du pin gris au bureau du forestier en chef du Québec ([Poulin, 2013a, 2013b, 2013c](#)).

Les tables de rendement sont calculées à partir de l'information tirée des placettes-échantillons temporaires des programmes d'inventaires décennaux québécois ([Pothier et Savard 1998](#)). Les plantations expérimentales comme celle du Km-128 ne sont donc pas représentées dans cet échantillonnage et nous ne connaissons donc pas le volume de bois qui pourrait théoriquement être récolté en reboisant avec ce type de plant. C'est pour cette raison qu'une campagne de mesurage a été réalisée à l'automne 2014 afin de calculer les IQS et estimer le volume marchand qui pourrait être récolté sur une rotation de 40 ans. L'IQS et le volume marchand de chaque parcelle ont été calculés à partir des modèles de croissance courant au Québec ([Bolghari et Bertrand, 1984](#)).

Le dispositif expérimental qui a été mis en place en 2003 au kilomètre 128 de la route forestière qui traverse le TFD-Mistassini au nord du Lac-Saint-Jean est la plus vieille plantation de pins gris cultivées dans des récipients dont les cavités sont plus petites que 50 cm³. Il est donc primordial d'assurer un suivi de la croissance de ces plants afin d'avoir une idée de l'évolution des peuplements futurs qui seront générés avec ce type de récipient. Une campagne de mesurage a été entreprise à l'automne 2014 par le MFFP en collaboration avec l'UQAC afin de déterminer les IQS de ces parcelles. Les mesures effectuées depuis 12 ans sur cette plantation n'ont jamais fait l'objet d'une publication, à l'exception de résultats très préliminaires présentés dans le cadre d'un congrès ([Walsh et Lord, 2005](#)). Une équipe de deux techniciens du MFFP ont mesuré la hauteur et le DHP des arbres dominants de chaque parcelle expérimentale à l'automne 2014 pour compléter la base de données déjà créée. Ce rapport a pour but de fournir à nos partenaires du bureau régional du MFFP, les analyses statistiques des mesures réalisées depuis 2003. Les facteurs expérimentaux du dispositif sont :

- le type de pins gris reboisés : cultivés en 126-25 ou en

67-50;

- la date de la plantation : mai, juin, juillet, août et septembre.

Cette démarche nous permettra de valider ou d'infirmer trois hypothèses scientifiques sur lesquelles a été construit le dispositif expérimental du Km-128 :

- Il n'y a pas de différence significative entre le patron de croissance en plantation des plants de pin gris cultivés en récipient de 25 cm³ et ceux en récipient de 50 cm³.
- Il n'y a pas de différence significative entre des plants reboisés en mai, juin, juillet, août ou septembre.
- Il n'y a pas d'interaction entre le type de plants reboisés et la date de plantation.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Production des plants reboisés

Les plants ont tous été cultivés en serre sur le campus de l'Université du Québec à Chicoutimi (48°25'N, 71°04'O) en 2002-2003. Les PTPD ont été produits dans des récipients de 126 cavités dont le volume est de 25 cm³ (**Figure 1**). Le récipient de 25 cm³ est manufacturé par la firme IPL sous le nom de Rigi-pot 126 x 25CC ([Anonyme, 2010](#)). Ce type de récipient était utilisé antérieurement par la DPSP pour le repiquage des plants à racines nues ([J.-P. Girard, MFFP, communication personnelle](#)). Des plants produits dans le récipient conventionnel (Conv.) de 67 cavités de 50 cm³ (67-50) ont été utilisés comme plants témoins; la densité de culture est de 852 plants.m⁻² pour les 67-50 et de 1 658 plants.m⁻²

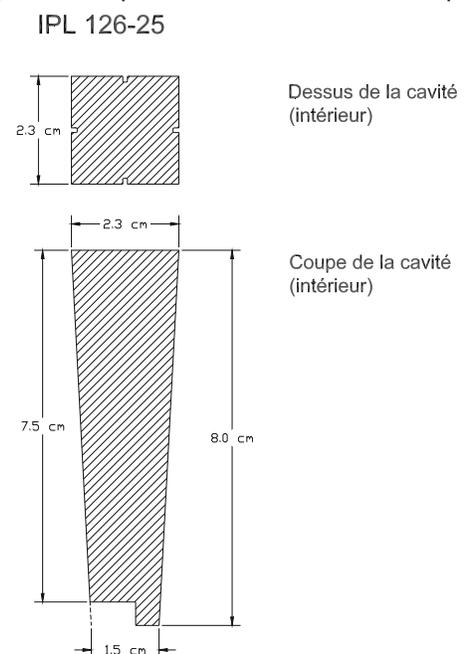


Figure 1. Schéma d'une cavité du récipient IPL 126-25.

pour les 126-25 (**Figure 2**).

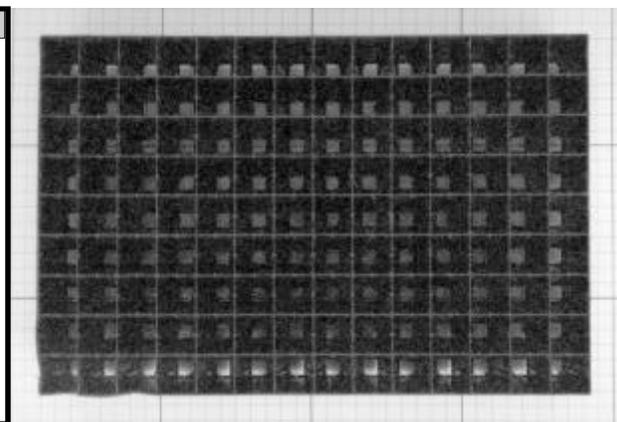
Les semences de pin gris provenaient d'un peuplement naturel et ont été fournies par le Ministère des Ressources naturelles du Québec (PIG-NO-140-1-0). Entre trois et quatre graines ont été semées dans chaque cavité remplie de tourbe horticole et recouvertes de silice. L'éclaircie a eu lieu après deux semaines de culture. Les semis étaient fertilisés à partir de la deuxième semaine en utilisant une solution Hoagland modifiée (Epstein, 1972) contenant 224 ppm d'azote, 62 ppm phosphore et 235 ppm de potassium. Les récipients 126-25 étaient fertilisés deux fois par semaine, les 67-50 une seule fois par semaine. La dormance était induite en diminuant la photopériode à huit heures et en interrompant la fertilisation durant deux semaines (Bigras et D'Aoust, 1992). Durant la période d'endurcissement ultérieure, la concentration en azote a été réduite à 100 ppm et les deux types de récipient étaient fertilisés une seule fois par semaine. La température était maintenue entre 20 et 25°C le jour et 17°C la nuit tandis que la photopériode était maintenue à 18 heures par des lampes HPS, jusqu'à la période de dormance. L'endurcissement se poursuivait à l'extérieur des serres à partir de la fin-mai. Les lots 126-25

et 67-50 ont été semés à des intervalles de quatre semaines pour être synchrones lors des différentes plantations réalisées tous les mois, de mai à septembre (**Figure 3**). Les PTPD ont été produits en 16 semaines : six semaines de croissance exponentielle, deux semaines de dormance et huit semaines d'endurcissement (6+2+8) alors que les 67-50 ont été produits en 26 semaines (12+2+12). Ce scénario visait à obtenir des plants de gabarits assez similaires entre les dates de plantation pour chaque type de plants. Des échantillonnages préliminaires ont été effectués au début de chaque date de plantation (**Tableaux 1 & 2**).

Localisation et dispositif expérimental

L'étude a été réalisée à plus de 128 km au nord du Lac-Saint-Jean (49°54'N, 71°56'O), dans le domaine bioclimatique de la pessière noire à mousses de l'Est, région écologique 6-h-T (Saucier *et al.*, 2000). Le climat régional est de type subpolaire subhumide continental, caractérisé par une très courte saison de croissance. Les précipitations estivales sont en moyenne de 946 mm. La température annuelle moyenne est de -1.8°C, le nombre de jours sans gel est de 134 et le nombre moyen de degrés-jours au-dessus de 5°C est de 971 (Environnement Canada, 2013). Les données météorolo-

126-25 (IPL Inc.)	
Longueur	: 34,3 cm
Largeur	: 22,2 cm
Profondeur	: 8,0 cm
Surface	: 0,076 m ²
Matériaux	: Polyéthylène haute densité
Nombre de cavités	: 126
Diamètre de la cavité	: ---
Côté de la cavité	: 2,3 cm
Volume de la cavité	: 25 cm ³
Plants au m ²	: 1 658
Efficacité des arrosages	: nd



67-50 (IPL Inc.)	
Longueur	: 35,4 cm
Largeur	: 22,2 cm
Profondeur	: 9,0 cm
Surface	: 0,078 m ²
Matériaux	: Polyéthylène haute densité
Nombre de cavités	: 67
Diamètre de la cavité	: 3,2 cm
Côté de la cavité	: ---
Volume de la cavité	: 50 cm ³
Plants au m ²	: 852
Efficacité des arrosages	: nd

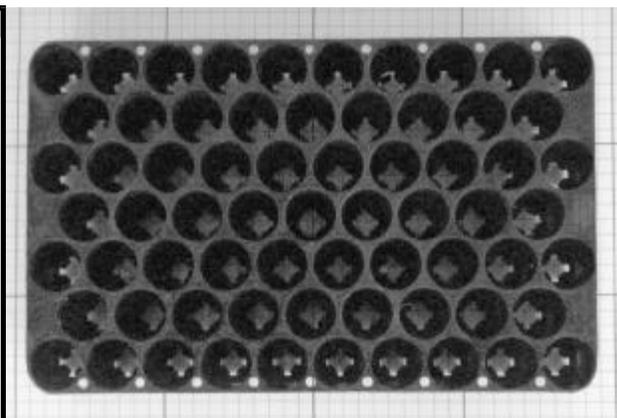


Figure 2. Caractéristiques des récipients 126-25 et 67-50 utilisés dans le dispositif expérimental Km-128.

giques ont été collectées durant toute la saison de la plantation 2003 à la station L24 de l'UQAC située à 30 km du site de reboisement.

Les lots ont été plantés en 2003 sur une terrasse fluvio-gla-

cière xérique située dans l'unité de gestion 27-02 (**Figure 4**). Le peuplement mixte original de pins gris et d'épinettes noires a été récolté en 2001 après un feu. Le site de plantation a été préparé à l'automne 2002 en utilisant un scari-

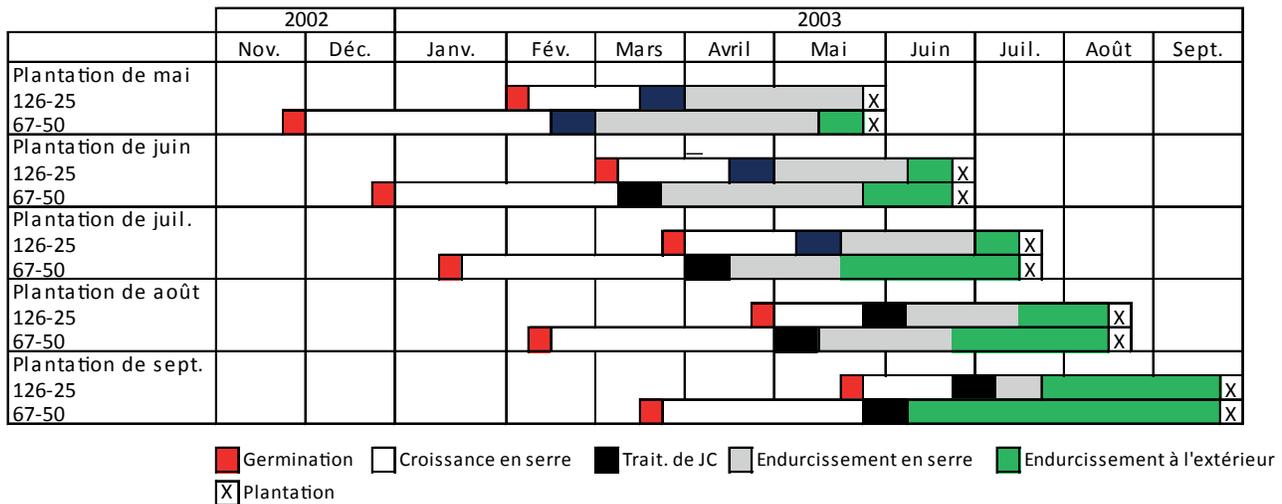


Figure 3. Calendrier de culture des deux types de plants prévus pour les cinq dates de plantation.

Tableau 1. Caractéristiques initiales des deux types de semis lors des plantations mensuelles. Moyenne ± écart-type.

Type de semis	Date de plantation	Nb. de plants	Hauteur (cm)	Diamètre (mm)	H/D (cm/mm)	Masse sèche totale (mg)	Rapport PnP*	Masse Tige/Racines
126-25	Mai	30	14,2 ± 2,4	1,4 ± 0,2	10,6 ± 1,8	554 ± 157	1,3 ± 0,2	4,2 ± 0,8
126-25	Juin	30	12,7 ± 1,8	1,5 ± 0,2	8,8 ± 1,5	602 ± 180	1,1 ± 0,1	3,3 ± 0,5
126-25	Juil.	30	13,0 ± 2,7	1,5 ± 0,2	9,0 ± 1,8	608 ± 151	0,9 ± 0,2	2,7 ± 0,7
126-25	Août	30	12,4 ± 2,3	1,5 ± 0,2	8,5 ± 1,2	483 ± 152	0,8 ± 0,2	1,7 ± 0,4
126-25	Sept.	30	12,6 ± 2,8	1,2 ± 0,2	10,3 ± 2,5	381 ± 164	0,6 ± 0,2	1,4 ± 0,6
67-50	Mai	30	13,9 ± 2,4	2,1 ± 0,4	6,9 ± 1,6	1481 ± 518	1,4 ± 0,2	3,8 ± 0,7
67-50	Juin	30	15,6 ± 2,8	2,1 ± 0,4	7,6 ± 1,2	1928 ± 833	1,5 ± 0,2	3,6 ± 0,6
67-50	Juil.	30	16,2 ± 2,8	2,5 ± 0,4	6,6 ± 1,1	2114 ± 666	1,0 ± 0,1	2,5 ± 0,4
67-50	Août	30	16,4 ± 2,4	2,7 ± 0,4	6,2 ± 1,0	1976 ± 618	0,6 ± 0,1	1,7 ± 0,3
67-50	Sept.	30	16,3 ± 2,6	2,5 ± 0,3	6,7 ± 1,0	1792 ± 548	0,6 ± 0,1	1,6 ± 0,9

* : PnP est le rapport de la biomasse photosynthétique sur la biomasse non-photosynthétique.

Tableau 2. Contenu foliaire initial en N-P-K-Ca-Mg des deux types de semis lors des plantations mensuelles. Moyenne de trois répétitions ± écart-type.

Type de semis	Date de	Nb. de rép.	N (%)	P (%)	K (%)	Ca (%)	Mg (%)
126-25	Mai	3	1,7 ± 0,1	0,22 ± 0,00	0,99 ± 0,11	0,28 ± 0,01	0,12 ± 0,01
126-25	Juin	3	1,5 ± 0,2	0,20 ± 0,01	1,00 ± 0,10	0,27 ± 0,01	0,12 ± 0,01
126-25	Juil.	3	1,4 ± 0,0	0,18 ± 0,01	0,87 ± 0,02	0,31 ± 0,02	0,11 ± 0,00
126-25	Août	3	1,7 ± 0,0	0,19 ± 0,01	0,84 ± 0,02	0,35 ± 0,01	0,12 ± 0,01
126-25	Sept.	3	1,5 ± 0,1	0,23 ± 0,02	1,13 ± 0,12	0,41 ± 0,02	0,13 ± 0,01
67-50	Mai	3	1,5 ± 0,1	0,18 ± 0,00	0,72 ± 0,02	0,25 ± 0,01	0,11 ± 0,01
67-50	Juin	3	1,1 ± 0,1	0,15 ± 0,01	0,72 ± 0,05	0,26 ± 0,01	0,12 ± 0,00
67-50	Juil.	3	1,1 ± 0,0	0,14 ± 0,01	0,61 ± 0,01	0,29 ± 0,02	0,11 ± 0,01
67-50	Août	3	1,2 ± 0,1	0,16 ± 0,02	0,64 ± 0,05	0,40 ± 0,02	0,12 ± 0,01
67-50	Sept.	3	1,3 ± 0,1	0,20 ± 0,00	0,78 ± 0,05	0,43 ± 0,03	0,15 ± 0,00

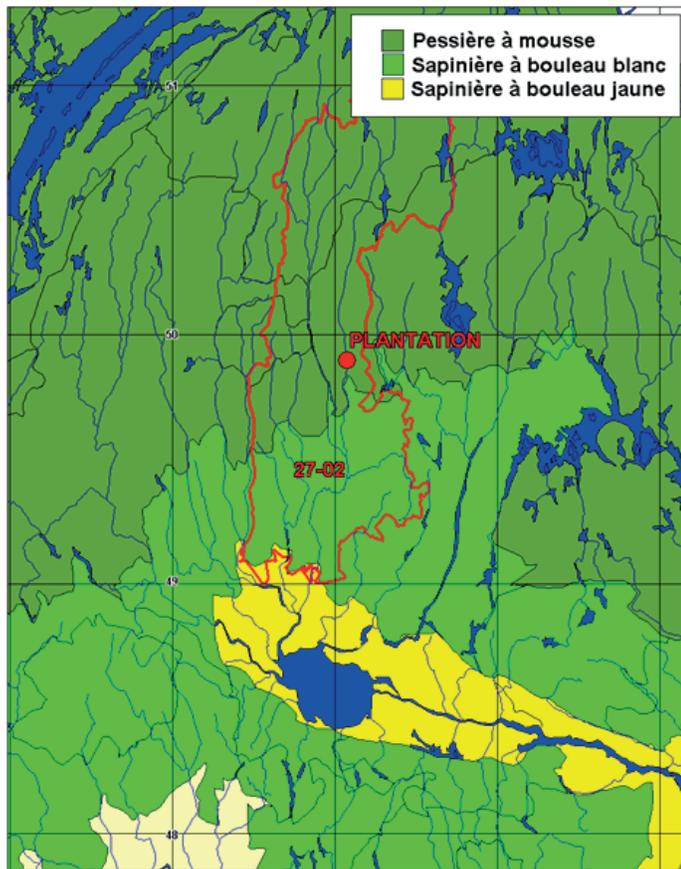


Figure 4. Localisation du site de plantation Km-128 dans l'U.G. 27-02.

ficateur à disques. Le dispositif expérimental est formé de cinq blocs aléatoires complets comprenant deux facteurs; la classe de plants (126-25, 67-50) et les dates de plantation (mai, juin, juillet, août, septembre) : 5 blocs x 2 types de récipient x 5 dates de plantation, pour un total de 50 unités expérimentales (U.E.). Chaque parcelle expérimentale comprenait 125 semis, dont 100 permanents servant à déterminer le pourcentage annuel de mortalité tandis que les 25 autres ont été prélevés lors des échantillonnages destructifs. Tous les plants étaient distancés de deux mètres sauf les 25 plants des échantillonnages destructifs qui étaient intercalés aléatoirement à mi-distance entre les plants permanents. Chaque parcelle expérimentale était entourée d'une zone de bordure constituée de deux rangs de plants.

Échantillonnages

Le taux de survie a été évalués un mois après la plantation, de même qu'à la fin de la saison de croissance de la première année en plantation et la fin du premier hiver. Le taux de survie a ensuite été évalué après deux, trois et sept ans en plantation. Simultanément, un échantillonnage a été effectué à la fin de la période de croissance (septembre-octobre) en 2003 et 2004 et 2005. Les plants échantillonnés ont été

rapportés au laboratoire pour mesurer la hauteur totale ainsi que le diamètre au niveau du collet. Les biomasses sèches de la cime ainsi que des racines ont été déterminées pour les années 1, 2 et 3 tandis que la masse sèche foliaire était évaluée seulement durant les deux premières années afin d'évaluer le rapport masse photosynthétique sur masse non photosynthétique (PnP). Des analyses chimiques des principaux éléments minéraux (N, P, K, Ca et Mg) ont été effectuées par le laboratoire de chimie du ministère des Ressources naturelles du Québec sur les aiguilles de la pousse annuelle d'un échantillon représentatif des cinq plants/parcelle. Un mesurage non destructif de la hauteur et du diamètre a été réalisé en 2009 sur cinq plants/parcelle, après sept ans en plantation.

Mesures en 2014 des arbres dominants et estimation de l'IQS à 15 ans

Ce protocole suit les directives décrites dans Bolghari et Bertrand (1984). Douze arbres dominants, sains et sans défaut extérieur apparent, ont été sélectionnés aléatoirement dans chaque parcelle expérimentale. Le DHP des arbres dominants a été mesuré précisément avec un gallon circonférentiel et la hauteur avec une perche de mesure à lecture numérique de type « SOKKISHA ». Au total, 600 arbres ont été mesurés.

Le volume de la tige des pins gris a été calculé à partir de la formule d'un cône, décrite dans Forslund et Paterson (1994) :

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

où

V_{DHP} : Volume (dm³).

H : Hauteur de l'arbre (m).

DHP : Diamètre à hauteur de poitrine (cm).

C : une constante égale à 0,1 pour obtenir des unités de volume en dm³.

Les douze arbres dominants sélectionnés dans chaque parcelle ont servi à calculer l'IQS à 15 ans comme décrit dans Bolghari et Bertrand (1984):

$$IQS = Hr \frac{Hob + \frac{CVe}{CVr} He - He}{\frac{CVe}{CVr} He}$$

où

IQS : Indice de qualité de station à 15 ans (m).

H_r : Hauteur dominante à l'âge de référence (15 ans). Elle est estimée à partir de la relation âge-hauteur dominante développée pour chaque essence.

H_{ob} : Hauteur dominante observée (m).

C_{ve} : Coefficient de variation de la hauteur dominante estimé en fonction de l'âge et calculé à partir des équations développées à cette fin.

H_e : Hauteur dominante à un âge donné. Elle est estimée à l'aide de l'équation générale âge-hauteur.

C_{Vr} : Coefficient de variation de la hauteur dominante, à l'âge de référence de 15 ans, estimé à partir de la même équation utilisée pour calculer *C_{ve}*.

$$H = -1,345 + 0,520409 A$$

$$CV = \frac{1}{6,2251 - 17,744 \cdot 0,7635^A}$$

H : Hauteur (m).

CV : Coefficient de variation.

A : âge total des arbres (les années en plantation + les années en pépinière).

I_{QS} : indice de qualité de station à 15 ans (m).

esp : espacement moyen entre les plants (m x m).

Les formules suivantes ont été utilisées pour calculer le diamètre moyen prédit : la surface terrière prédite, le volume total prédit et le volume marchand prédit (Bolghari et Bertrand, 1984) :

$$\bar{D} = -6,877 + 0,554 A + 0,343 I_{QS} + 0,337 I_{QS} \sqrt{esp}$$

$$Gt = -16,586 + 1,2264 \cdot A + 2,8767 \cdot I_{QS} - 4,0034 \sqrt{esp}$$

$$Vt = -1,301 + 2,873 \cdot Gt + 0,148 \cdot Gt \cdot H$$

$$Vm = -18,847 + \frac{90,092}{Vt} + 0,919 \cdot Vt$$

Où

D : Diamètre moyen prédit (cm).

I_{QS} : Indice de qualité de station à 15 ans (m).

esp : Espacement entre les plants (m x m).

G_t : Surface terrière totale du peuplement (m²/ha), arbres de plus de 1,5 cm de DHP.

A : Âge total des arbres (les années en plantation + les années en pépinière).

H : Hauteur (m).

V_t : Volume total du peuplement (m³/ha).

V_m : Volume marchand (m³/ha), diamètre minimum d'utilisation de 9 cm.

L'évolution du volume marchand jusqu'à 40 ans a été calcu-

lée en suivant la méthode décrite dans Bolghari et Bertrand (1984). Les courbes ont été extrapolées jusqu'à 60 ans.

Analyses statistiques

La mortalité durant la première année ainsi que le taux de survie durant les sept premières années en plantation ont tous les deux été analysés selon un plan factoriel en blocs complets en mesures répétées. La procédure REML du modèle mixte de l'analyse de variance a été utilisée à cet effet. Les blocs sont considérés ici comme un facteur aléatoire. Le choix d'un modèle de covariance entre les années de mesure a été basé sur le critère d'Akaike (Littell et coll., 2006). Lors de ces deux analyses, nous avons retenu une matrice de variance-covariance des mesures répétées sans structure particulière (*Unstructured*). Les pourcentages de mortalité ou de survie ont été transformés avant l'analyse de variance, en utilisant la formule de l'arc sinus($\sqrt{\text{proportion}}$), afin de respecter le postulat de la normalité des résidus (Quinn et Keough, 2002).

Les autres variables ont été analysées selon un plan factoriel en tiroir par blocs complets, en utilisant la procédure REML de l'analyse de variance. L'interaction Bloc x Rec x Date a servi d'erreur expérimentale dans le calcul du rapport de *F* pour les facteurs principaux en parcelles principales. L'interaction Bloc x Rec x Date x Temps a été utilisée comme erreur expérimentale des sous-parcelles, pour les mesures prises au cours des années. L'hétéroscédasticité des résidus a été vérifiée graphiquement en examinant la dispersion des valeurs résiduelles en fonction des valeurs prédites et la normalité par le test de Shapiro-Wilk (Montgomery, 1984). Le test de T de Student a été utilisé pour comparer les moyennes lorsqu'un facteur ou une interaction était significatif à 0,05 (Kirk, 1982; Mize et Schultz, 1985). Les moyennes des moindres carrés et les intervalles de confiance à 95% sont présentés dans les figures et les tableaux. La version 12.0.1 du logiciel JmpPro (SAS Institute Inc., Cary, NC, USA) a été utilisée pour toutes les analyses statistiques.

RÉSULTATS

Survie et climat

La température minimale de l'air est descendue sous zéro à trois reprises peu après la première plantation du mois de mai (Figure 5A). La température de l'air est descendue aussi au-dessous de **zéro** en août peu après la troisième

plantation. À partir de la mi-octobre, la température minimale de l'air était pratiquement toujours sous zéro. L'air était particulièrement sec en mai (Figure 5B). Les précipitations étaient peu abondantes en mai et en juin, mais le délai entre la mise en terre des plants et la première averse de pluie variait entre zéro et quatre jours (Figure 5C).

Le taux de mortalité durant la première année variait significativement en fonction du type de plants reboisé, de la date de la plantation et de la période de mesure (Tableau 3). La mortalité était plus élevée chez les plants 126-25 plantés en mai, atteignant 25%, comparativement à seulement 2% chez les plants 67-50 (Figure 6). La mortalité durant l'hiver n'a jamais dépassé 2%, quel que soit le type de plant ou la date de plantation (Figure 6).

La survie ultérieure durant les sept premières années variait significativement entre les types de plants et les dates de plantation (Tableau 4). En fait, la plus grande partie de la va-

riation s'explique par la mortalité élevée dans les parcelles de plants 126-25 reboisés en mai (Figure 7). Par la suite, la mortalité était insignifiante et le pourcentage de survie était supérieur à 96 %, sauf pour la plantation 126-25 de

Tableau 3. Analyse de variance du taux de mortalité enregistré durant trois périodes de temps de la première année en plantation.

Source	d.l.n.	d.l.d.	F	P
Type de récipient (R)	1	40	11,59	0,002
Date de plantation (D)	4	40	9,55	< 0,0001
R x D	4	40	3,33	0,02
Temps (T)	2	39	13,52	< 0,0001
R x T	2	39	3,92	0,03
D x T	8	53	9,57	< 0,0001
R x D x T	8	53	6,07	< 0,0001

d.l.n. : degrés de liberté au numérateur.

d.l.d. : degrés de liberté au dénominateur

F : rapport de F.

P : probabilité du rapport de F.

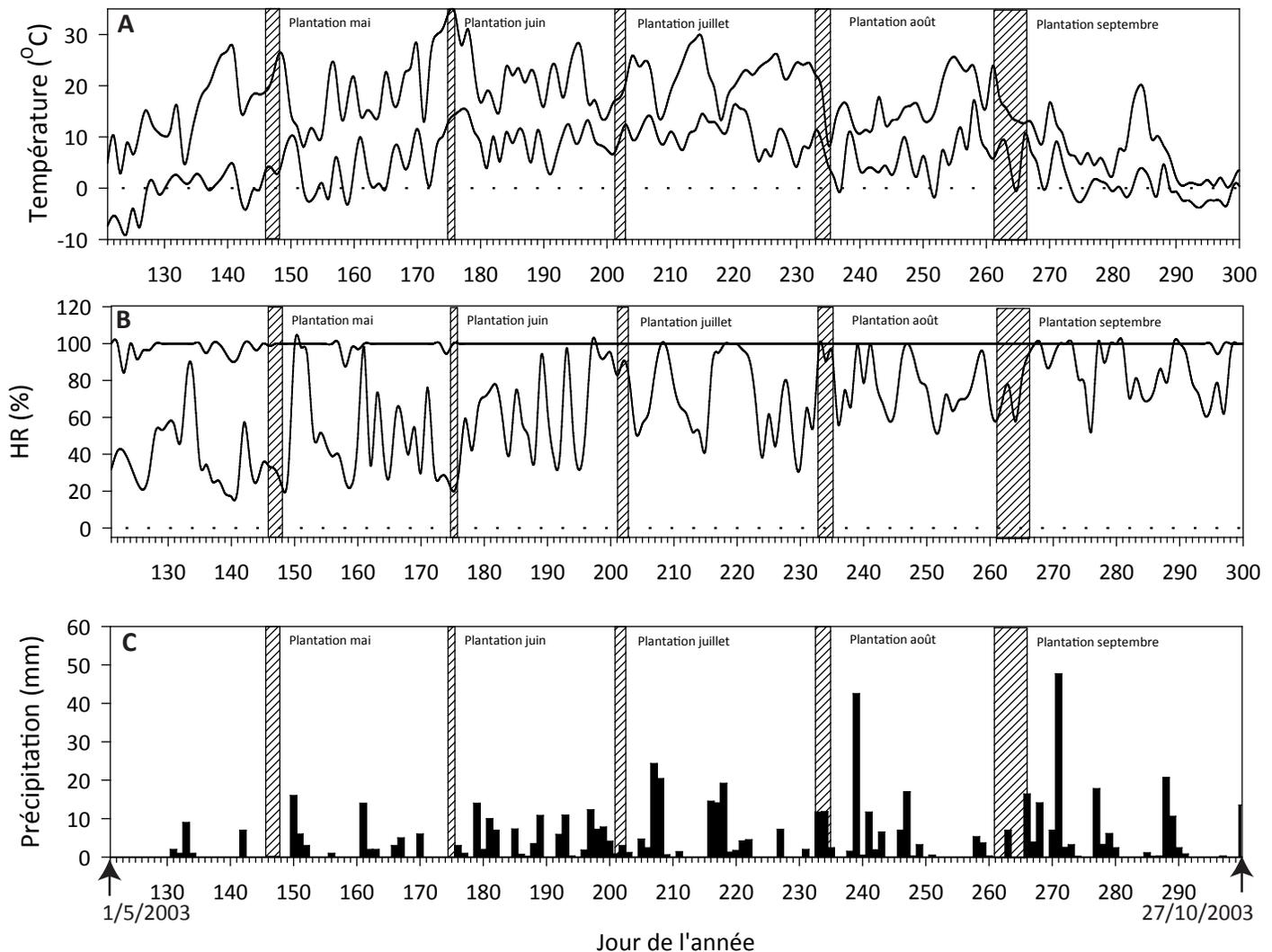


Figure 5. Température minimale et maximale de l'air (A), humidité relative minimale et maximale (B) ainsi que les précipitations quotidiennes (C) mesurées à la station L24 de l'UQAC, située à 30 km du site de plantation.

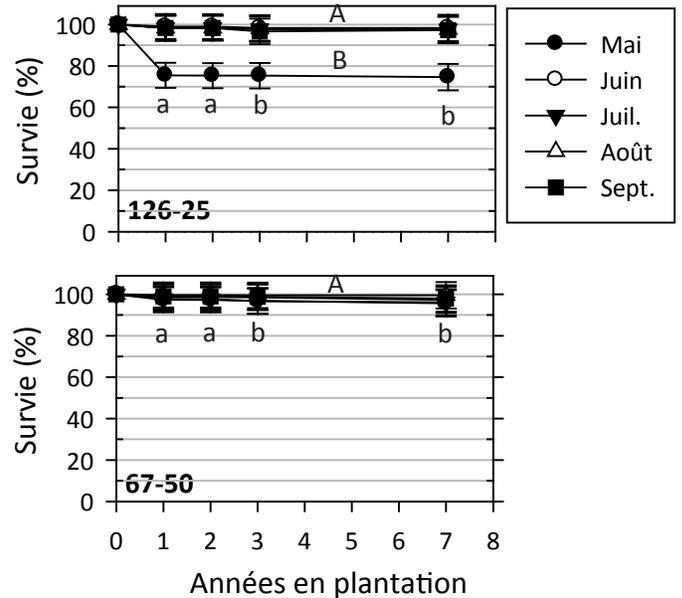
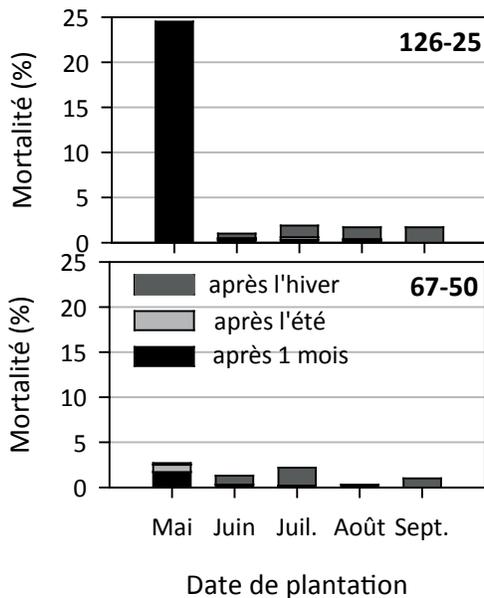


Figure 6. Taux de mortalité après 1 mois, après l'été et après l'hiver de la première année en plantation pour les deux types de plants reboisés et des cinq dates de plantation.

Tableau 4. Analyse de variance du taux de survie au cours des temps enregistré durant les sept premières années en plantation.

Source	d.l.n.	d.l.d.	F	P
Type de récipient (R)	1	40	10,55	0,002
Date de plantation (D)	4	40	10,88	< 0,0001
R x D	4	40	4,20	0,006
Temps (T)	3	38	6,93	0,001
R x T	3	38	0,47	0,70
D x T	12	62	0,69	0,75
R x D x T	12	62	1,02	0,44

mai dont le taux de survie était de 75%, après sept ans en plantation (**Figure 7**).

Croissance en hauteur et en diamètre

L'analyse de variance des mesures de hauteur durant les 12 premières années en plantation montre une interaction significative entre la date de plantation et le temps (**Tableau 5**). La croissance en hauteur diminuait de juin à septembre et les plants reboisés en mai étaient eux aussi plus petits

Figure 7. Évolution du taux de survie au cours des années pour les deux types de plants reboisés et des cinq dates de plantation. Les lettres majuscules indiquent les différences significatives entre les courbes de survie. Les lettres minuscules indiquent les différences significatives entre les dates de mesure. Les barres verticales représentent les intervalles de confiance à 95%.

que ceux reboisés en juin (**Figure 8B**). Les plants reboisés en juin atteignant 5,0 m après 12 ans en plantation tandis que ceux qui avaient été reboisés en août ou septembre mesureraient 4,8 m. Les plants 126-25 étaient plus petits que les 67-50 (**Tableau 5**); après 12 ans en plantation les plants 126-25 mesureraient 4,9 m en moyenne comparativement à 5,0 m pour les 67-50 (**Figure 8A**). L'analyse de variance des mesures du diamètre au collet montre aussi les mêmes effets significatifs (**Tableau 5**). Après sept ans en plantation, le diamètre des plants 126-25 était de 32 mm comparativement à 33 mm pour les 126-25, cette différence n'était cependant plus significative au point de vue statistique (**Figure 9A**). Le diamètre diminuait en fonction de la date de plantation, de 38 mm pour les plants reboisés en mai à 28 mm pour ceux reboisés en septembre (**Figure 9B**).

Tableau 5. Analyses de variance de la croissance en hauteur et en diamètre durant les 12 années qui ont suivi la plantation.

Source	d.l.n.	d.l.d.	Hauteur		Diamètre	
			F	P	F	P
Type de récipient (R)	1	37	12,10	0,001	9,36	0,004
Date de plantation (D)	4	37	9,11	< 0,0001	10,03	< 0,0001
R x D	4	37	0,92	0,46	1,62	0,19
Temps (T)	4	19	4086,37	< 0,0001	650,08	< 0,0001
R x T	4	190	0,75	0,56	0,28	0,84
D x T	16	191	3,34	< 0,0001	3,97	< 0,0001
R x D x T	16	191	0,81	0,67	1,17	0,31

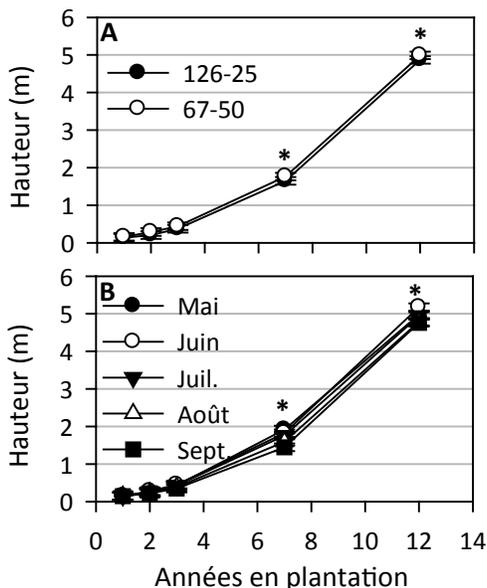


Figure 8. Croissance en hauteur durant les 12 premières années en plantation en fonction du type de plant reboisé (A) ou de la date de plantation (B). Les barres verticales représentent les intervalles de confiance à 95%. * significativement différent à $p < 0,05$.

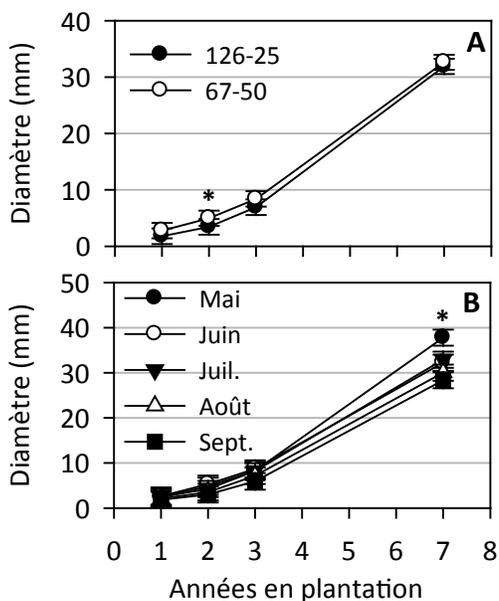


Figure 9. Croissance en diamètre au sol durant les 7 premières années en plantation en fonction du type de plant reboisé (A) ou de la date de plantation (B). Les barres verticales représentent les intervalles de confiance à 95%. * significativement différent à $p < 0,05$.

Croissance de la biomasse

L'analyse de variance de la biomasse sèche de la tige (sur une échelle logarithmique) montre des différences significatives entre les types de plants (Tableau 6). La masse sèche de la tige des 67-50 est significativement plus élevée que celle des 126-25 durant les trois premières années en plantation (Figure 10A). Le fait que l'interaction R x T soit significative indique par contre que les pentes ne sont pas parallèles et que l'écart entre ces deux types de plants dimi-

nuait au cours des années (Figure 10A). Cette interaction n'est pas significative dans le cas des dates de plantation même en l'absence de différences significatives entre les plants reboisés à différentes dates (Tableau 6; Figure 10B). C'est que l'écart demeure constant entre les différents lots durant les trois années du relevé. Après 3 ans en plantation, la masse sèche de la tige était nettement plus élevée chez les plants reboisés en juillet, 984 g, comparativement à 392 g pour ceux reboisés en septembre (Figure 10B). Les mêmes effets significatifs sont observables pour la masse sèche des racines (Tableau 6). La masse sèche des racines des 67-50 était plus élevée que celle des 126-25 au cours des trois premières années, même si l'écart diminuait légèrement avec le temps (Figure 11A). Par contre, les écarts entre les plants reboisés à différentes dates sont demeurés significatifs même après trois ans en plantation (Figure 11B).

L'évolution au cours des années du rapport, masse sèche de la tige sur masse sèche des racines, montre deux interac-

Tableau 6. Analyses de variance de la masse sèche de la tige, des racines et du rapport Tige/Racines, durant les trois premières années en plantation. Les masses sèches ont été transformées en logarithme naturel avant l'analyse.

Source	d.l.n.	d.l.d.	Tige		Racines		Tige/Racines		P
			F	P	F	P	F	P	
Type de récipient (R)	1	34,34	127,23	<0,0001	159,857	<0,0001	17,62	0,0002	
Date de plantation (D)	4	34,33	29,27	<0,0001	9,0842	<0,0001	6,25	0,0007	
R x D	4	34,35	2,41	0,07	1,2638	0,30	0,80	0,53	
Temps (T)	2	8,417	1527,78	<0,0001	99,8444	<0,0001	91,57	<0,0001	
R x T	2	73,86	15,59	<0,0001	3,8804	0,03	6,58	0,003	
D x T	8	73,57	0,74	0,66	0,9539	0,48	3,26	0,003	
R x D x T	8	73,6	0,67	0,71	1,0505	0,41	1,40	0,21	

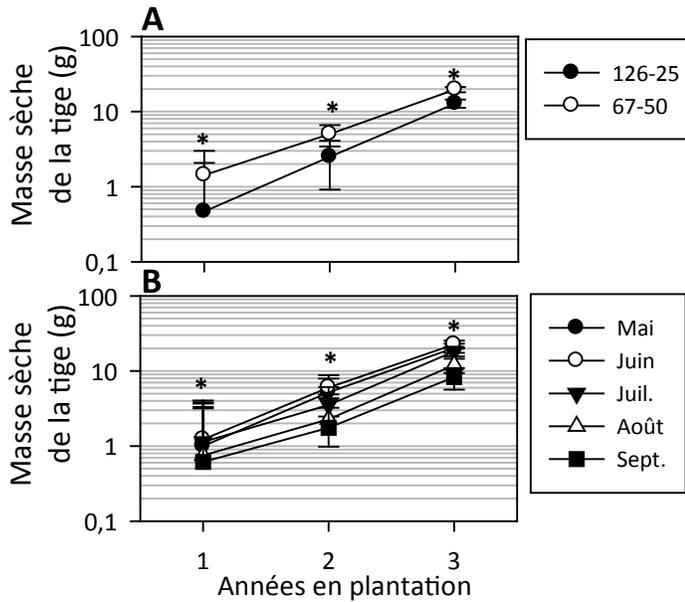


Figure 10. Évolution de la biomasse sèche de la tige (Partie aérienne) durant les trois premières années en plantation. Les barres verticales représentent les intervalles de confiance à 95%. * : significativement différents à $p < 0,05$.

tions significatives : R x T et D x T (**Tableau 6**). Au cours des années, l'allocation du carbone vers la partie aérienne était plus importante, relativement à la partie racinaire, chez les plants 126-25 comparativement aux 67-50 (**Figure 12A**). Les écarts entre les plants reboisés aux différentes dates n'étaient pas significatifs la première année, mais le sont devenus par la suite. Les plants reboisés de mai à juillet ont alloué relativement plus de carbone vers la partie aérienne

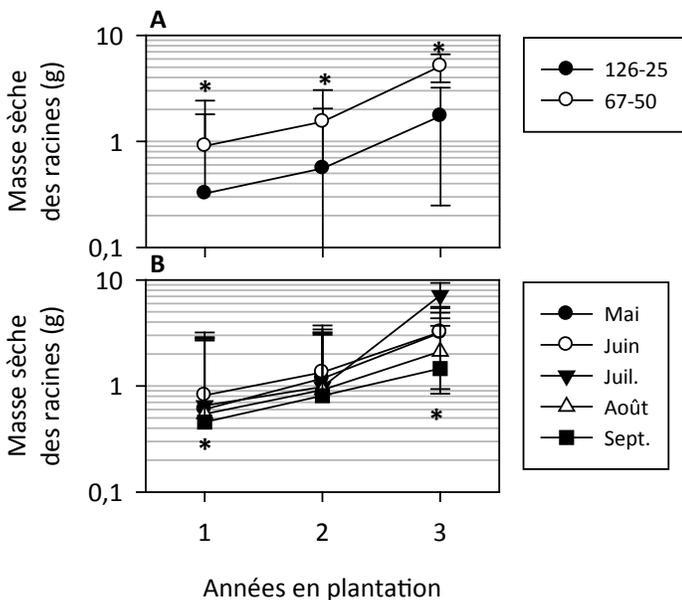


Figure 11. Évolution de la biomasse sèche des racines durant les trois premières années en plantation. Les barres verticales représentent les intervalles de confiance à 95%. * : significativement différents à $p < 0,05$.

que ceux plantés en août ou septembre (**Figure 12B**).

Dans le cas du rapport PnP, l'analyse de variance montre des effets significatifs pour les interactions R x T et D x T (**Tableau 7**). Cet effet s'explique par la forte proportion de la biomasse allouée au système photosynthétique chez les plants 126-25 comparativement aux 67-50 (**Figure 13A**). Simultanément, le rapport PnP des plants reboisés de mai à juillet a augmenté plus rapidement que celui des plants reboisés en août ou septembre (**Figure 13B**).

Évolution des concentrations foliaires en N-P-K-Ca-Mg

Des analyses foliaires des principaux éléments minéraux ont été réalisées à la fin de la période de culture et durant les trois premières années en plantation. Le contenu foliaire en azote (N) variait significativement entre les types de plants et les dates de plantation (**Tableau 8**). Les interactions R x T et D x T sont toutes les deux significatives. On observe un écart significatif entre les types de plants au moment de la plantation en faveur des 126-25, suivi d'une augmentation de N jusqu'à la deuxième année en plantation (**Figure 14A**). Par contre, ces valeurs ont diminué au même niveau à la troisième année pour les deux types de plant. Les plants reboisés en mai avaient une concentration en N significativement plus élevée que les autres plantations (**Figure 14B**). Cet écart s'est maintenu la première année pour disparaître les années suivantes à la suite de l'augmentation du N foliaire la deuxième année des lots reboisés de juin à

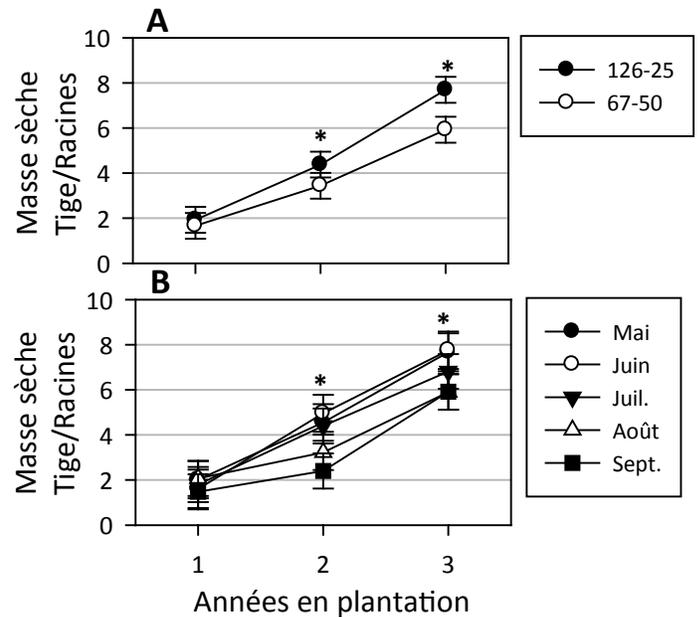


Figure 12. Évolution du rapport de la masse sèche de la tige sur la masse sèche des racines durant les trois premières années en plantation. Les barres verticales représentent les intervalles de confiance à 95%. * : significativement différents à $p < 0,05$.

Tableau 7. Analyse de variance du rapport de la biomasse photosynthétique sur non photosynthétique (PnP) au cours des deux premières années en plantation.

Source	d.l.n.	d.l.d.	F	P
Type de récipient (R)	1	33	3,84	0,06
Date de plantation (D)	4	33	10,60	< 0,0001
R x D	4	33	2,20	0,09
Temps (T)	1	4	32,09	0,005
R x T	1	35	19,42	< 0,0001
D x T	4	36	2,81	0,04
R x D x T	4	35	0,98	0,43

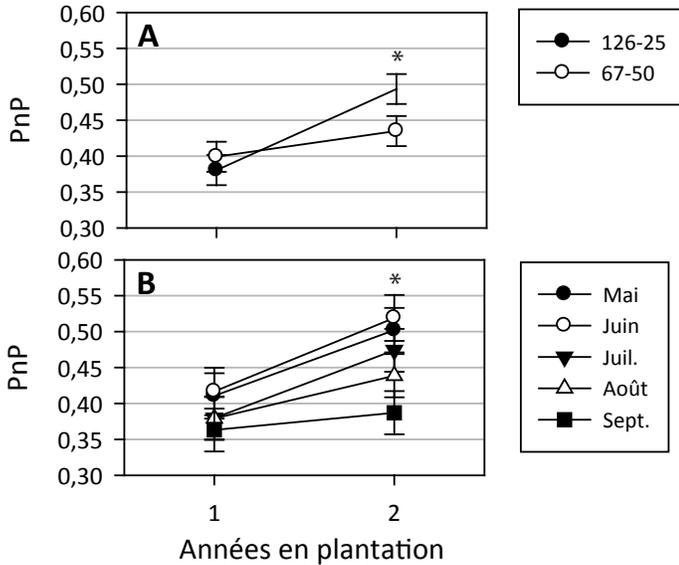


Figure 13. Évolution du rapport de la masse photosynthétique sur non photosynthétique (PnP) durant les deux premières années en plantation. Les barres verticales représentent les intervalles de confiance à 95%. * : significativement différents à $p < 0,05$.

septembre, puis de la diminution simultanément pour tous les lots de plants la troisième année (**Figure 14B**).

Le contenu foliaire en phosphore (P) variait significativement entre les types de plants et les dates de plantations (**Tableau 8**). Les interactions R x T et D x T sont toutes les deux significatives. La concentration en P des 126-25 était significativement plus élevée au cours des deux premières années en plantation.

Source	d.l.n.	d.l.d.	N		P		K		Ca		Mg	
			F	P	F	P	F	P	F	P	F	P
Type de récipient (R)	1	36	32,66	< 0,0001	20,17	< 0,0001	18,88	0,0001	2,29	0,14	5,01	0,03
Date de plantation (D)	4	36	6,77	0,0003	13,64	< 0,0001	17,64	< 0,0001	10,83	< 0,0001	1,96	0,12
R x D	4	36	2,26	0,08	1,59	0,20	7,87	0,0001	0,82	0,52	0,08	0,99
Temps (T)	2	8	43,53	< 0,0001	34,98	< 0,0001	5,42	0,03	203,92	< 0,0001	5,74	0,0280
R x T	2	72	7,14	0,0015	8,27	0,0006	6,02	0,0039	2,44	0,09	7,79	0,0009
D x T	8	72	7,90	< 0,0001	6,54	< 0,0001	11,45	< 0,0001	7,09	< 0,0001	0,16	0,996
R x D x T	8	71	1,72	0,11	0,89	0,53	3,06	0,0051	0,81	0,60	1,04	0,42

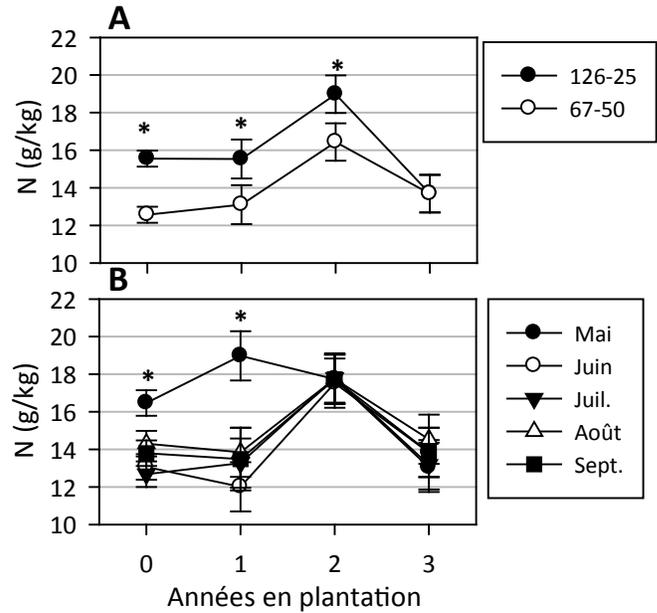


Figure 14. Contenu foliaire en azote (N) au moment de la plantation ainsi que durant les trois premières années en plantation en fonction du type de plants reboisés (A) et de la date de plantation (B). * : significativement différents à $p < 0,05$. Les barres verticales représentent les intervalles de confiance à 95%.

années en plantation. Cet écart a disparu la troisième année pour faire suite à la diminution simultanée de la concentration en P chez les deux types de plants (**Figure 15A**). Des écarts significatifs étaient aussi perceptibles jusqu'à la première année en plantation entre les plants reboisés à différentes dates (**Figure 15B**). Ces écarts n'étaient plus significatifs à partir de la deuxième année en plantation et une diminution générale était visible la troisième année chez les lots des différentes dates (**Figure 15B**).

L'analyse de variance des concentrations foliaires en potassium (K) montre, que l'interaction R x D x T est significative (**Tableau 8**). Au moment de la plantation, la concentration en K des 126-25 était nettement plus élevée que celle des 67-50, quelle que soit la date de plantation (**Figure 16A**). La concentration en K a diminué après un an en plantation sauf pour les plants 126-25 reboisés en septembre. Ces écarts

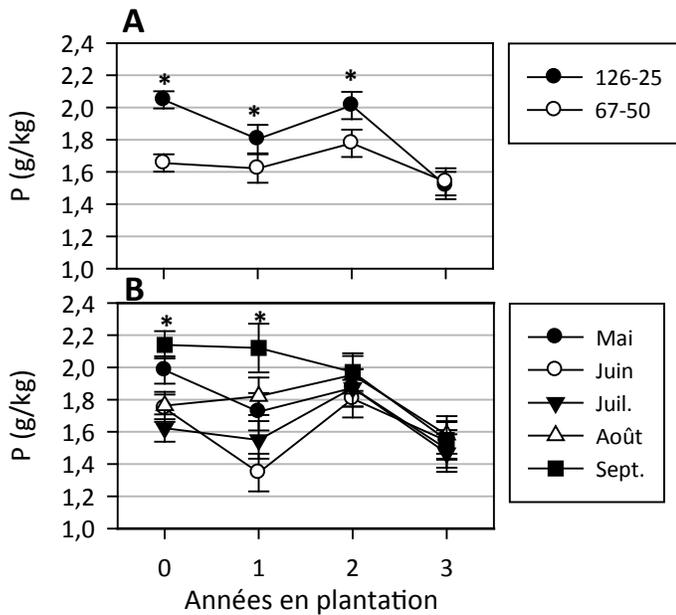


Figure 15. Contenu foliaire en phosphore (P) au moment de la plantation ainsi que durant les trois premières années en plantation en fonction du type de plants reboisés (A) et de la date de plantation (B). * : significativement différents à $p < 0,05$. Les barres verticales représentent les intervalles de confiance à 95%. n'étaient plus significatifs après trois ans en plantation (Figures 16A-B).

Les concentrations foliaires en calcium (Ca) différaient significativement entre les plants reboisés aux différentes dates, mais seulement au moment de la plantation et durant la première année (Tableau 8; Figure 17). Les plants reboisés plus tardivement avaient une concentration en Ca plus élevée que ceux reboisés tôt en saison. Ces écarts n'étaient plus significatifs après deux ans, suite à une diminution simultanée chez tous les lots de plants (Figure 17).

Les concentrations foliaires en magnésium (Mg) différaient significativement entre les types de plants reboisés, mais seulement durant la première année (Tableau 8; Figure 18).

Mesures en 2014 des arbres dominants

L'analyse de variance des mesures réalisées sur les arbres dominants en 2014 montre des écarts significatifs de hauteur entre les types de plants reboisés et les dates de reboisement (Tableau 9). Les arbres dominants cultivés en 67-50 mesuraient 5 m comparativement à 4,9 m pour les 126-25 (Figure 19A). Les arbres qui ont été reboisés en mai et juin étaient significativement plus grands que ceux reboisés en août ou septembre (Figure 19C). L'interaction R x D n'est pas significative, l'écart entre les deux types de plants n'étant plus significatif lorsque l'on compare les types de plants à

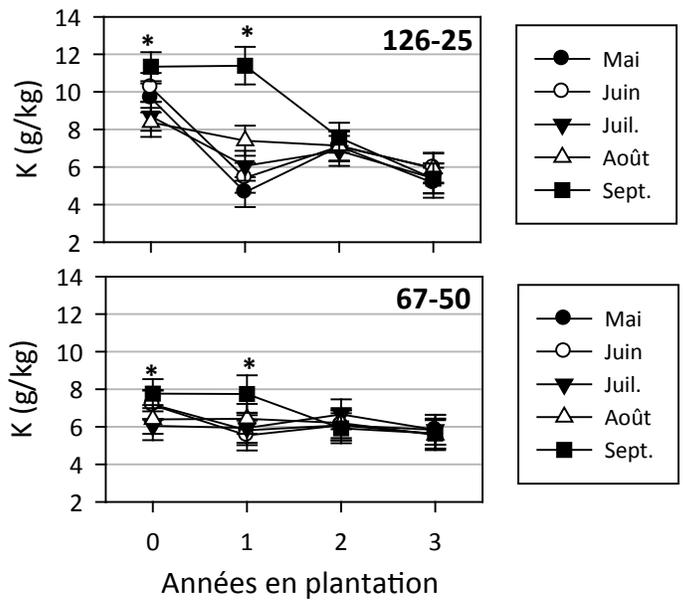


Figure 16. Contenu foliaire en potassium (K) au moment de la plantation ainsi que durant les trois premières années en plantation, des plants 126-25 en fonction de la date de plantation (A) et des plants 67-50 en fonction de la date de plantation (B). * : significativement différents à $p < 0,05$. Les barres verticales représentent les intervalles de confiance à 95%.

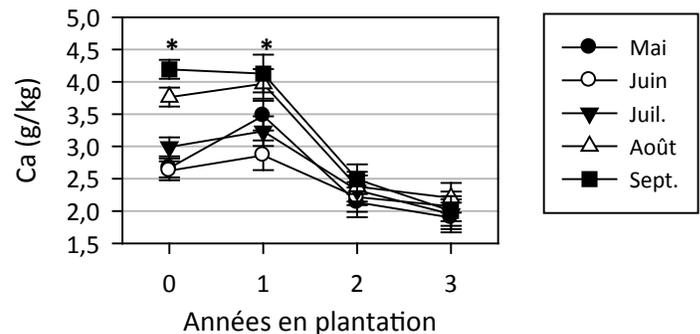


Figure 17. Contenu foliaire en calcium (Ca) au moment de la plantation ainsi que durant les trois premières années des plants reboisés à différentes dates. * : significativement différents à $p < 0,05$. Les barres verticales représentent les intervalles de confiance à 95%.

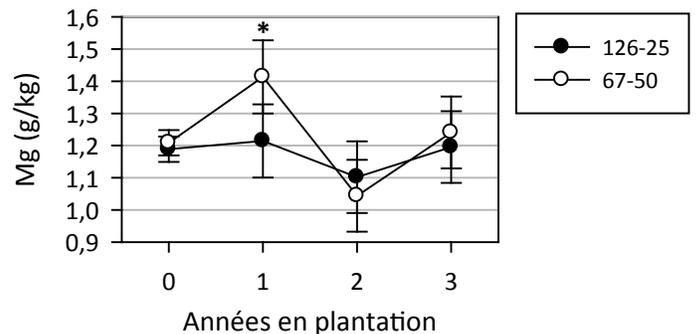


Figure 18. Contenu foliaire en magnésium (Mg) au moment de la plantation ainsi que durant les trois premières années des plants reboisés à différentes dates. * : significativement différents à $p < 0,05$. Les barres verticales représentent les intervalles de confiance à 95%.

plantations, celles en août ou septembre ayant l'IQS le plus bas (**Figure 20F**). La surface terrière totale (G_t) de même que le volume total (V_t) après 12 ans en plantations étaient plus élevés chez les 67-50 comparativement au 126-25 (**Figures 20B-C**). Les plantations de juin avaient les valeurs de G_t et V_t les plus élevés et on observait un déclin de ces deux

variables au fur et à mesure que la date de plantation était tardive (**Figures 20G-H**). Les écarts observés pour la surface terrière marchande (G_m) et le volume marchand (V_m) après 12 ans en plantation étaient plus marqués que précédemment, mais suivaient les mêmes tendances (**Figures 20D-E-I-F**).

Tableau 10. Analyses de variance de l'IQS à 15 ans, de la surface terrière totale (G_t), du volume total (V_t), de la surface terrière marchande (G_m) et du volume marchand (V_m) après 12 ans en plantation.

Source	d.l.n.	d.l.d	IQS		G_t		V_t		G_m		V_m	
			F	P	F	P	F	P	F	P	F	P
Type de récipient (R)	1	36	4,26	0,0462	4,26	0,0462	4,37	0,0437	4,26	0,0462	4,57	0,0395
Date de plantation (D)	4	36	6,71	0,0004	6,71	0,0004	6,74	0,0004	6,71	0,0004	6,81	0,0003
R x D		36	0,27	0,90	0,27	0,90	0,28	0,89	0,27	0,90	0,29	0,88

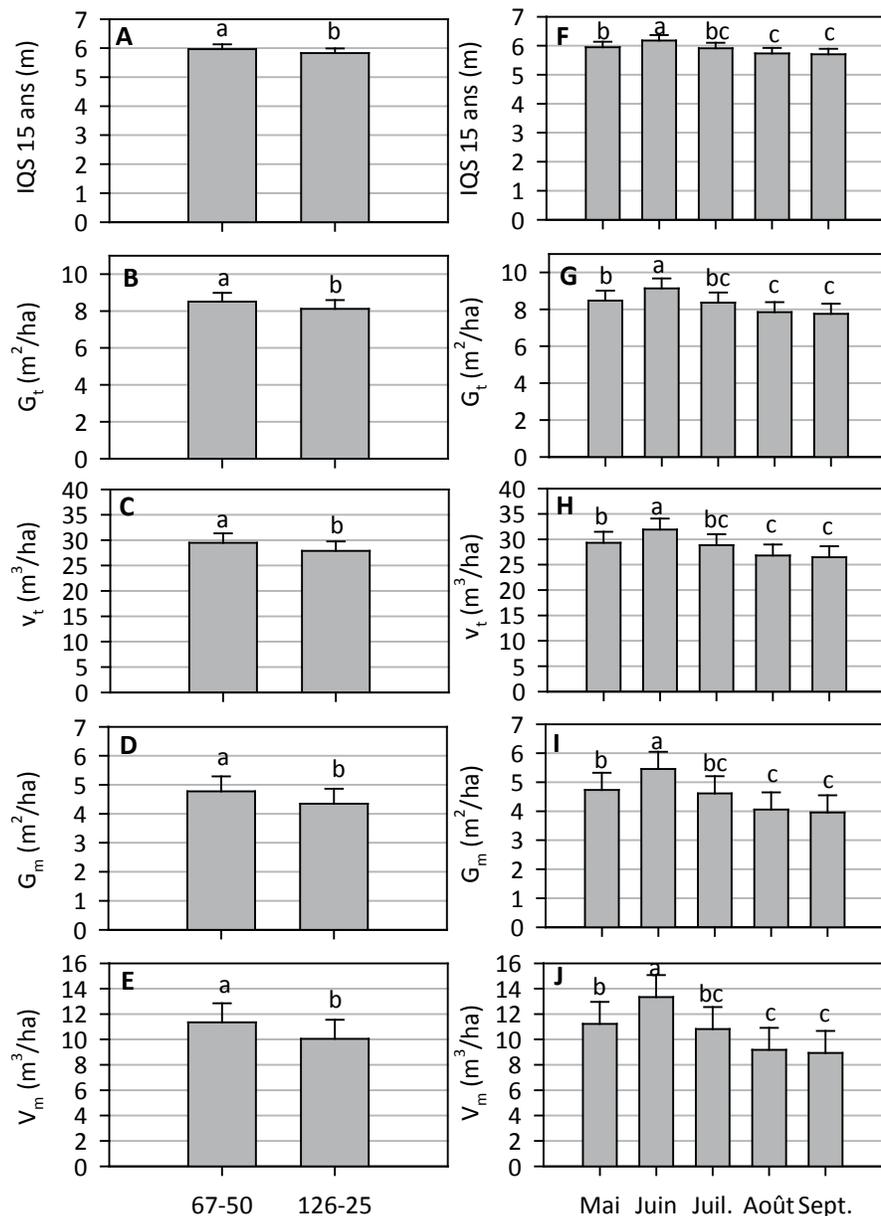


Figure 20. IQS à 15 ans, surface terrière totale (G_t), Volume total (V_t), surface terrière marchande (G_m) et volume marchand (V_m) mesurés après 12 ans en plantation en fonction du type de plants reboisés (A-B-C-D-E) et des dates de plantation (F-G-H-I-J). Les moyennes surmontées de lettres différentes sont significativement différentes à $p < 0,05$. Les barres verticales représentent les intervalles de confiance à 95 %.

Estimation du volume marchand à 40 ans

Les volumes marchands à 40 ans calculés à partir des formules de [Bolghari et Bertrand \(1984\)](#) présentent des écarts significatifs entre les types de plants reboisés et les dates de plantation (**Tableau 11**). Celui des 67-50 est légèrement supérieur à celui des 126-25, $193 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ dans le premier cas, comparativement à $188 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ dans le second (**Figure 21A**). Les estimations sont aussi plus élevées en ce qui concerne la plantation effectuée en juin comparativement aux autres dates (**Figure 21B**). L'écart entre la valeur la plus élevée (juin) et la plus basse (Sept.) est de $15 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ (**Figure 21B**). Les courbes d'évolution du volume marchand des types de plants reboisés sont présentées à la **figure 22A** et celles en fonction des dates de plantation à la **figure 2B**. Ces estimations ont été extrapolées jusqu'à 60 ans.

DISCUSSION

Le reboisement des parcelles du site Km-128 à différentes dates de la saison de plantation nous a permis d'évaluer l'effet du climat sur la performance initiale des plants, lors de la phase critique d'établissement sur un site forestier. Les

Tableau 11. Analyse de variance de l'estimation du volume marchand à 40 ans.

Source	d.l.n.	d.l.d	F	P
Type de récipient (R)	1	36	4,39	0,04
Date de plantation (D)	4	36	6,75	0,0004
R x D	4	36	0,28	0,89

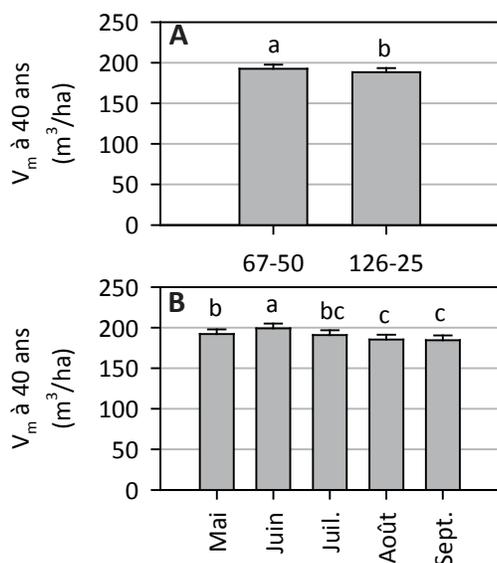


Figure 21. Volume marchand prédit à 40 ans en fonction du type de plants reboisés (A) et de la date de plantation (B). Les moyennes surmontées de lettres différentes sont significativement différentes à $p < 0,05$. Les barres verticales représentent les intervalles de confiance à 95 %.

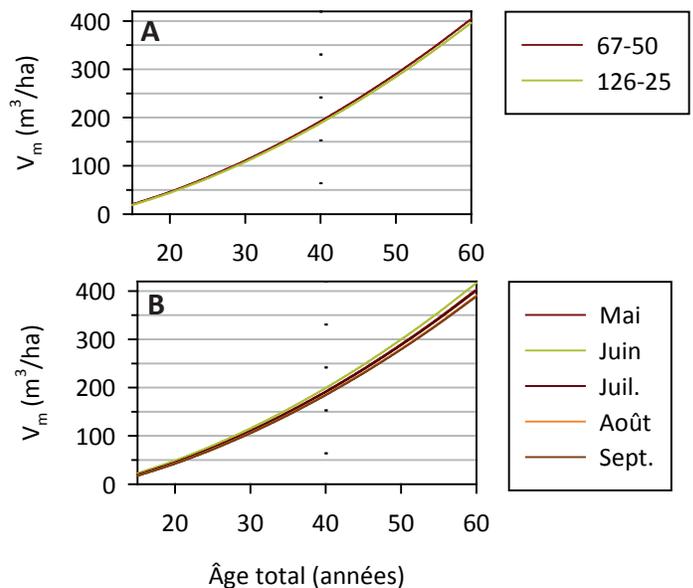


Figure 22. Estimation du volume marchand jusqu'à 60 ans en fonction du type de plants reboisés (A) et de la date de plantation (B).

plants y sont exposés au stress engendré par les conditions environnementales extrêmes qui peuvent prévaloir sur le site de reboisement, juste après la mise en terre ([Grossnickle, 2000](#)). [Delisle \(1993\)](#) répertorie trois facteurs importants causant la mortalité des plants : la compétition par les espèces herbacées, le broutage et le gel tardif. Il faut spécifier ici que les sites expérimentaux étudiés par [Delisle \(1993\)](#) sont tous situés entre le 45° et 48° de latitude où la présence d'espèce compétitrices comme le framboisier est importante tout comme une présence importante du lièvre et du chevreuil, ce qui n'est pas le cas du site Km-128. Par contre, le gel durant la saison de croissance est considéré comme le principal facteur environnemental qui affecte l'établissement des plantations sous les latitudes élevées ([Sakai et Larcher, 1987](#)). Nos relevés météorologiques, effectués près du site de reboisement, montrent des périodes de gel tardif ainsi que des épisodes de gel hâtif (**Figure 5**). Les températures au-dessous de zéro durant les mois d'été coïncident avec la période où les plants ont un niveau de tolérance au gel très bas ([Grossnickle, 2000](#)). Les tiges en croissance peuvent être sérieusement endommagées à des températures se situant entre -3° et -8°C , notamment au niveau du système photosynthétique; si le gel est suivi d'un ensoleillement intense, la chlorophylle est endommagée et même si le semis n'est pas tué, sa capacité photosynthétique peut être drastiquement réduite ([Orlander et coll., 1990](#)).

Notre plantation réalisée en mai a été suivie de trois épisodes de gel. C'est ce qui a probablement causé la mort d'un certain nombre de plants 126-25. Les relevés réalisés un mois après la plantation montrent que 25 % des 126-25 étaient morts à ce moment-là, mais seulement 2 % des 67-50 (**Figure 6**). La plus forte mortalité chez les PTPD s'expliquerait par une période d'endurcissement en pépinière plus courte des 126-25 comparativement aux 67-50 (**Figure 3**). Les températures étaient encore trop froides en mai, à l'extérieur des serres, pour sortir les plants sur l'aire de croissance. Les 67-50 ont quand même pu profiter d'une courte période d'acclimatation à l'extérieur des serres. Le fait de sortir les plants de pin gris à l'extérieur est suffisant pour démarrer le processus d'endurcissement.

L'exposition aux rayons UVB est sans doute responsable de ce phénomène. Le recouvrement en verre des serres est reconnu pour filtrer la majorité des rayons UV, tandis que le recouvrement de polyéthylène le filtre un peu moins ([Burns, 1998](#)). D'ailleurs, [Yakimchuk et Hoddinott \(1994\)](#) ont montré que les jeunes semis de pin gris exposés à des irradiations supplémentaires d'UVB ont une croissance en hauteur plus faible que les plants-témoins, tandis que le diamètre est très peu affecté, augmentant de ce fait le rapport H/D qui est un bon indicateur de la robustesse du semis. Il a aussi été démontré que l'exposition à des doses ambiantes d'UVB inhibe la croissance en hauteur du sapin Douglas ([Poulson et coll., 2002](#)). Les rayons d'UVB stimulent l'activité de la phénylalanine ammonia-lyase (PAL) chez le pin gris, une enzyme qui joue un rôle important dans l'acquisition de la tolérance au gel, en induisant la production de composés phénoliques ([Teklemariam et Blake, 2004](#)). Les radiations UVB sont un signal environnemental qui induit aussi la tolérance au stress hydrique, du moins chez et le pin méditerranéen et le sapin Douglas ([Manetas et coll., 1997](#); [Poulson et coll., 2002](#)). De plus, le PAL joue un rôle essentiel dans la lignification de la tige ([Margolis et coll., 1991](#)).

Les autres plantations ont été très peu affectées par le gel même si des épisodes de gel sont survenus en août et en octobre. Les arbres reboisés après mai ont tous profité d'une période d'acclimatation réalisée en partie ou en totalité à l'extérieur des serres (**Figure 3**).

Dans l'ensemble, si l'on ne tient pas compte de la plantation en mai des 126-25, le taux de survie des deux types de

plants est très élevé (**Figure 7**). Même dans le cas de la plantation en mai des 126-25, la mortalité subséquente est insignifiante après la première année en plantation. Le taux de survie sur l'ensemble du site Km-128 est de 95 % après sept ans, et même de 98 %, si l'on exclut la plantation de mai des 126-25. Nos résultats se comparent avantageusement à ceux présentés dans la dernière compilation effectuée par le MRNF en 1998, où le taux de survie du pin gris après huit ans en plantation est de 90 % pour les plants cultivés dans le récipient 67-50 et 92 % pour ceux dans le 45-110 ([Trottier, 1998](#)).

Le lien entre la taille du plant et sa capacité de survie sur le site de reboisement n'est pas toujours évident ([Grossnickle 2012](#)). [Sutherland et Day \(1988\)](#) n'ont pas pu démontrer un lien entre la taille des semis de pin gris et le taux de survie les premières années en plantation. [Scarratt \(1974\)](#) a montré par contre qu'en augmentant la durée de culture du pin gris dans le récipient *Ontario tube* (1,4 x 7,5 cm) de 6 à 12 semaines, la taille augmentait de 5,6 cm à 7,4 cm et le taux de survie passait de 67 à 88 % après 4 ans. La courbe du pourcentage de survie en fonction des dates de plantation décrit une cloche; le taux le plus faible en début et à la fin de la saison de reboisement et les valeurs les plus élevées en juillet et août, tout comme nous avons observé au Km-128. [Scarratt \(1974\)](#) recommande une durée de culture d'au moins 10 à 12 semaines pour le pin gris et une hauteur minimale de 10 cm. Le taux de survie du pin gris cultivé dans ce type de récipient mesurant 8 cm de hauteur au moment de la plantation est de 74 % pour les plantations de juillet et de 92 % pour celles de juin, 10 ans après la plantation ([Wood, 1990](#)) ; Le taux de survie plus bas en juillet est causé par un broutage plus important et des températures plus chaudes et des périodes plus sèches en juillet.

Nos analyses statistiques montrent que la hauteur des plants de pin gris est toujours influencée par le type de récipient utilisé, même après 12 ans en plantation (**Tableau 5**). Il faut spécifier cependant que cette différence est insignifiante, 10 cm à peine sur une hauteur totale de 5 m, même si elle est significative au point de vue statistique. Il faut ajouter aussi que l'interaction Récipient x Temps n'est pas significatives, ce qui implique que les profils de croissance en hauteur ou en diamètre afférent aux types de plants reboisés sont parallèles et qu'en aucun cas, l'écart entre les 126-25 et les 67-50 ne s'est agrandi avec le temps (**Figure**

8). Wood (1990) a observé le même phénomène pour différents types de plants de pin durant leurs 10 années de croissance. Au Km-128, la hauteur atteinte par les 67-50 après 7 ans, 1,8 m, est même légèrement supérieure à celles des plantations équivalentes au Québec qui ont été réalisées entre 1986 à 1995 soit 1,6 m en moyenne (Trottier, 1998).

En fait, ce que démontrent nos résultats, c'est que la date de plantation est un facteur plus important que la taille initiale des plants pour expliquer le profil de croissance en hauteur et en diamètre du pin gris. On observe pour ces deux variables, des écarts significatifs entre les plants reboisés à différente date de la saison (Tableau 5). Les profils de croissance afférents aux différentes dates de plantation ne sont pas parallèles, tant pour la hauteur que pour le diamètre (Figures 8-9). Ce phénomène est particulièrement marqué pour le diamètre qui diminue linéairement de mai à septembre. La hauteur des plants reboisés en juin est très légèrement supérieure à ceux de mai, puis le diamètre diminue continuellement de juin à septembre.

La croissance des plantes est fortement régulée par la température. Chez le pin gris, les courbes de la photosynthèse nette décrivent une cloche dont le sommet est atteint autour de 20°C (Dang et Cheng, 2004; Dang et al., 1998). Le déclin rapide de la température après la plantation de septembre a sûrement limité la photosynthèse du pin gris. Les plants reboisés à cette date n'ont pratiquement pas eu de croissance durant leur première année sur le site de reboisement. Ceci se reflète dans l'évolution de la biomasse des plants. Les plants reboisés en septembre avaient les plus faibles biomasses aériennes et racinaires tandis que ceux reboisés en juin avaient les biomasses les plus élevées après la première année en plantation. Ces différences étaient encore significatives même après trois ans en plantation (Tableau 6; Figures 10-11). En forêt boréale, la température du sol augmente au cours de la saison estivale pour atteindre un maximum entre 15-17°C à la fin de juillet et redescend continuellement par la suite (Thiffault et coll., 2012). Chez le pin gris, la biomasse augmente linéairement en fonction de la température, jusqu'à 20°C environ, puis décline au-delà de ce seuil (Peng et Dang, 2003). D'après Heninger et White (1974), la croissance en hauteur est stimulée par la température du sol jusqu'à une température de 27°C et décline au-delà. La croissance optimale en diamètre est atteinte à partir de 19°C. Normalement, la croissance des plants reboisés en

mai aurait dû être supérieure aux autres groupes de plants reboisés plus tardivement puisque les premiers ont profité d'une plus longue saison de croissance. Les périodes de gels qui sont survenus peu de temps après la plantation ont, non seulement causé la mort d'un grand nombre de plants, mais sans doute endommagé le système photosynthétique des survivants. Le gel estival inhibe généralement la photosynthèse pendant une période plus ou moins longue, pouvant se prolonger de 10 à 20 jours, le feuillage de l'année en cours étant particulièrement sensible aux dommages par le gel (Grossnickle 2000). Lamontagne et coll. (1998) ont calculé que 22 jours sont nécessaires pour que les aiguilles du pin gris exposées à une température de -3°C puissent recouvrir leur activité photosynthétique, tandis que ceux exposés à des températures plus basses ne récupèrent jamais leur pleine capacité photosynthétique. Les gels printaniers sont plus dommageables que ceux d'automne puisque l'impact du gel est plus grand lorsque la température de l'air après le gel est élevée; la récupération du potentiel photosynthétique après un gel modéré prend plus de temps à 25°C qu'à 15 ou 5°C (Lamontagne et coll., 2000).

Les plants 126-25 ont alloué plus de carbone à la partie aérienne (Figure 12). De ce fait, le rapport PnP est plus élevé; la plus grande allocation de la biomasse vers les tissus responsables de la fixation du carbone permet une croissance plus soutenue ce qui a permis aux PTPD de combler leur retard initial par rapport aux 67-50 (Figure 12). Les plants reboisés tôt en saison ont aussi un rapport PnP plus élevé que ceux reboisés plus tardivement, ce qui joue en leur faveur par rapport à ces derniers qui ont une saison de croissance écourtée sur des sols plus froids (Figure 13B). Peng et Dang (2003) ont montré que le rapport PnP du pin gris augmente en fonction de la température du sol. Par contre, la température du sol a relativement peu d'effet sur le rapport tige/racines (Peng et Dang, 2003). Nos relevés montrent des différences significatives entre les types de plants et les dates de plantations, mais ces différences sont relativement modestes (Figure 12).

Les plants de 126-25 reboisé en mai ont profité d'une réserve en azote plus abondante dans leur feuillage que les autres groupes de plants (Figure 14). Normalement, cela aurait dû se refléter dans une croissance plus rapide puisque la photosynthèse est corrélée avec la concentration d'azote des aiguilles (Roberntz et Stockfors, 1998). Visiblement, les

gels successifs peu de temps après la plantation ont supprimé cet avantage. On remarque aussi par la suite des augmentations des concentrations foliaires en N chez tous les groupes de plants jusqu'à la deuxième année en plantation (**Figure 14**). [Prévost et Dumais \(2003\)](#) ont montré que le scarifiage augmente la concentration en N des aiguilles de l'année courante des plants reboisés sur des sites scarifiés et que cet effet bénéfique était toujours détectable cinq ans après la plantation. L'humus forestier constitue un réservoir d'éléments nutritifs. Cependant, ces éléments s'y trouvent majoritairement sous des formes peu ou non accessibles aux plantes. C'est par l'activité des microorganismes décomposeurs que les éléments essentiels (dont l'azote) sont minéralisés sous des formes accessibles aux semis reboisés ([Thiffault, 2005](#)). Sur le dispositif de [Prévost \(1996\)](#), l'horizon organique L-F-H mesurait 23 cm d'épaisseur, ce qui était passablement plus grand que l'épaisseur de l'horizon organique du site Km-128 qui ne dépassait pas 13 cm. Sur le site Km-128, le réservoir d'azote du sol était donc plus limité, ce qui expliquerait que l'effet d'enrichissement causé par le scarifiage n'a duré que deux ans seulement.

La concentration foliaire moyenne en N pour tous les pins gris reboisés atteignait 1,5 % après trois ans en plantation. Une concentration foliaire entre 1,25 et 2,5 % est considérée comme normale chez le pin gris, d'après la revue de littérature compilée par [Blinn et Buckner \(1989\)](#). Ces valeurs correspondent à l'étendue critique définie par [Driessche et Rieche \(1974\)](#) soit, la concentration sous laquelle les plantes vont réagir positivement à un apport de fertilisant, et au-delà de laquelle, cette concentration est considérée comme une consommation de luxe ([Timmer et Aidelbaum, 1996, Timmer, 1997](#)). D'autres auteurs utilisent le terme adéquat, intermédiaire, optimal ou suffisant ([Blinn et Buckner, 1989](#)). Les autres éléments minéraux P-K-Ca-Mg sont eux aussi en concentrations suffisantes selon les mêmes critères de [Blinn et Buckner \(1989\)](#).

Les analyses statistiques des mesures prises en 2014 sur les arbres dominants montrent un écart significatif entre les deux types de plants, mais seulement pour la variable hauteur (**Figure 19A**). L'écart est de 10 cm en faveur des plants 67-50 (2%), ce qui est « insignifiant » au point de vue du rendement forestier. Les écarts entre les plants reboisés à différentes dates sont du même ordre (**Figure 19B**). L'absence d'interaction significative nous indique que les

PTPD sont aussi performants que les 67-50, quelle que soit la date de reboisement (**Figure 19C**). Même dans les conditions environnementales adverses qui prévalaient durant le mois de mai, les arbres qui ont survécu ont démontré une croissance aussi vigoureuse que celle des 67-50 par la suite. Si l'on retire de l'analyse les mesures des 126-25 plantés en mai, on n'observe plus de différence significative entre les deux types de plants ($P = 0,13$; **Tableau 9**). Par comparaison, [Wood \(1990\)](#) a mesuré un écart de 15 % après 10 ans en plantation entre des plants de pin gris mesurant 8 cm à la plantation et ceux de 17 cm; l'écart atteint même 29 % pour le volume de la tige.

Les IQS à 15 ans des parcelles du dispositif Km-128 sont largement supérieurs à ceux mesurés par [Krause et coll. \(2014\)](#) pour les plantations de pins gris du domaine bioclimatique de la Sapinière (4,9 m) ou des plantations dans la Pessièrre (4,8 m). Nous estimons que le volume marchand devrait atteindre 190 m³/ha à 40 ans. Il est hasardeux d'extrapoler celui-ci au-delà de cet âge puisque les tables de rendement de [Bolghari et Bertrand \(1984\)](#) sont limitées à 45 ans, les plantations utilisées dans les calculs du rendement forestier ne dépassant pas 31 ans. Les estimations du volume marchand à 40 ans de [Krause et coll. \(2014\)](#) sont de 153 m³.ha⁻¹ dans la pessièrre et de 147 m³.ha⁻¹ dans la Sapinière. La plantation du Km-128 se retrouve parmi les meilleurs sites (33% supérieur) trouvés par ces auteurs. Les estimations du volume total après 12 ans en plantation réalisée avec la formule de [Forslund et Paterson \(1994\)](#) donnent les mêmes résultats que ceux calculés avec la formule de [Bolghari et Bertrand \(1984\)](#) soit, 29 m³.ha⁻¹ après 12 ans en plantation. Les calculs des IQS à partir de notre échantillonnage de 2014 au Km-128 sont aussi supérieurs à ceux mesurés par [Prégent et Poliquin \(2006\)](#) dans la pessièrre à mousses de l'Est pour le pin gris ; 10,2 m à 25 ans comparativement à 11,7 m pour le Km-128².

Le choix du pin gris comme essence forestière pour le reboisement en forêt boréale se justifie amplement du point de vue économique puisque les plantations de cette essence produisent beaucoup plus de volume marchand que les plantations d'épinettes noires, n'importe où dans la forêt boréale ([Krause et coll., 2014](#)). De plus, le pin gris reboisé sur les stations de même qualité et à âge égal a une productivité supérieure à celle des peuplements naturels ([Bolghari](#)

2. Un IQS à 15 ans de 5,9 m correspond à un IQS à 25 ans de 11,7 m.

1976). L'analyse de rentabilité économique des plantations du Bureau de mise en marché du bois a révélé que tous les scénarios de reboisement en pin gris sont rentables (Collectif, 2014a).

La plantation printanière de mini-plants de pin gris ne doit pas être écartée à la lumière des résultats obtenus ici avec la plantation en mai des 126-25. Les méthodes de culture ont grandement évolué depuis 2002 lorsque la production de plants de pin gris a été amorcée pour le dispositif Km-128. Le nouveau récipient 113-25 qui remplace l'ancien 126-25 a déjà démontré sa supériorité (Walsh *et coll.*, 2015b). Les plants ne sont plus cultivés en serre, mais en tunnels ou sur des aires de croissance extérieure, ce qui facilite l'endurcissement des plants avant l'expédition (Walsh *et coll.*, 2015a, 2015c). Les plants sont maintenant cultivés sur deux saisons de croissance, ce qui permet de disposer de plants prêts à être expédiés en forêt très tôt au printemps. Le processus d'endurcissement des semis de pin gris cultivés en pépinières est encore mal connu et il faut déplorer l'absence de recherches récentes sur le sujet. Les seuls articles qui traitent des pratiques culturales en relation avec la tolérance au froid du pin gris ou des traitements photopériodiques pour endurcir cette espèce datent des années 50 ou 60 (Giertych et Farrar, 1961; Vaartaja, 1957, 1959, 1963) ou des années 80 ou 90 (Calmé *et al.*, 1993; Edwards, 1987). On ne peut pas employer directement les méthodes culturales développées pour les épinettes (Bigras et Bertrand, 2006; Bigras et D'Aoust, 1992; Bigras *et al.*, 1996; Bigras *et al.*, 2001; Gaumont-Guay *et al.*, 2003) au pin gris puisque le genre *Pinus* ne forme pas un vrai bourgeon apical après sa première saison de croissance (Kremer et Larson, 1982).

Retombées escomptées

L'utilisation des PTPD peut améliorer la rentabilité des plantations de pins gris implantées en forêt boréale. Le coût de production en pépinière des PTPD est inférieur à celui des plants conventionnels. Pour l'année financière 2014-2015, le coût de production des plants dans le récipient 113-25 est de 212\$/Mplants, comparativement à 224 \$/Mplants pour le 67-50 et 260 \$/Mplants pour le 45-110 (Anonyme, 2015). Le transport des plants de la pépinière à la jauge n'est pas inclus dans le coût du reboisement et est aux frais de Rexforêt (Anonyme, 2015). Des économies substantielles peuvent être réalisées au niveau du transport puisqu'un semi-remorque peut transporter 375 000 plants

126-25, 200 000 plants 67-50 et seulement 100 000 plants 45-110³. Rexforêt a consacré 2,2 M\$ en frais de transport de plants pour l'année financière 2013-2014⁴. Le coût du reboisement s'élevait à 31,5 M\$, dont 15,7 M\$ pour la seule région du Saguenay-Lac-Saint-Jean⁵. L'analyse de rentabilité économique des plantations du Bureau de mise en marché du bois a révélé certains scénarios de reboisement en épinettes noires non rentables, notamment dans les U.A. 2661, 8763 et 9351 de la pessière à mousses de l'Est et de l'Ouest; les coûts associés à ces scénarios étaient calculés en fonction de l'emploi de plants cultivés en 45-110. Dans ces secteurs, il est plus que probable que l'utilisation de plants de pin gris cultivés dans le récipient 113-25⁶ pourrait rentabiliser ces opérations. De plus, la culture du pin gris en récipient 113-25 est maintenant bien développée dans le réseau des pépinières privées et gouvernementales du Saguenay-Lac-Saint-Jean. L'utilisation du pin gris à la place de l'épinette noire serait une option à envisager sur les sites peu fertiles puisque tous les scénarios de plantation en pin gris s'avèrent rentables (Collectif, 2014).

Le nouveau modèle d'évolution naturelle des forêts d'épinette noire développée par Gagnon *et coll.* (1999) montre que le passage de plusieurs feux successifs dans une pessière à mousses mène à un processus d'ouverture du couvert forestier. Les analyses dendrométriques et des macros fossiles de la pessière à lichens située dans leur limite méridionale de distribution par Payette *et coll.* (2000) démontrent d'ailleurs que ces peuplements résultent de la dégradation de la pessière à mousses sous un régime de feux catastrophiques successifs associé à des épidémies d'insectes. Ces sites ouverts sont entre autres cartographiés sous l'appellation DS (dénudés secs). Ils totalisent pour la région Saguenay-Lac-Saint-Jean plus d'un million d'hectares selon la banque de données de l'inventaire forestier (Côté *et coll.* 2003; Côté 2004). Ces sites sont considérés comme improductifs puisque la faible densité des tiges ne permet pas de récolter le bois d'une manière économique. Pour-

3. Walsh *et coll.* 2003. Affiche présentée au Carrefour de la recherche forestière, Québec. Février 2003.

4. Rexforêt. Tableau 1 Programme régulier de travaux sylvicoles non commerciaux (2013-2014). http://rexforet.com/documents/Bilan2_Programme_regulier_tr_sylvivoles_2013-2014.pdf

5. Rexforêt. Tableau 2. Programme régulier de travaux sylvicoles. Répartition régionale des dépenses d'exécution (2013-2014). http://rexforet.com/documents/Bilan3_Repartition_regionale_des_depenses_2013-2014.pdf.

6. Le récipient 113-25 remplace maintenant le récipient 126-25 qui a été utilisé dans le dispositif K-128.

tant, il a été prouvé que certaines de ces stations pauvres (classe DS) ont déjà supporté des peuplements forestiers fermés de densité élevée (Côté *et coll.*, 2013). Remettre en production de tels sites devient donc une idée attrayante.

Seulement une partie des données de mesure de croissance et de survie recueillies depuis 1999 par l'équipe de chercheurs de l'UQAC ont été publiées jusqu'à maintenant, notamment celles comparant les parcelles reboisées avec l'épinette noire cultivée en 67-50 ou en 126-25 (Hébert *et coll.*, 2014; Tremblay *et coll.*, 2011; Walsh *et coll.*, 2006). Simultanément, un deuxième volet comprenant des parcelles reboisées en épinette noire ou en pin gris a été mis en place sur les mêmes sites d'étude, dans le cadre du programme de recherche « Remise-en-Production ». Le volet comparant la croissance de l'épinette noire à celle du pin gris n'a pas fait l'objet de publication.

Une étude physiologique a aussi été entreprise après la troisième année de la plantation; elle démontre une meilleure croissance et une meilleure conductance stomatique du pin gris comparativement à l'épinette noire (Hébert 2004). Ces mesures physiologiques ont montré que le pin gris serait plus tolérant au stress hydrique que l'épinette noire, et que cette espèce devrait être privilégiée sur les DS, dans le cas des sites xériques à texture de sol grossière (Hébert *et coll.*, 2006).

Un suivi de ces plantations comportant des mesures sur les arbres dominants pour calculer les IQS et évaluer du rendement en volume des différentes parcelles serait tout indiqué pour nous permettre de mieux connaître les rendements ligneux qui pourraient être réalisés en reboisant les terrains mal régénérés de la forêt boréale avec cette essence. Ces connaissances seront précieuses pour les gestionnaires forestiers, tel le Forestier en chef, pour déterminer le rendement futur des plantations.

Le plan d'aménagement forestier intégré tactique de l'unité d'aménagement 025-51 recommande entre autres d'accroître le rendement ligneux par le reboisement des sites non régénérés (Collectif, 2014b); ce rapport recommande la remise en production des superficies perturbées par d'anciens feux (pessières ouvertes et landes) pour un objectif de 3 750 ha par année, afin de remettre en production une partie des pessières noires ouvertes ou des landes. Ces objectifs sont justifiables du point de vue économique. D'ailleurs, les

résultats des analyses de rentabilité économique montrent que : « toute plantation réalisée sur un site où la forêt naturelle se régénère très lentement présente une forte rentabilité économique » et que « tous les scénarios de plantation de pins gris sont rentables... le gain supplémentaire lié à la plantation est important » (Collectif, 2014a).

L'utilisation de plants de dimensions plus petites que les conventionnels devraient garnir le sac du forestier d'un outil d'aménagement supplémentaire qui va lui permettre d'agir plus efficacement pour certaines opérations précises. L'outil « plants de très petites dimensions » d'épinette noire et de pin gris en récipient dont la cavité à un volume de 25 cm³ permettra de reboiser plus d'hectare avec le même budget global. Réservé aux sites où la végétation compétitive est peu présente, cet outil sera encore plus utile si le Québec fait le choix de remettre en production une partie des vastes dénudés secs nordiques qui se sont créés à la suite du passage de perturbations naturelles et à une régénération déficiente par la suite. Il sera aussi utile pour agir plus rapidement lorsqu'il devient évident, trois ou quatre ans après la perturbation, qu'un territoire perturbé ne se régénère pas avec une densité de tige suffisante pour obtenir, à terme, une forêt fermée. Dans le domaine de la pessière noire à mousse, cette situation risque de se produire plus fréquemment lors des années de grands feux de forêt, comme ce fut le cas en 2002. La fréquence augmentera également si, comme d'aucuns le suggèrent, la fréquence des feux en forêt boréale augmente à la suite du réchauffement climatique appréhendé. Pour que les aménagistes de la forêt boréale commerciale aient des choix d'outils performants et économiquement viables pour augmenter le capital forestier aux endroits jugés opportuns, il nous faut dès maintenant les connaissances scientifiques pour mesurer leur rendement.

CONCLUSION

Les conclusions de cette étude doivent être interprétées avec précaution puisqu'elle a été conduite sur un site seulement. Cependant, le dispositif expérimental comprend un très grand nombre de parcelles expérimentales (50), regroupé en 5 blocs constituant de vraies répétitions indépendantes. De plus, les mesures ont été réalisées sur une longue période de temps ce qui permet de définir les tendances de croissance du pin gris à long terme. De plus, les mesures récoltées en 2014 sont représentatives des valeurs

régionales colligées par [Prégent et Poliquin \(2006\)](#) ainsi que celles de [Krause et coll. \(2014\)](#).

Les arbres dont les semis ont été cultivés dans le récipient 126-25 sont plus petits de 12 cm que ceux cultivés dans le récipient 67-50 après 12 ans en plantation. Si cet écart est significatif au point de vue statistique, il est insignifiant au point de vue sylvicole. D'ailleurs, le DHP ne varie pas significativement entre ces deux types de plant. Le volume marchand à la fin de la rotation ne devrait pas être affecté par le choix du gabarit de pin gris qui est reboisé. Ces résultats prouvent aussi que les PTPD sont aussi performants que les plants conventionnels (67-50), quel que soit la date de la plantation et que l'extension de la saison de plantation de mai à septembre n'est pas un handicap pour ce type de plant. Les méthodes actuelles de production du pin gris dans le récipient 113-25 permettent d'obtenir maintenant des plants bien acclimatés, pouvant être reboisé au printemps, ce qui n'était pas le cas en 2003 lorsque de dispositif Km-128 a été mise en place en utilisant l'ancien récipient 126-25.

RÉFÉRENCES

Alemdag, I.S. (1991). National site-index and height-growth curves for white spruce growing in natural stands in Canada. *Canadian Journal of Forest Research*, 21(10), 1466-1474. doi: doi:10.1139/x91-206

Anonyme. (2010). *Marché du reboisement*. IPL inc. Site Internet : <http://www.ipl-plastics.com/Manutention-Rigipot.aspx>

Anonyme. (2015). *Valeur des traitements sylvicoles non commerciaux pour l'année financière 2014-2015*. Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Bureau de mise en marché des bois.

Bigras, F.J. et Bertrand, A. (2006). Responses of *Picea mariana* to elevated CO₂ concentration during growth, cold hardening and dehardening: phenology, cold tolerance, photosynthesis and growth. *Tree Physiology*, 26(7), 875-888. doi: 10.1093/treephys/26.7.875

Bigras, F.J. et D'Aoust, A.L. (1992). Hardening and dehardening of shoots and roots of containerized black spruce and white spruce seedlings under short and

long days. *Canadian Journal of Forest Research*, 22, 388-396.

Bigras, F.J., Gonzalez, A., D'Aoust, A.L. et Hébert, C. (1996). Frost hardiness, bud phenology and growth of containerized *Picea mariana* seedlings grown at three nitrogen levels and three temperature regimes. *New Forests*, 12(3), 243-259. doi: 10.1007/BF00027934

Bigras, F.J., Ryyppö, A., Lindström, A. et Sattin, E. (2001). *Cold acclimation and deacclimation of shoots and roots of conifer seedlings*. Dans : Bigras, F. J. et Colombo, S. J. (éd.), *Conifer cold hardiness* (p. 57-88). Dordrecht, The Netherlands : Kluwer Academic Publishers.

Blinn, C.R. et Buckner, E.R. (1989). *Normal foliar nutrient levels in North American forest trees. A summary*. (Station Bulletin 590-1989 (Item No. AD-SB-3762)). Minnesota Agricultural Experiment Station, University of Minnesota. St. Paul, Minnesota.

Bolghari, H.A. (1976). Estimation de la production de jeunes plantations de pin rouge et de pin gris du sud du Québec. *Canadian Journal of Forestry Research*, 6, 478-486.

Bolghari, H.A. et Bertrand, V. (1984). *Tables préliminaires de production des principales essences résineuses plantées dans la partie centrale du sud du Québec*. (Mémoire de recherche forestière no 79). Ste-Foy, Québec.

Boulay, É. (2015). *Ressources et industries forestières portrait statistique édition 2015*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles. Ste-Foy, Québec.

Burns, R.M. (1998). *Ultraviolet light improves bedding plants, vegetable transplants quality*. Site Internet : <http://today.agrilife.org/1998/11/27/ultraviolet-light-improves-bedding-plants-vegetable-transplants-quality/>

Calmé, S., Margolis, H.A. et Bigras, F.J. (1993). Influence of cultural practices on the relationship between frost tolerance and water content of containerized black spruce, white spruce, and jack pine seedlings. *Ca-*

- nadian Journal of Forest Research*, 23, 503-511.
- Carlson, L.W. et Endean, F. (1976).** The effect of rooting volume and container configuration on the early growth of white spruce seedlings. *Canadian Journal of Forest Research*, 6, 221-224.
- Chapman, K.A. et Colombo, S.J. (2006).** Early root morphology of jack pine seedlings grown in different types of container. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 21(5), 372-379.
- Collectif. (2014a).** *Analyse de rentabilité économique des plantations d'épinette noire et blanche et de pin gris*. Québec, QC : Bureau de mise en marché des bois, Gouv. du Québec. Québec, Qc.
- Collectif. (2014b).** *Plan d'aménagement forestier intégré tactique Unité d'aménagement 025-51*. Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs. Saint-Félicien, Qc.
- Colombo, S.J. et Chapman, K.A. (2005).** Root form of jack pine seedlings grown in a variety of containers. *Dans* : Colombo, J. (éd.). The thin green line. A symposium on the state-of-the-art in reforestation (p. 80). Thunder bay, Ontario, Canada. Forest Research Information Paper no. 160. Ontario Forest Research Institute.
- Côté, D. (2004).** *Mise en place d'une pessière à cladonie dans le domaine des forêts fermées d'épinette noire (Picea mariana) et potentiel pour la production forestière*. Université du Québec à Chicoutimi. Mémoire de maîtrise. Chicoutimi, Québec.
- Côté, D., Gagnon, R., Lord, D., Allaire, J. et Walsh, D. (2003).** *Les milieux ouverts sur stations sèches: origine, évolution et intérêt en aménagement forestier durable*. Carrefour de la Recherche Forestière. Québec.
- Côté, D., Girard, F., Hébert, F., Bouchard, S., Gagnon, R. et Lord, D. (2013).** Is the closed-crown boreal forest resilient after successive stand disturbances? A quantitative demonstration from a case study. *Journal of Vegetation Science*, 24(4), 664-674. doi: 10.1111/j.1654-1103.2012.01488.x
- Dang, Q.-L. et Cheng, S. (2004).** Effects of soil temperature on ecophysiological traits in seedlings of four boreal tree species. *Forest Ecology and Management*, 194(1-3), 379-387.
- Dang, Q.-L., Margolis, H.A. et Collatz, G.J. (1998).** Parameterization and testing of a coupled photosynthesis-stomatal conductance model for boreal trees. *Tree Physiology*, 18(3), 141-153. doi: 10.1093/treephys/18.3.141
- Danielsson, M., Kannaste, A., Lindstrom, A., Hellqvist, C., Stattin, E., Langstrom, B. et Borg-Karlson, A.K. (2008).** Mini-seedlings of *Picea abies* are less attacked by *Hylobius abietis* than conventional ones: is plant chemistry the explanation? *Scandinavian Journal of Forest Research*, 23(4), 299-306.
- Delisle, C. (1993).** *Principales causes de mortalité et croissance en hauteur de semis en conteneur à la suite de quatre expériences de reboisement*. Canadian Forestry Service. Centre de foresterie des Laurentides, LAU-X-106. Ste-Foy, Québec.
- Dominguez-Lerena, S., Sierra, N.H., Manzano, I.C., Bueno, L.O., Rubira, J.L.P. et Mexal, J.G. (2006).** Container characteristics influence *Pinus pinea* seedling development in the nursery and field. *Forest Ecology and Management*, 221(1-3), 63-71.
- Driessche, R.v.d. et Rieche, K. (1974).** Prediction of mineral nutrient status of trees by foliar analysis. *Botanical Review*, 40(3), 347-394. doi: 10.2307/4353871.
- Edwards, I.K. (1987).** *Nutrient regimes and cold hardiness in conifer seedlings*. *Dans* : Harvey, E. M. (éd.). Proceedings of the 1986 Prairie Federal-Provincial Nurserymen's Meeting (p. 14-17). The Pas, Manitoba : Canadian Forestry Service, Northern Forestry Centre, Edmonton, Alberta.
- Endean, F. et Carlson, L.W. (1975).** The effect of rooting volume on the early growth of Lodgepole pine seedlings. *Canadian Journal of Forest Research*, 5(1), 55-60. doi: doi:10.1139/x75-007.
- Environnement Canada. (2013).** *Données des stations pour le calcul des normales climatiques au Canada de 1981 à 2010*. Site Internet : http://climate.weather.gc.ca/climate_normals/results_f

- Epstein, E. (1972).** *Mineral nutrition of plants: principles and perspectives*. New York : John Wiley and Sons, Inc.
- Forslund, R.R. et Paterson, J.M. (1994).** Nondestructive volume estimates of 11-year-old jack pine and black spruce using the power function volume model. *The Forestry Chronicle*, 70(6), 762-767.
- Gagnon, R., Morin, H., Lord, D., Krause, C., Cloutier, S., Savard, G. et Potvin, J. (1999).** *Les forêts d'épinette noire au Québec: recherche, nouvelles connaissances et applications en aménagement*. Partenaire du Consortium de recherche sur la forêt boréale commerciale, UQAC, Laboratoire d'écologie végétale. Chicoutimi, Qc.
- Gaumont-Guay, D., Margolis, H.A., Bigras, F.J. et Raulier, F. (2003).** Characterizing the frost sensitivity of black spruce photosynthesis during cold acclimation. *Tree Physiology*, 23, 301-311.
- Giertych, M.M. et Farrar, J.L. (1961).** The effect of photoperiod and nitrogen on the growth and development of seedlings of jack pine. *Canadian Journal of Botany*, 39(5), 1247-1254. doi: doi:10.1139/b61-109.
- Grossnickle, S.C. (2000).** *Ecophysiology of northern spruce species : The performance of planted seedlings*. NRC Research Press. Ottawa, Ontario, Canada.
- Grossnickle, S.C. (2012).** Why seedlings survive: influence of plant attributes. *New Forests*, 43(5-6), 711-738. doi: 10.1007/s11056-012-9336-6.
- Harris, R.W. (1978).** *Root development of nursery-grown landscape trees*. Root form of planted trees : 287-291. British Columbia Ministry of Forests/ Canadian Forestry Service. Victoria, BC, Canada.
- Hébert, F. (2004).** *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 les pessières noires à lichens de la forêt boréale commerciale*. UQAC, mémoire de maîtrise. Chicoutimi, Qc.
- Hébert, F., Boucher, J.-F., Walsh, D., Tremblay, P., Côté, D. et Lord, D. (2014).** Black spruce growth and survival in boreal open woodlands 10 years following mechanical site preparation and planting. *Forestry*, 87(2), 277-286. doi: 10.1093/forestry/cpt052.
- Hebert, F., Boucher, J.F., Bernier, P.Y. et Lord, D. (2006).** Growth response and water relations of 3-year-old planted black spruce and jack pine seedlings in site prepared lichen woodlands. *Forest Ecology and Management*, 223(1/3), 226-236.
- Hébert, F., Boucher, J.F., Bernier, P.Y. et Lord, D. (2006).** Growth response and water relations of 3-year-old planted black spruce and jack pine seedlings in site prepared lichen woodlands. *Forest Ecology and Management*, 223, 226-236.
- Hébert, F., Gagnon, D. et Lord, D. (2005).** *Production de plants de petites dimensions (PPD): transfert technologique*. UQAC. Chicoutimi, Qc.
- Heninger, R.L. et White, D.P. (1974).** Tree seedling growth at different soil temperatures. *Forest Science*, 20(4), 363-367.
- Kinghorn, J.M. (1978).** *Minimizing potential root problems through container design*. Root form of planted trees. British Columbia Ministry of Forests/ Canadian Forestry Service. Victoria, BC, Canada.
- Kirk, R.E. (1982).** *Experimental design : procedures for the behavioral sciences* (2nd ed.). Brooks/Cole. Belmont, California.
- Krause, C., Plourde, P.-Y., Girard, J.-P. et Bouchard, M. (2014).** *Rendement anticipé des plantations d'épinette noire et de pin gris dans la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean*. UQAC et MRNF. Chicoutimi, Qc.
- Kremer, A. et Larson, P.R. (1982).** The relation between first-season bud morphology and second-season shoot morphology of jack pine seedlings. *Canadian Journal of Forest Research*, 12, 893-904.
- Lamontagne, M., Bigras, F.J. et Margolis, H.A. (2000).** Chlorophyll fluorescence and CO₂ assimilation of black spruce seedlings following frost in different temperature and light conditions. *Tree Physiology*, 20, 249-255).
- Lamontagne, M., Margolis, H. et Bigras, F.J. (1998).** Pho-

tosynthesis of black spruce, jack pine, and trembling aspen after artificially induced frost during the growing season. *Canadian Journal of Forest Research*, 28(1), 1-12. doi: doi:10.1139/x97-184 .

Lindström, A., Hellqvist, C. et Stattin, E. (2005). *Mini seedlings - a new forest regeneration system*. The thin green line a symposium on the state-of-the-art in reforestation : proceedings. Thunder Bay, Ontario, Canada : Ontario Forest Research Institute, Ontario Ministry of Natural Resources.

Lindström, A. et Rune, G. (1999). Root deformation in plantations of container-grown scots pine trees: effects on root growth, tree stability and stem straightness. *Plant and Soil*, 217, 29-37.

Littell, R.C., Milliken, G.A., Stroup, W.W., Wolfinger, R.D. et Schabenberger, O. (2006). *SAS for Mixed Models*. SAS Institute Inc. Cary, NC, USA.

Lord, D., Walsh, D. et Allaire, J. (1999). *Plantation de semis d'épinette noire de petites dimensions : rapport final pour la période 1998-99*. UQAC. Chicoutimi, Qc.

Lord, D., Walsh, D. et Allaire, J. (2000). *Plantation de plants d'épinette noire de petites dimensions - Rapport d'étape pour la période 1999-2000*. UQAC. Chicoutimi, Qc.

Manetas, Y., Petropoulou, Y., Stamatakis, K., Nikolopoulos, D., Levizou, E., Psaras, G. et Karabourniotis, G. (1997). Beneficial effects of enhanced UV-B radiation under field conditions: improvement of needle water relations and survival capacity of *Pinus pinea* L. seedlings during the dry Mediterranean summer. *Plant Ecology*, 128(1-2), 101-108. doi: 10.1023/A:1009706806427.

Margolis, H.A., Delaney, S., Vézina, L.P. et Bellefleur, P. (1991). The partitioning of C-14 between growth and differentiation within stem-deformed and healthy black spruce seedlings. *Canadian Journal of Botany*, 69, 1225-1231.

Mize, C.W. et Schultz, R.C. (1985). Comparing treatment means correctly and appropriately. *Canadian Journal of Forestry Research*, 15, 1142-1148.

Montgomery, D.C. (1984). *Design and analysis of experiments* (Second édition éd.). J. Wiley. New York / Toronto.

MRN. (2000). *Pour une flexibilité accrue, le plant résineux cultivé en récipient*. (Brochure 2000-3103d). Ste-Foy, Québec. Canada.

MRNF. (2010). *Ressources et industries forestières portrait statistique édition 2010*. Site Internet : http://www.mrnf.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/stat_edition_complete/complete2010.pdf

Nilsson, U., Luoranen, J., Kolström, T., Örlander, G. et Puttonen, P. (2010). Reforestation with planting in northern Europe. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 25(4), 283-294. doi: 10.1080/02827581.2010.498384

Orlander, G., Gemmel, P. et Hunt, J. (1990). *Site preparation: a Swedish overview*. Ministry of Forests. Victoria: B.C.

Peng, Y.Y. et Dang, Q.L. (2003). Effects of soil temperature on biomass production and allocation in seedlings of four boreal tree species. *Forest Ecology and Management*, 180(1-3), 1-9.

Persson, P. (1978). *Some possible methods of influencing the root development of containerized tree seedlings*. Root form of planted trees : 295-300. British Columbia Ministry of Forests/ Canadian Forestry Service. Victoria, BC, Canada.

Poulin, J. (2013a). 3.1 *Plantation*. Dans : *Manuel de détermination des possibilités forestières* (p. 77-81). Bureau du Forestier en Chef, Roberval, Qc.

Poulin, J. (2013b). *Création des courbes d'évolution. Calcul des possibilités forestières 2013-2018*. Bureau du Forestier en Chef, Roberval, Qc.

Poulin, J. (2013c). *Étapes du calcul des possibilités forestières. 2.4 - Évolution des strates*. Dans : *Manuel de détermination des possibilités forestières 2013-2018* (p. 55-61). Bureau du Forestier en Chef, Roberval, Qc.

Poulson, M.E., Donahue, R.A., Konvalinka, J. et Boeger, M.R.T. (2002). Enhanced tolerance of photosynthe-

- sis to high-light and drought stress in *Pseudotsuga menziesii* seedlings grown in ultraviolet-B radiation. *Tree Physiology*, 22(12), 829-838. doi: 10.1093/treephys/22.12.829
- Prégent, G. et Poliquin, R. (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.* (Vol. Rapport interne no 491). Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Direction de la recherche forestière. Ste-Foy, Québec.
- Prévost, M. (1996).** Effets du scarifiage sur les propriétés du sol et l'ensemencement naturel dans une pessière noire à mousses de la forêt boréale québécoise. *Canadian Journal of Forest Research*, 26, 72-86.
- Prévost, M. et Dumais, D. (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. *Canadian Journal of Forest Research*, 33(11), 2097-2107.
- Quinn, G.P. et Keough, M.J. (2002).** *Experimental design and data analysis for biologists.* University Press. Cambridge, UK.
- Roberntz, P. et Stockfors, J. (1998).** Effects of elevated CO2 concentration and nutrition on net photosynthesis, stomatal conductance and needle respiration of field-grown Norway spruce trees. *Tree Physiology*, 18(4), 233-241. doi: 10.1093/treephys/18.4.233
- Sakai, A. et Larcher, W. (1987).** *Frost survival of plants responses and adaptation to freezing stress.* Springer-Verlag. Berlin.
- Saucier, J.-P., J.-F., B., Grondin, P. et Robitaille, A. (2000).** *Les régions écologiques du Québec méridional (3e version).* Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles. Sainte-Foy, Québec.
- Scarratt, J.B. (1974).** Performance of tubed seedlings In Ontario. Proceedings of the North American Containerized Forest Tree Seedling Symposium (p. 310-320). Denver, CO.
- Stefansson, E. (1978).** *Root quality of pine plantations established with seedlings grown in multipots.* Root form of planted trees. British Columbia Ministry of Forests/ Canadian Forestry Service. Victoria, BC, Canada.
- Sutherland, D.C. et Day, R.J. (1988).** Container volume affects survival and growth of white spruce, black spruce and jack pine seedlings: A literature review *Northern Journal of Applied Forestry*, 5, 185-189.
- Teklemariam, T.A. et Blake, T.J. (2004).** Phenylalanine ammonia-lyase-induced freezing tolerance in jack pine (*Pinus banksiana*) seedlings treated with low, ambient levels of ultraviolet-B radiation. *Physiologia Plantarum*, 122(2), 244-253. doi: 10.1111/j.0031-9317.2004.00396.x
- Thiffault, N. (dir.). (2005).** *Choix du microsite sur sol scarifié en forêt boréale - quelques remarques.* MRNFF, Québec.
- Thiffault, N., Hébert, F. et Jobidon, R. (2012).** Planted *Picea mariana* growth and nutrition as influenced by silviculture x nursery interactions on an ericaceous-dominated site. *Silva Fennica*, 46(5), 667-682.
- Timmer, V.R. (1997).** Exponential nutrient loading: a new fertilization technique to improve seedling performance on competitive sites. *New Forests*, 13(1), 279-299. doi: 10.1023/a:1006502830067
- Timmer, V.R. et Aidelbaum, A.S. (1996).** *Manual for exponential nutrient loading of seedlings to improve planting performance on competitive forest sites.* Sault Ste. Marie, Ont. : Can. For. Serv., Great Lakes Forestry Centre, NODA/NFP Tech. Rep. TR-25.
- Townend, J. et Dickinson, A.L. (1995).** A comparison of rooting environments in containers of different sizes. *Plant and Soil*, 175, 139-146.
- Tremblay, P., Hébert, F., Allaire, J. et Walsh, D. (2011).** *Remise en production des milieux ouverts sur stations sèches dans la pessière à mousses du Saguenay-Lac-Saint-Jean et du nord du Québec : résultats 5 et 10 ans après la plantation pour l'épinette noire.* UQAC. Chicoutimi, Qc.
- Trottier, F. (1998).** *Performance des plantations établies*

par le ministère des Ressources naturelles, dans les forêts publiques du Québec, de 1986 à 1995. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles, Forêt Québec, Publication no RN98-3085. Québec.

Vaartaja, O. (1957). Photoperiodic responses in seedlings of northern tree species. *Canadian Journal of Botany*, 35(2), 133-138. doi: doi:10.1139/b57-014

Vaartaja, O. (1959). Evidence of photoperiodic ecotypes in trees. *Ecological Monographs*, 29(2), 91-111.

Vaartaja, O. (1963). Photoperiodic response in trees from warm climates. *International Journal of Biometeorology*, VI(2), 91-100.

Walsh, D., Allaire, J., Gagnon, D. et Lord, D. (2015a). *Choix d'un substrat et d'un calendrier de production optimal pour la culture du pin gris (Pinus banksiana Lamb.) dans le récipient 126-25. Dans : La production de plants d'épinette noire et de pin gris en récipients 126-25 et 113-25 : dix ans d'essais expérimentaux.* UQAC, Chicoutimi, Qc.

Walsh, D., Allaire, J., Gagnon, D. et Lord, D. (2015b). *Culture de semis d'épinette noire dans le nouveau récipient 113-25 : 1er essai en serre expérimentale. Dans : La production de plants d'épinette noire et de pin gris en récipients 126-25 et 113-25 : dix ans d'essais expérimentaux.* UQAC, Chicoutimi, Qc.

Walsh, D., Allaire, J., Gagnon, D. et Lord, D. (2015c). *Mise au point d'une régie de culture en récipient 113-25 adaptée au pin gris. Dans : La production de plants d'épinette noire et de pin gris en récipients 126-25 et 113-25 : dix ans d'essais expérimentaux.* UQAC, Chicoutimi, Qc.

Walsh, D. et Lord, D. (2015d). Calculs de l'IQS et du volume marchand à 60 ans : comparaisons entre les plants de très petites dimensions et conventionnels. UQAC. Chicoutimi, Qc.

Walsh, D., Allaire, J. et Lord, D. (2002). *Performance en plantation de plants d'épinette noire de petites dimensions : rapport d'étape pour la période 2001-2002.* UQAC, Chicoutimi, Qc.

Walsh, D., Allaire, J. et Lord, D. (2011). *Survie et croissance de mini-plants d'épinette noire reboisés en forêt boréale : bilan de 10 ans en plantation.* UQAC, Chicoutimi, Qc.

Walsh, D. et Lord, D. (2005). *Performance en plantation du pin gris cultivé en récipients 126-25.* UQAC, Chicoutimi, Qc.

Walsh, D., Tremblay, P., Paquette, S. et Lord, D. (2006). Remise en production de dénudés secs par reboisement de plants de petites dimensions que les plants conventionnels. Forum de transfert sur la recherche en aménagement et en environnement forestiers - Fonds québécois de la recherche sur la nature et les technologies (p. 7). Jeudi 6 avril 2006 à l'Hôtel Clarion, Québec : UQAC, Chicoutimi, Qc.

Wood, J.E. (1990). Black spruce and jack pine plantation performance in boreal Ontario: 10-year results. *Northern Journal of Applied Forestry*, 7(4), 175-179.

Yakimchuk, R. et Hoddinott, J. (1994). The influence of ultraviolet-B light and carbon dioxide enrichment on the growth and physiology of seedlings of three conifer species. *Canadian Journal of Forest Research*, 24(1), 1-8. doi: doi:10.1139/x94-001.

