# Mise à l'échelle opérationnelle du traitement hâtif de jours courts sur la morpho-physiologie et l'insuffisance racinaire des plants d'épinette noire (1+0) produits en tunnel

**Mémoire de recherche forestière n° 154**

**Direction de la recherche forestière**

par

Mohammed S. Lamhamedi, Mario Renaud, Pascal Desjardins et Linda Veilleux

Québec

# Mise à l'échelle opérationnelle du traitement hâtif de jours courts sur la morpho-physiologie et l'insuffisance racinaire des plants d'épinette noire (1+0) produits en tunnel

Mémoire de recherche forestière n° 154

par

Mohammed S. Lamhamedi[1], ing.f., agr., M. Sc., *Ph. D.*,

Mario Renaud, techn. for.

Pascal Desjardins, techn. for.

et

Linda Veilleux, techn. labo.

Gouvernement du Québec
Ministère des Ressources naturelles et de la Faune
Direction de la recherche forestière
2009

[1] Correspondance : mohammed.lamhamedi@mrnf.gouv.qc.ca

# Mandat de la DRF

La Direction de la recherche forestière (DRF) a pour mandat de participer activement à l'amélioration de la pratique forestière au Québec en réalisant des travaux, principalement à long terme et d'envergure provinciale, qui intègrent des préoccupations de recherche fondamentale et appliquée. Elle subventionne aussi des recherches universitaires à court ou à moyen terme. Ces recherches, importantes pour le ministère des Ressources naturelles et de la Faune (MRNF), sont complémentaires aux travaux de la DRF ou réalisées dans des créneaux où elle ne s'implique pas. Elle contribue à la diffusion de nouvelles connaissances, d'avis et de conseils scientifiques et à l'intégration de ces nouvelles connaissances ou savoir-faire à la pratique forestière.

# Les mémoires de recherche forestière de la DRF

Depuis 1970, chacun des Mémoires de recherche forestière de la DRF est révisé par un comité *ad hoc* formé d'au moins trois experts indépendants. Cette publication est produite et diffusée à même les budgets de recherche et de développement, comme autant d'étapes essentielles à la réalisation d'un projet ou d'une expérience. Ce document à tirage limité est également disponible dans notre site Internet en format pdf.

Vous pouvez adresser vos demandes à :

Ministère des Ressources naturelles et de la Faune
Direction de la recherche forestière
2700, rue Einstein, Québec (Québec)
Canada, G1P 3W8
Courriel : recherche.forestiere@mrnf.gouv.qc.ca
Internet : www.mrnf.gouv.qc.ca/forets/
connaissances/recherche

© Gouvernement du Québec
On peut citer ce texte en indiquant la référence.

Toutes les publications produites par la Direction de la recherche forestière, du ministère des Ressources naturelles et de la Faune, sont protégées par les dispositions de la Loi sur le droit d'auteur, les lois, les politiques et les règlements du Canada, ainsi que par des accords internationaux. Il est interdit de reproduire, même partiellement, ces publications sans l'obtention préalable d'une permission écrite.

ISBN : 978-2-550-56895-7
ISBN (PDF) : 978-2-550-56896-4
F.D.C. 232.3(047.3)(714)
L.C. SD 404

# Notes biographiques

Mohammed S. Lamhamedi a obtenu son diplôme d'agronomie générale à l'Institut agronomique et vétérinaire Hassan II (IAV Hassan II) du Maroc en 1983. En 1985, ce même établissement lui décernait le diplôme d'ingénieur agronome spécialisé en sciences forestières (M. Sc.). En 1991, l'Université Laval (Québec, Canada) lui décernait son doctorat en sciences forestières (*Ph. D.*). Après avoir été enseignant-chercheur en écophysiologie et en plantations forestières à l'IAV Hassan II de 1986 à 1991, il effectue un stage postdoctoral à l'Institut de recherche en biologie végétale de l'Université de Montréal. Il devient ensuite chercheur-visiteur au Centre de foresterie des Laurentides du Service canadien des forêts de 1993 à 1995, puis directeur scientifique dans le cadre du projet d'installation de trois pépinières pilotes financé par la Banque mondiale en Tunisie [Pampev Internationale - Direction générale des forêts, Tunisie] de 1996 à 1997. De plus, M. Lamhamedi a été attaché de recherche au Centre de recherche en biologie forestière (Université Laval) en 1998-1999. En 1999, il devient membre de l'Ordre des ingénieurs forestiers du Québec (OIFQ) après avoir complété sa formation universitaire en sciences forestières exigée par cet ordre. Chercheur émérite à la Direction de la recherche forestière (DRF) du ministère des Ressources naturelles et de la Faune (MRNF) du Québec depuis juin 1999, il est aussi chercheur associé au Centre d'étude de la forêt (CEF) et professeur associé à l'Université Laval. Il agit à titre de directeur scientifique associé à la revue canadienne de recherche forestière depuis janvier 2006 et membre du comité d'édition scientifique de la DRF du MRNF. Il a également participé à différentes phases de plusieurs projets de modernisation des pépinières forestières et de lutte contre l'ensablement (Tunisie, Ghana, Nicaragua, Maroc, etc.). Il est l'auteur de plusieurs publications scientifiques, techniques et du transfert de connaissances et du savoir-faire. Il dirige / codirige des étudiants inscrits à la maîtrise et au doctorat. Son expertise porte sur l'optimisation des régies de culture, le développement des standards de tolérance au gel des plants en pépinière forestière, la variabilité clonale des feuillus et des résineux, l'embryogenèse somatique des conifères, le bouturage des feuillus et des résineux et la production de plants en pépinière forestière. Parmi ses tâches,

# Notes biographiques (suite)

M. Lamhamedi s'occupe également du transfert d'expertises, de connaissances et du savoir-faire auprès des 24 pépinières forestières (6 gouvernementales et 18 privées) du Québec. Il a également développé un savoir-faire spécifique en matière de transfert de technologie et d'adaptation de l'expertise québécoise en production de plants dans le cadre de la modernisation des pépinières forestières des pays en développement.

Mario Renaud est technicien forestier spécialiste, diplômé du collège de Sainte-Foy en 1978. À l'emploi du ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec depuis 1978, il est présentement affecté au Service de la génétique, de la reproduction et de l'écologie, de la Direction de la recherche forestière. Il assiste le chargé de projets en physiologie végétale (production de plants).

Linda Veilleux est technicienne en chimie analytique, diplômée du collège de Lévis-Lauzon en 1981. De 1982 à 1984, elle travaille au pilotage industriel à l'usine de MAGNAQ-SNA (magnésium-amiante-Québec). À l'emploi du ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec depuis 1985, elle est présentement affectée au Service de la génétique, de la reproduction et de l'écologie, de la Direction de la recherche forestière. Elle assiste le chargé de projets en physiologie végétale (production de plants).

Pascal Desjardins est technicien forestier, diplômé du collège de Sainte-Foy en 1996. De 1996 à 2002, il travaille pour l'industrie forestière comme contremaître en aménagement et exploitation forestière. En 2002, il joint le Service de la génétique, de la reproduction et de l'écologie de la Direction de la recherche forestière du ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec. Depuis 2005, il assiste principalement le chargé de projets en physiologie végétale (production de plants).

# Avant-propos

Ce mémoire de recherche forestière a comme finalité de mettre à la disposition des pépinières forestières gouvernementales (6) et des pépinières forestières privées (18) de l'Office des producteurs de plants forestiers du Québec, les principaux résultats de recherche obtenus dans le cadre du projet intitulé : « Optimisation des principales pratiques culturales affectant l'insuffisance racinaire et la qualité morpho-physiologique des plants produits en pépinière forestière ». L'objectif général de ce projet est de concevoir et de vérifier la mise en application du traitement de jours courts en période de croissance active, à l'échelle opérationnelle, en faisant abstraction de la période de dormance et d'endurcissement. Cette pratique améliore la croissance des racines, la cohésion de la carotte et permet de diminuer de façon significative le rejet des plants à cause de l'insuffisance racinaire (critère 01).

Avant son démarrage, ce projet a été assujetti à une évaluation de pertinence et une évaluation scientifique, par des comités indépendants. L'évaluation de pertinence est effectuée par des praticiens du domaine concerné, tandis que l'évaluation scientifique est faite par les pairs. Ces mêmes comités sont responsables de l'évaluation des demandes de subvention déposées par les différentes institutions de recherche du Québec. Ces évaluations sont gérées par un organisme indépendant soit, le Fonds québécois de la recherche sur la nature et les technologies (Site Internet : www.fqrnt.gouv.qc.ca) et sont conformes aux standards d'évaluation utilisés par les organismes subventionnaires internationaux.

Ce projet a été élaboré et réalisé à la Direction de la recherche forestière (DRF) sous la supervision du Dr Mohammed S. Lamhamedi, chercheur émérite, avec l'appui et la supervision technique de M. Mario Renaud (technicien forestier spécialiste), M. Pascal Desjardins (technicien forestier) et de Mme Linda Veilleux (technicienne en chimie analytique). Les dispositifs expérimentaux ont été installés à la pépinière forestière privée de Girardville.

Les résultats obtenus et les approches décrites dans ce mémoire peuvent aussi être utilisés par les pépinières forestières gouvernementales et privées, les étudiants de deuxième et de troisième cycles, ainsi que par les professeurs, les physiologistes et les modélisateurs soucieux d'approfondir leurs connaissances à propos de la morpho-physiologie des plants d'épinette noire en réaction au traitement de jours courts appliqué à l'échelle opérationnelle.

Certains résultats de ce projet ont déjà fait l'objet d'une activité de transfert de connaissances auprès des 24 pépinières forestières du Québec, des gestionnaires, des comités techniques de certaines pépinières, des chercheurs et des étudiants diplômés. Ce transfert a été effectué dans le cadre du colloque, en marge du Carrefour de la recherche forestière 2007, intitulé : Des plants aux plantations : techniques, technologies et performances. D'autres résultats sur la mise en application du traitement de jours courts sous tunnel ont également fait l'objet d'un transfert d'expertise et d'un article scientifique soumis au processus de révision d'une revue scientifique d'envergure internationale.

# Remerciements

Nous tenons à remercier Mmes Nancy Tanguay, directrice générale, et Johanne Minier de la pépinière de Girardville, pour leur aide technique exceptionnelle tout au long de la durée de ce projet. Nous remercions tout le personnel du laboratoire de chimie organique et inorganique de la Direction de la recherche forestière (DRF) du ministère des Ressources naturelles et de la Faune (MRNF) du Québec pour les analyses minérales des échantillons.

Nous remercions M. Louis Blais (DRF, MRNF), ainsi que Mmes Nathalie Vandal et Hélène Crépeau du Service de consultation statistique de l'Université Laval pour leur aide précieuse lors des analyses statistiques. La qualification des plants selon les normes du MRNF a été effectuée avec la collaboration de M. Pierre Veilleux et Mme Michèle Tourigny de la Direction générale des pépinières et des stations piscicoles (DGPSP) du MRNF.

Nous remercions les réviseurs anonymes de leurs commentaires pertinents effectués dans le cadre du processus de la révision scientifique de ce mémoire. Nos remerciements s'adressent également à Mmes Sylvie Bourassa et Maripierre Jalbert pour la mise en page et à M. Pierre Bélanger de la DRF, pour la révision complète et l'édition de ce mémoire de recherche forestière.

Le financement de ce projet de recherche a été assuré par la DRF et l'appui financier supplémentaire de la DGPSP du MRNF accordé au Dr Mohammed S. Lamhamedi (n° projet : 1120551-112310094).

# Résumé

Afin de diminuer la quantité de plants rejetés à cause de l'insuffisance racinaire et l'absence de cohésion de la carotte des racines, un traitement de jours courts a été appliqué à une culture d'épinette noire (1+0) (*Picea mariana* [Mill.] B.S.P.) produite en récipients (conteneurs) (*IPL 67-50*), en pépinière forestière. L'objectif de ce traitement était d'augmenter la masse des racines et l'allocation de la matière sèche vers les racines des plants. L'évaluation continue des variables de croissance et l'élaboration de modèles logistiques ont montré l'effet immédiat du traitement de jours courts d'arrêter la croissance en hauteur et d'induire la formation de bourgeons. Les modèles logistiques conçus pour les deux traitements seront utilisés comme standards de croissance. L'intégration de ces modèles dans le logiciel *Plantec2* en est l'application pratique. Ce traitement a également augmenté de façon significative l'allocation de la matière sèche vers les racines, le contenu en glucides, ainsi que la masse sèche des racines. Les modèles allométriques ont démontré que le recours au traitement de jours courts en été augmentait l'accroissement moyen de la masse des racines de 25 % par rapport au traitement témoin et ce, tout au long de la saison de croissance et cela pour une même masse de la partie aérienne, ce qui améliore donc la croissance des racines et la cohésion de la motte des racines de façon significative. L'évaluation de la qualité des plants a montré que le taux de conformité des plants d'épinette noire (1+0) soumis au traitement de jours courts était significativement supérieur (90,8 %) à celui du traitement témoin (70,5 %). À la fin de la saison de croissance, les concentrations moyennes en éléments minéraux des parties aériennes ne montraient pas de différences importantes entre les deux traitements, mais montraient un léger effet de dilution dans les plants témoins. Par contre, les concentrations en minéraux des racines, à la fin de la saison de croissance, étaient identiques pour les deux traitements.

L'absence de débourrement consécutif au traitement de jours courts pourrait être expliquée par un contrôle rigoureux de la fertilité et des teneurs en eau du substrat tout au long de la saison de croissance, ainsi que par le choix judicieux d'une provenance de semences dont la réaction au traitement de jours courts est très forte. Nos observations ont révélé que le débourrement consécutif au traitement de jours courts variait selon l'origine génétique des semences de l'épinette noire et que l'application du traitement de jours courts en phase de croissance active (début juillet) ne garantissait pas un arrêt de croissance définitif tout au long de la saison de croissance. Cependant, une optimisation et un suivi attentif des régies de fertilisation et d'irrigation tout au long de la saison de croissance s'avéraient nécessaires pour atteindre les résultats recherchés par ce traitement. Le traitement de jours courts ne pouvait pas à lui seul améliorer la cohésion de la carotte et réduire le taux de rejet des plants attribuable à l'insuffisance racinaire. Il est essentiel que le pépiniériste apporte une attention particulière à toutes les étapes et techniques de production de plants.

Les résultats de cette étude indiquent clairement que le recours au traitement de jours courts ne peut qu'améliorer la qualité morpho-physiologique des plants, plus particulièrement celle des racines, ainsi qu'accroître la rentabilité des pépinières forestières en diminuant la quantité de plants rejetés et en augmentant le taux de conformité.

**Mots clés :** *Picea mariana*, pépinière forestière, jours courts, modélisation de la croissance, nutrition minérale, glucides, allocation du carbone, racines, tolérance au gel.

# Abstract

*To reduce the number of seedlings rejected due to insufficient root development and the absence of root plug cohesion, a short day treatment was applied to a nursery-grown crop of containerized* (IPL 67-50) *(1+0) black spruce (*Picea mariana *[Mill.] B.S.P.), with the objective of increasing root mass and allocation of dry matter to the root system. Continuous evaluation of growth variables and the development of logistical models illustrated the immediate effect of the short day treatment on the induction of bud formation and cessation of height growth. The logistic models developed for both treatments can be used as growth standards and can also be integrated in the* Plantec2 *software. The treatment also favoured a significant increase of the allocation of dry matter, carbohydrate content and dry mass to the root system. The allometric models illustrated that, for the same shoot mass, the short day treatment strategy contributed to, on average, a 25% increase in root mass with respect to the control treatment over the growing season. Consequently, this led to a significant improvement in root growth and root plug cohesion. An evaluation of seedling quality before delivery to the planting site showed that the percentage of (1+0) black spruce seedlings subjected to short day treatments had a significantly higher percentage (90.8%) of plants that conformed to the quality standards than those subjected to the control treatment (70.5%). At the end of the growing season, there was no significant difference between the average concentrations of mineral nutrients in the shoot tissue from the two treatments. However, a slight dilution effect was found in the seedlings grown under the control treatment. On the final sampling date, the average root tissue concentrations were similar for the two treatments.*

*The absence of bud burst following a short day treatment may be explained by a strict control of substrate fertility and water content throughout the growing season as well as by a judicious choice of a seed provenance that responds very well to short day treatments. Our observations revealed that bud burst can be variable after a short day treatment, because it depends on the genetic origin of the black spruce seeds. The application of a short day treatment during the active growing phase (early July) does not guarantee a definitive cessation of growth for the duration of the growing season. Judicious monitoring and optimization of fertilization and irrigation regimes throughout the growing season are necessary if the anticipated treatment results are to be achieved. Short day treatments alone cannot improve root plug cohesion and decrease the number of seedlings rejected due to insufficient root development. Nursery growers must pay particular attention to all stages and techniques involved in the seedling production process.*

*The results of this study clearly indicate that the use of a short day treatment contributes to improve the morphophysiological quality of seedlings, particularly that of the root system. The increase in the percentage of seedlings meeting the quality criteria, and subsequent reduction in number of rejected seedlings, may help to increase forest nursery profitability.*

***Key words:*** Picea mariana*, forest nursery, short day, growth modelling, mineral nutrition, carbohydrates, carbon allocation, roots, frost tolerance.*

# Table des matières

page

**Avant-propos** ..... v

**Remerciements** ..... vii

**Résumé** ..... ix

***Abstract*** ..... xi

**Liste des figures** ..... xv

**Introduction** ..... 1

**Chapitre premier – Matériel et méthodes** ..... 3

1.1 Matériel végétal et dispositif expérimental ..... 3

1.2 Production des plants d'épinette noire ..... 3

1.3 Évaluation des variables environnementales ..... 5

1.4 Fertilité du substrat, croissance, nutrition minérale et formation des bourgeons des plants d'épinette noire (1+0) ..... 5

1.5 Formation des bourgeons des plants d'épinette noire (1+0) ..... 6

1.6 Effets du traitement de jours courts sur les glucides ..... 6

1.7 Tolérance au gel des plants d'épinette noire ..... 6

1.8 Qualification des plants d'épinette noire (1+0) ..... 7

1.9 Analyses statistiques, modélisation de la croissance et de l'allocation de la matière sèche entre les parties aériennes et les racines ..... 7

**Chapitre deux – Résultats** ..... 9

2.1 Variables environnementales et teneur en eau du substrat pendant la saison de croissance et la période de traitement de jours courts ..... 9

2.2 Croissance des plants, formation, débourrement des bourgeons et taux de conformité en réaction au traitement de jours courts ..... 9

2.3 Modélisation de la croissance et allocation de la masse sèche entre les parties aériennes et les racines ..... 14

2.4 Fertilité du substrat et nutrition minérale ..... 14

2.5 Glucides ..... 19

2.6 Tolérance au gel ..... 19

**Chapitre trois – Discussion** ..... 21

**Conclusion** ..... 23

**Références bibliographiques** ..... 25

# Liste des figures

page

**Figure 1.** a) Vue générale des tunnels, b) du dispositif expérimental en période du traitement de jours courts et c) en absence du traitement de jours courts; d) Plants témoins dans une enceinte non soumise au traitement de jours courts; e) Système d'enregistrement (CR10X) des différentes variables environnementales; f) Exemples de sondes utilisées pour mesurer l'intensité de lumière, les températures à la surface de la silice et du substrat et l'humidité relative de l'air. ..... 4

**Figure 2.** a) Variations de la température et de l'humidité relative de l'air dans le tunnel pendant la saison de croissance des plants d'épinette noire (1+0) produits sous tunnel en pépinière forestière; b) Variations des teneurs en eau du substrat déterminées tout au long de la saison de croissance à l'aide de la méthode gravimétrique (n = 12 récipients). Les flèches indiquent la période de croissance active durant laquelle le traitement de jours courts a été appliqué (30 juin au 18 juillet 2006). Les barres indiquent les erreurs standards associées aux teneurs en eau moyennes du substrat (n = 12 récipients). ..... 10

**Figure 3.** a) Variations des températures de l'air et à la surface des cavités des récipients en présence des plants témoins et de ceux soumis au traitement de jours courts; b) Variations des températures de l'air et du substrat des plants d'épinette noire (1+0) témoins et soumis au traitement de jours courts (JC). ..... 11

**Figure 4.** Variations saisonnières de la hauteur a); du diamètre au collet b); de la masse sèche des parties aériennes c); de la masse sèche des racines d) et de la masse sèche totale e) des plants d'épinette noire (1+0) témoins et soumis au traitement de jours courts (n = 250 ± ES, Erreur standard). Les flèches indiquent la période de croissance active durant laquelle le traitement de jours courts a été appliqué (30 juin au 18 juillet 2006). ..... 12

**Figure 5.** Morphologie et croissance des plants a) à la fin du traitement de jours courts (18 juillet 2006); b) en début d'automne (11 septembre 2006). Remarquez les différences en matière de croissance en hauteur et de développement des racines superficielles autour de la carotte. Les flèches (Figure b) indiquent l'absence ou une faible densité de racines sur une portion de la carotte de certains plants témoins; c) à la fin de la saison de croissance (9 novembre 2006). Notez le chevelu racinaire abondant et la croissance en hauteur des plants soumis au traitement de jours courts par rapport aux plants témoins. ..... 13

**Figure 6.** a) Pourcentage de formation des bourgeons des plants témoins. Les plants soumis au traitement de jours courts ont formé leurs bourgeons dès la fin du traitement (18 juillet 2006); b) Débourrement relativement rapide des bourgeons au printemps des plants soumis au traitement de jours courts par rapport aux plants témoins (14 mai 2007) après avoir passé, dans les deux cas, l'hiver sous la neige. ..... 15

**Figure 7.** Modèles logistiques de la croissance a) en hauteur et b) en diamètre des plants soumis aux deux traitements. ..... 16

page

**Figure 8.** Modèles allométriques d'allocation de la matière sèche entre les parties aériennes et les racines des plants soumis au traitement de jours courts et des plants témoins. ..... 16

**Figure 9.** Évolution de la fertilité moyenne des deux traitements du substrat a) en azote (N); b) phosphore (P); c) en potassium (K) et de d) la conductivité électrique tout au long de la saison de croissance des plants dans les deux traitements (n = 5 échantillons composites ± ES. Chaque échantillon composite est constitué du mélange du substrat extrait de 50 plants/bloc/traitement)..... 17

**Figure 10.** Contenu en éléments minéraux des parties aériennes et des racines des plants soumis au traitement de jours courts et des plants témoins (n = 5 échantillons composites ± ES. Chaque échantillon composite est constitué du mélange des parties aériennes ou des racines issues de 50 plants/bloc/traitement). ..... 18

# Introduction

Actuellement, plus de 150 millions de plants forestiers sont produits annuellement au Québec selon diverses combinaisons et scénarios de production (Lamhamedi *et al.* 2007). Ainsi, près de 2500 différents types de cultures de plants (essence, racines nues, modèle du récipient, volumétrie de la cavité, gabarit du plant, semence ou bouture, date de livraison, âge du plant livré, etc.) sont produits dans 24 pépinières forestières (18 pépinières forestières de l'Office des producteurs privés et 6 pépinières gouvernementales). Le pépiniériste doit composer avec certaines contraintes, non contrôlables, qui déclassent la qualité morpho-physiologique des plants. Ces contraintes, notamment la rudesse et la variabilité inter et intra-annuelle du climat (gel hâtif ou tardif, épaisseur de la couverture nivale et son effet sur le gel racinaire et la dessiccation hivernale des plants, été sec ou pluvieux, degrés-jours cumulés, etc.), se conjuguent à la très courte durée de la saison de croissance des plants en pépinière forestière d'un climat nordique. En général, les plants produits en récipients sont cultivés sous tunnel lors de la première saison de croissance (mai à mi-novembre), sans recourir à l'utilisation de la lumière artificielle. Par la suite, selon le gabarit et le type de plants recherchés, les plants sont placés en hivernage sous un couvert de neige naturelle (généralement sans utiliser de toile protectrice), en préparation d'une deuxième saison de croissance à l'extérieur en pépinière ou de leur mise en terre sur un site de reboisement.

Avant leur mise en terre, les plants produits dans toutes les pépinières forestières du Québec sont assujettis à 25 critères et normes de qualité morpho-physiologiques très stricts propres à chaque mode de production (récipients ou à racines nues) et à chaque gabarit de plant. L'évaluation de la qualité des plants (1+0) et (2+0), produits en récipients selon ces critères, est effectuée à l'automne et au printemps précédant leur livraison et leur mise en terre sur un site de reboisement. Par exemple, la concentration foliaire en azote et l'insuffisance racinaire figurent parmi ces 25 critères et normes de qualité des plants. Dans le cas de l'insuffisance racinaire, le plant sera rejeté si la motte des racines se défait partiellement ou complètement après extraction de la cavité, montre des portions distinctes liées par un système racinaire non endommagé avec plus de 5 mm de discontinuité entre les portions ou si plus de 33 % des racines situées en périphérie sont mortes ou nécrosées (Veilleux *et al.* 2008). Le bilan et l'analyse des données issues de la qualification des plants de l'ensemble des 24 pépinières forestières font ressortir que le rejet des plants, pour la période 2003 à 2006, est attribuable en grande partie à neuf défauts majeurs. Parmi ces défauts, le taux d'insuffisance racinaire des plants d'épinette noire produits dans le récipient 67-50, évalué à l'automne, atteint 54,3 % (Lamhamedi *et al.* 2007). Ce taux d'insuffisance racinaire, sans triage préalable des plants, varie de façon significative d'un producteur de plants à l'autre. Cependant, le recours au triage des plants, juste avant l'évaluation du printemps et la livraison des plants, contribue de façon significative à diminuer le taux de rejet des plants. En plus des conditions environnementales différentes auxquelles sont assujetties les pépinières, et malgré l'utilisation de sources de semences améliorées génétiquement, ces variations d'insuffisance racinaire seraient fortement influencées par l'interaction de différentes techniques culturales mises en place par les producteurs. En effet, ces techniques altèrent la croissance et le développement du système racinaire des plants de façon positive ou négative (Davis et Jacobs 2005, Lamhamedi 2006, Mathers *et al.* 2007).

La croissance, la physiologie, la cohésion de la motte des racines, l'architecture et le développement des racines des plants, produits en récipients dans les pépinières forestières, sont le résultat de plusieurs interactions complexes de variables environnementales propres à chaque pépinière et aux différentes techniques culturales et ce, à chaque phase de production et à chaque stade de croissance des plants. Plusieurs techniques culturales ont été optimisées et ajustées, à l'échelle opérationnelle, afin d'améliorer la croissance des racines et la cohésion de la carotte. Ce sont notamment, le type de récipient (Lamhamedi *et al.* 1998a, Landis *et al.* 1990), le recours au stress hydrique (Lamhamedi *et al.* 1997), le substrat de croissance à base de tourbe et de compost (Bernier *et al.* 1995, Caron 2001, Heiskanen 1993, Veijalainen *et al.* 2008), ainsi que les régies d'irrigation et de fertilisation (Lamhamedi *et al.* 2003a, Landis *et al.* 1989). Nos récents travaux ont démontré l'existence

de différences très marquées, lors de la saison de croissance, de besoins en eau des plants de deux essences de la forêt boréale soit, l'épinette blanche (*Picea glauca* [Moench.] Voss) (Lamhamedi *et al.* 2001, Stowe *et al.* 2001) et l'épinette noire (*Picea mariana* [Mill.] B.S.P.) (Bergeron *et al.* 2004, Lamhamedi *et al.* 2003a).

Ainsi, l'optimisation des teneurs en eau du substrat de la rhizosphère et de sa fertilité, selon l'essence, contribue de façon significative à améliorer la croissance et l'architecture des racines de ces deux espèces. Cependant, lors de la deuxième saison de croissance à l'extérieur, la variabilité clonale (Lamhamedi *et al.* 2000), combinée aux variations des teneurs en eau du substrat, procure aux plants une variabilité spatiale très prononcée des variables morphologiques de croissance, y compris celle des racines (Lamhamedi *et al.* 2006).

Afin d'améliorer davantage la qualité du système racinaire, tout en procurant une bonne cohésion à la carotte, le traitement de jours courts pourrait être utilisé comme technique culturale, de façon précoce, pendant la saison de croissance. Ce traitement est généralement utilisé à l'échelle opérationnelle dans plusieurs pépinières forestières de l'Amérique du Nord et des pays scandinaves, pour induire la formation des bourgeons, contrôler la croissance en hauteur et améliorer la tolérance au gel en préparation à l'hivernage des plants en chambre réfrigérée (-2 à -4 °C) ou à l'extérieur, sous la neige (Bigras *et al.* 2001, Colombo 1996, Colombo *et al.* 2001, Grossnickle *et al.* 1991, Hawkins et Shewan 2000, Kohmann et Johnsen 2007, Krasowski *et al.* 1993, MacDonald et Owens 2006, Rostad *et al.* 2006, Turner et Mitchell 2003). Il est également utilisé pour améliorer la performance des plants dans des conditions de sécheresse (Luoranen *et al.* 2007) et sur le site de reboisement (Tan 2007, Tan *et al.* 2008). D'autres travaux ont également montré que le contrôle et la diminution significative de la teneur en eau du substrat induisent un arrêt de croissance et une formation hâtive des bourgeons, vers la fin de la première saison de croissance de l'épinette blanche et de l'épinette noire (Calmé *et al.* 1993, Stowe *et al.* 2001, Bergeron *et al.* 2004). Ainsi, nous supposons que l'application d'un traitement de jours courts en phase de croissance active des plants, pendant une période relativement courte, provoquera l'initiation et la formation des bourgeons, un arrêt de la croissance en hauteur et une allocation accentuée de la matière sèche vers les racines. Cette allocation des produits de la photosynthèse courante augmenterait de façon significative la masse des racines et la cohésion de la carotte. Pour ce qui est des productions hivernales en serre, cette technique a été utilisée au Québec (pépinière d'East-Angus) dans le but d'induire une formation précoce des bourgeons afin de livrer des plants en dormance sur les sites de reboisement. À notre connaissance, le traitement de jours courts n'a jamais été appliqué comme technique culturale aux essences de la forêt boréale, pendant la période de croissance active en pépinière. L'objectif de ce traitement est d'améliorer la qualité du système racinaire tout en permettant une allocation accrue de la matière sèche au profit de l'augmentation de la masse des racines et une meilleure cohésion de la carotte. Jusqu'à présent, nos connaissances demeurent très limitées en matière de modélisation de la croissance des variables non destructives et les plus utilisées par les pépiniéristes. Il en est de même de la quantification de l'allocation de la matière sèche vers les racines en réaction aux traitements de jours courts. De plus, l'effet du traitement de jours courts sur la qualité des plants devra être évalué, notamment, le contenu en glucides et en éléments minéraux.

Ainsi, les objectifs généraux consistent à :

i) préciser les conditions environnementales et les régies de culture de production de plants en pépinière forestière afin de mieux cerner les effets du traitement de jours courts appliqué en période de croissance active;

ii) évaluer les effets du traitement de jours courts, en période de croissance active, sur la croissance des racines et des parties aériennes, la nutrition minérale, les glucides et la formation des bourgeons des plants d'épinette noire (1+0) produits sous tunnel en pépinière forestière; et

iii) quantifier les effets du traitement de jours courts par rapport à la croissance des variables morphologiques et aux patrons d'allocation de matière sèche entre les racines et les parties aériennes, à l'aide de modèles logistiques et allométriques.

# Chapitre premier

## Matériel et méthodes

### 1.1 Matériel végétal et dispositif expérimental

L'ensemencement des graines d'épinette noire (lot de semences : EPN-V1-LEV-2-2; code de culture GI05EPN05-C06) a été effectué à la fin mars 2006, dans le récipient 67-50 (IPL, Saint-Damien, Québec, Canada; 67 cavités, 50 $cm^3$/cavité; longueur : 35,2 cm, largeur : 21,9 cm, hauteur : 9 cm; nombre de plants/$m^2$ : 864) dont les cavités ont été remplies d'un substrat à base de tourbe relativement humide et ajusté à une densité moyenne de 0,09 g/$cm^3$. Les pourcentages des grosses particules (celles retenues sur les tamis de 10 mailles [mesh]), des grosses et des moyennes (celles retenues sur les tamis de 20 mailles), des particules courtes (celles retenues sur les tamis de 40, 100 et 200 mailles) et des particules fines (celles retenues sur les tamis de 200 mailles) représentaient respectivement 12, 29, 60 et 11 %. Par la suite, les récipients ont été installés dans un des tunnels (Figure 1) de la production normale de la pépinière forestière privée de Girardville (latitude : 49° 01' 06" N.; longitude : 72° 30' 42" O.). Ce tunnel, d'une capacité moyenne de 250 000 plants, a été couvert d'une toile de polyéthylène laiteux (blanc) de 4 mm d'épaisseur, transmissible à la lumière incidente de 50 à 55 % (*Ginegar Plastic Products Ltd, multi-layer greenhouse cover film*, type UVA/White 45 %). Cette toile est rétractable sur les deux côtés du tunnel afin de faciliter l'aération et faire varier les températures de l'air à l'intérieur de celui-ci. L'éclaircie a été effectuée une fois la germination terminée (début mai), sans recourir au repiquage de semis dans les alvéoles vides. Le traitement de jours courts (JC) (Figure 1) a été appliqué du 30 juin au 18 juillet 2006. Ce traitement consiste à recouvrir, quotidiennement, tous les plants, d'une toile en polythène noire. Cette dernière est placée au-dessus des apex terminaux des plants à une hauteur d'environ 40 cm, afin de modifier la photopériode (lumière/obscurité : 8 h/16 h). Pendant la période du traitement de jours courts, les plants témoins ont été exposés à une lumière naturelle du jour dont la durée variait de 16 h 03 à 15 h 33 (Saguenay : 48° 25′ 00″ N., 71° 04′ 00″ O., Québec, Canada). Les récipients des plants témoins étaient soumis à la photopériode naturelle (Figure 1). Les deux traitements (JC et témoin) ont été installés tout au long du tunnel dans un dispositif de cinq blocs aléatoires complets. Le traitement témoin de chacun des blocs était formé d'une enceinte parallélépipédique dans laquelle six récipients étaient déposés. Les parois de cette enceinte étaient constituées de polystyrène de couleur blanche, étanche au passage des rayons lumineux en direction des récipients voisins quand ces derniers étaient exposés à une obscurité complète en période de traitement de jours courts. À l'inverse de récents travaux (Kohmann et Johnsen 2007), les récipients du traitement témoin ont été distribués de façon aléatoire dans chacun des blocs.

### 1.2 Production des plants d'épinette noire

À l'exception de la durée d'exposition à la lumière, les plants des deux traitements ont été soumis aux mêmes régies d'irrigation et de fertilisation. Les plants d'épinette noire ont été produits selon les techniques habituelles de production des plants d'épinette noire (1+0) à la pépinière de Girardville. La régie d'irrigation a été gérée en respectant les seuils de teneurs en eau du substrat propres à chaque stade de croissance des plants d'épinette noire (1+0) (Lamhamedi *et al.* 2001). L'irrigation a été assurée par des gicleurs dotés d'un spectre d'arrosage carré (7,3 m x 7,3 m) (Rain-Jet, modèle 66U, Harnois, Québec, Canada). Le suivi des teneurs en eau du substrat (%, v/v) a été fait à l'aide de la méthode gravimétrique. Ainsi, douze récipients ont été choisis aléatoirement, de façon à couvrir tout le patron d'arrosage, et pesés deux à trois fois par semaine. La conversion des masses des récipients, en teneurs en eau du substrat, a été effectuée en supposant que 1 $cm^3$ d'eau = 1 g, selon l'équation suivante :

$$MTR = (MR + S + MSS) + \frac{VR * TE}{100} \qquad [1]$$

MTR : masse totale du récipient (g); MR : masse du récipient (g); S : masse de la silice (g); MSS : masse sèche du substrat (g); VR : volume total du récipient ($cm^3$); TE : teneur en eau du substrat (v/v).

Les masses des plants pouvaient être ignorées, surtout pendant la première saison de croissance. Dans le cas contraire, elles pouvaient être prises en compte surtout si les échantillonnages destructifs de l'évaluation de la croissance et du statut nutritionnel des plants étaient effectués à chaque deux semaines.

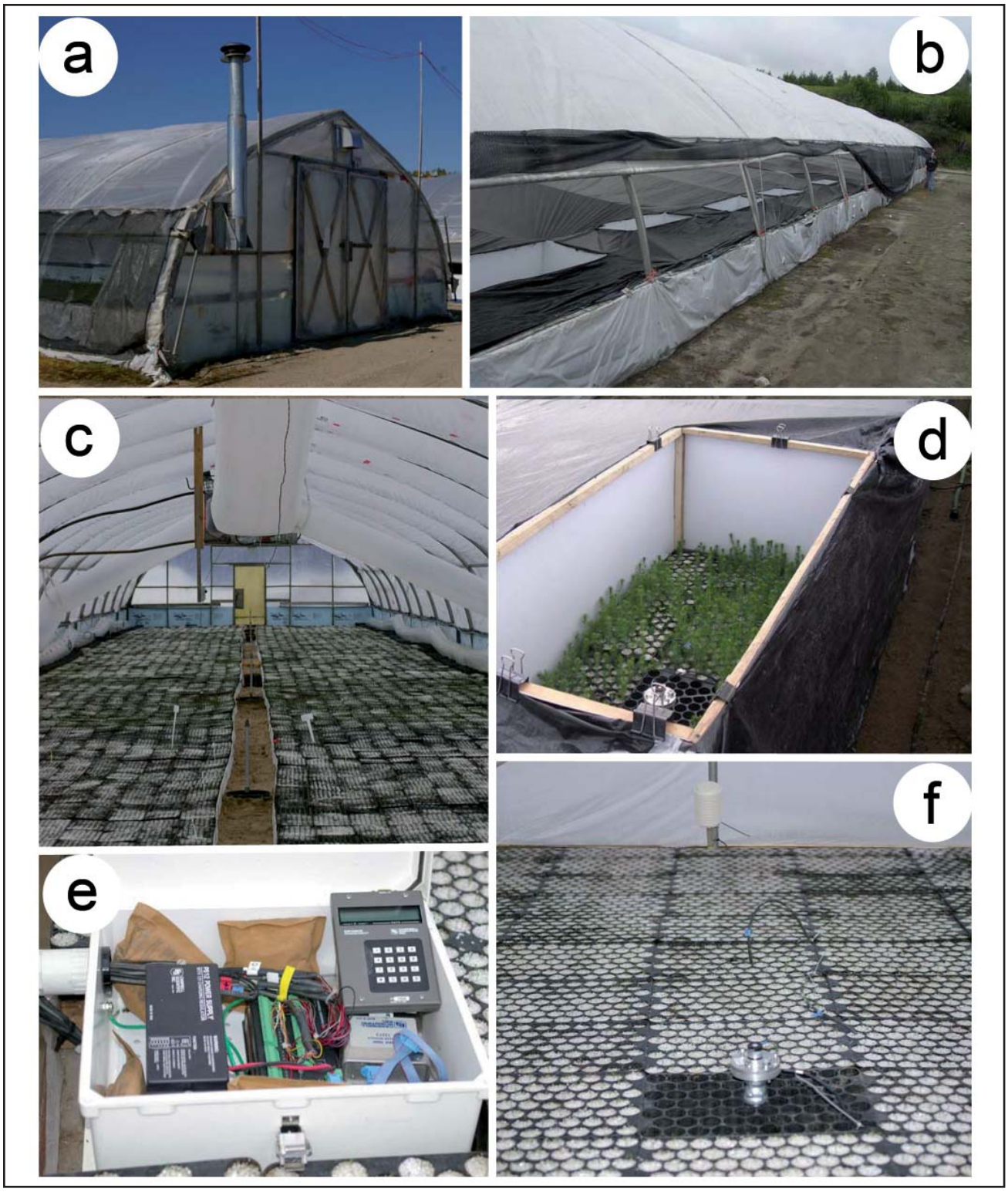



Figure 1. a) Vue générale des tunnels, b) du dispositif expérimental en période du traitement de jours courts et c) en absence du traitement de jours courts; d) Plants témoins dans une enceinte non soumise au traitement de jours courts; e) Système d'enregistrement (CR10X) des différentes variables environnementales; f) Exemples de sondes utilisées pour mesurer l'intensité de lumière, les températures à la surface de la silice et du substrat et l'humidité relative de l'air.

Les quantités d'azote, de phosphore et de potassium appliquées tout au long de la saison de croissance (5 mai – 26 septembre 2006) ont respectivement atteint 18, 15 et 18 mg/plant. La solution contenait également des éléments minéraux secondaires et des oligo-éléments. La fertilisation a été appliquée deux fois par semaine selon les besoins des plants et les standards de croissance à atteindre, en adaptant l'approche de nutrition minérale en usage dans les pépinières forestières du Québec (LANGLOIS et GAGNON 1993, GIRARD *et al.* 2001).

### 1.3 Évaluation des variables environnementales

L'évaluation des variables environnementales a été effectuée au moyen de plusieurs sondes branchées à un système d'acquisition de données (Figure 1) (modèle CR10X, Campbell Scientific, Edmonton, Alberta, Canada). Ces sondes ont enregistré, en continu, la température du substrat, la température à la surface de la silice (modèle 107B, Campbell Scientific, Edmonton, Alberta, Canada) et l'intensité de lumière (modèle LI-190SB Quantum, LI-COR, Lincoln, Nebraska, États-Unis), des deux traitements (JC et témoin). Les sondes de la variable « intensité lumineuse » avaient été installées dans des récipients non ensemencés, c'est-à-dire sans plants, afin d'éviter l'atténuation de la lumière par les parties aériennes des plants en croissance. La température et l'humidité relative de l'air ont également été enregistrées à l'aide d'une sonde (modèle HMP35C, Campbell Scientific, Edmonton, Alberta, Canada), à l'intérieur de la partie centrale du tunnel, à 2 m au-dessus du sol.

### 1.4 Fertilité du substrat, croissance, nutrition minérale et formation des bourgeons des plants d'épinette noire (1+0)

La fertilité du substrat, la croissance des plants et la nutrition minérale ont été évaluées tout au long de la saison de croissance. L'échantillonnage a généralement été effectué à un intervalle régulier de deux semaines (juin – début novembre). Dix échantillonnages ont été effectués pour le traitement de jours courts, alors que seulement cinq échantillonnages ont été nécessaires dans le cas du traitement témoin. De ces cinq derniers échantillonnages, trois ont été prélevés après le traitement de jours courts. Les dates d'échantillonnage ont été choisies en tenant compte de nos résultats obtenus dans des conditions similaires de production, afférentes à l'évolution des variables de croissance des plants d'épinette noire (1+0) (LAMHAMEDI *et al.* 2001). Le premier récipient du premier bloc de chaque date d'échantillonnage a été choisi aléatoirement. Par contre, les quatre autres récipients des blocs restants, soit un récipient/bloc/traitement, ont été choisis systématiquement puisque leur position était similaire au premier récipient. De chacun de ces récipients, 50 plants parmi les 67 ont été échantillonnés aléatoirement et extraits doucement de leurs cavités, soit un total de 250 plants/traitement/date. Ces échantillons ont permis de mesurer plusieurs variables morpho-physiologiques comme la hauteur (50 plants/bloc/traitement), le diamètre au collet (50 plants/bloc/traitement), les masses sèches des parties aériennes et des racines à raison de cinq échantillons composites par bloc/traitement (10 plants/échantillon composite/bloc/traitement), la nutrition minérale des plants à raison d'un échantillon composite par bloc/traitement (50 plants/échantillon composite/bloc). Les masses des parties aériennes et des racines ont été déterminées après un séchage de 48 heures dans une étuve à 60 °C.

Les différents échantillons de racines ou de parties aériennes sont broyés puis minéralisés à l'acide sulfurique en présence de sélénium et de peroxyde dans des tubes de digestion à 370 °C afin de quantifier la teneur en azote. La quantification de l'azote a été déterminée en utilisant un spectrophotomètre à flux continu (modèle QuickChem 8000, Lachat Instruments, Milwaukee, WI, États-Unis). Les autres éléments (P, K, Ca et Mg) sont directement dosés dans la solution d'acide sulfurique diluée, à l'aide d'un spectromètre d'émission atomique au plasma (modèle ICAP 9000, Thermo Instruments, Franklin, MA, États-Unis). Quant au substrat tourbeux, le dosage des éléments nutritifs a été effectué au moyen d'une extraction à l'eau par compression. Les méthodes d'analyse de ces éléments minéraux sont décrites en détails par WALINGA *et al.* (1995).

La conductivité du substrat a été mesurée, à la suite d'une mise en suspension dans l'eau, en utilisant un rapport tourbe/eau de 1/20, et à l'aide d'un conductimètre (modèle CDM83, Radiometer Copenhagen, Danemark). La mesure a été prise directement dans la solution du sol de la pâte saturée selon la procédure décrite par KALRA et MAYNARD (1992). Si la température n'était pas égale à 25 °C, un facteur de correction de 2 % par degré centigrade était appliqué.

Les analyses minérales du substrat et des plants ont été effectuées par le laboratoire de chimie organique et inorganique (ISO/CEI 17025) du

Service du soutien scientifique de la Direction de la recherche forestière (Forêt Québec, ministère des Ressources naturelles et de la Faune). La fertilité ($N\text{-}NO_3^-$, $N\text{-}NH_4^+$, Nminéral, P, K, Ca et Mg), le pH ($H_2O$) et la conductivité électrique du substrat de chaque date d'échantillonnage ont été déterminées en utilisant un échantillon composite/bloc/traitement (50 carottes/échantillon composite/bloc).

### 1.5 Formation des bourgeons des plants d'épinette noire (1+0)

La formation des bourgeons a été évaluée en utilisant neuf plants de la rangée située au centre d'un récipient/bloc/traitement, soit un total de 45 plants/traitement, du 29 juin au 10 août 2006. Les récipients ont été choisis aléatoirement. Les plants des neuf cavités avaient préalablement été identifiés à l'aide de numéros de 1 à 9 pour faciliter les évaluations répétées de la formation des bourgeons sur les mêmes plants. Ces évaluations ont été effectuées trois fois/semaine (lundi, mercredi, vendredi), jusqu'à l'apparition d'un bourgeon terminal blanc sur tous les plants. Avant la livraison et la mise en terre des plants sur le site du reboisement, des observations (11 mai 2007) ont également été effectuées sur l'état du débourrement des bourgeons des plants soumis aux deux traitements.

### 1.6 Effets du traitement de jours courts sur les glucides

L'analyse des glucides des parties aériennes et des racines a été faite au début (27 juin 2006) et à la fin du traitement de jours courts (18 juillet 2006). À cet effet, dix plants par bloc/traitement (JC et témoin) ont été échantillonnés de façon aléatoire avant le début du traitement et à la fin du traitement de jours courts. Les parties aériennes ont été séparées des racines au niveau du collet, après le lavage de leurs racines. Les glucides analysés dans les racines et dans les parties aériennes sont : amidon, raffinose, sucrose, glucose, fructose, pinitol, mannitol et inositol. Les glucides ont été extraits en utilisant les racines et les parties aériennes issues de chaque échantillon composite (dix parties aériennes ou racines/bloc/traitement = échantillon composite). Leur extraction a été faite dans une solution à base d'éthanol et d'eau (éthanol/eau : 80/20). Leur identification et le dosage ont été effectués à l'aide d'un chromatographe liquide (modèle 2414, Waters, MA, États-Unis) équipé d'une colonne spécifique pour l'analyse des sucres et d'un détecteur à indice de réfraction. L'amidon des racines et des parties aériennes a été dosé à l'aide d'un spectrophotomètre (modèle Spectronic 20, Bausch & Lomb, CA, États-Unis) dont la longueur d'onde avait été réglée à 360 nm. Les analyses des glucides ont été effectuées selon les méthodes décrites par Lambany (1994) et Lamhamedi *et al.* (1998b).

### 1.7 Tolérance au gel des plants d'épinette noire

L'échantillonnage aléatoire des plants, pour connaître la tolérance au gel, a eu lieu le 12 septembre 2006. Les plants ont été soumis à cinq températures : $T_0$ = 4 °C plants témoins, $T_1$ = -4 °C, $T_2$ = -6 °C, $T_3$ = -8 °C et $T_4$ = -12 °C. Trois plants/température/bloc/traitement (JC et témoin) ont été utilisés, soit 15 plants/bloc/traitement, pour un total de 150 plants.

Ces températures de congélation artificielle ont été simulées par un congélateur (modèle *T20RS*, Tenney environmental inc., Williamsport, PA, États-Unis) doté d'un contrôle de programmation (modèle *Versa Tenn II*, Union, NJ, États-Unis). Afin de vérifier l'atteinte des températures cibles de chaque cycle de congélation, deux sondes de température (Modèle *107B*, Campbell Scientific [Canada] Corp., Edmonton, Alberta) ont été placées à l'intérieur du congélateur. Un système d'acquisition de données (modèle *CR10*, Campbell Scientific [Canada] Corp., Edmonton, Alberta) enregistrait les températures à toutes les trois minutes. La durée d'un cycle de congélation complet était de 23 heures. Au cours de ce cycle, les plants étaient ainsi soumis aux différentes températures de gel artificiel désirées.

La routine du cycle commençait par une stabilisation de la température des plants à 4 °C pendant trois heures. Cette étape était suivie d'une période d'une durée de huit heures pendant laquelle les plants étaient exposés à une température de 0 °C. Par la suite, les plants subissaient les différentes températures de congélation évaluées. Une fois la température de congélation ciblée atteinte, elle était maintenue constante et stable pendant une heure, de manière à créer un palier. Une fois chaque température de congélation atteinte selon un taux de refroidissement de 2 °C/heure, les plants ont ensuite été retirés et placés dans un réfrigérateur maintenu à une température de 4 °C.

En tenant compte de nos résultats antérieurs, la tolérance au gel des plants a été évaluée à l'aide de la conductivité électrolytique (CE) et de l'indice de dommage foliaire ($I_t$). Ces deux variables ont été également évaluées selon l'approche standard (Colombo et Raitanen 1993, Lamhamedi *et al.* 2005),

en utilisant les parties aériennes entières des plants d'épinette noire (1+0). La CE a été mesurée sur un échantillon composite extrait de trois plants rincés au préalable trois fois avec de l'eau déminéralisée et placés ensuite dans des tubes en polypropylène à fond conique de 50 mL (Modèle Falcon #352098, Becton Dickinson Labware, Franklin Lakes, États-Unis). Cinq échantillons composites d'un échantillon composite/bloc/température ont été utilisés pour chaque température de congélation. Après avoir subi les différentes températures de congélation ($T_0$ : témoin; $T_1$, $T_2$, $T_3$, et $T_4$), les échantillons ont été immergés dans 100 mL d'eau déminéralisée, dans des Erlenmeyers de 125 mL, pendant une nuit complète à une température de 4 °C. Une fois saturée, la libération des électrolytes (conductivité électrolytique mesurée en µSiemens/cm) de chaque échantillon a été mesurée à l'aide d'un conductimètre (CE1) (modèle *160*, *Conductivity* meter, Orion Research Inc., Boston, États-Unis). L'étalonnage du conductimètre a été fait à l'aide d'une solution de KCl (0,01 N) d'une conductivité de 1,411 mS/cm. Par la suite, les échantillons ont été placés dans un autoclave à une température de 121 °C pendant 15 minutes afin de détruire toutes les cellules et induire la libération maximale des ions. La libération des électrolytes est remesurée (CE2), après saturation des tissus morts pendant une nuit complète à une température de 4 °C. Des valeurs élevées de conductivité électrolytique relative par rapport à celles des plants témoins laissent présager que les dommages causés par le gel sont très importants. La conductivité électrolytique relative (CR) de chaque échantillon est calculée comme suit :

$$CR = \frac{CE_1}{CE_2} \times 100 \qquad [2]$$

Par la suite, l'indice de dommages foliaires ($I_t$), exprimé en pourcentage, est calculé en combinant les données de la conductivité électrolytique relative des plants soumis au gel et celles des plants témoins (COLOMBO et RAITONEN 1993, LAMHAMEDI *et al.* 2005). Les valeurs de cet indice sont indépendantes du volume de l'échantillon et des variations saisonnières des électrolytes libres des parties aériennes lesquels peuvent être libérés en absence du gel. Un indice élevé indique une tolérance au gel faible, tandis que l'inverse signifie une tolérance au gel importante. Certains travaux ont démontré que les plants ne montrent pas de dommages visibles aux différentes températures de congélation lorsque cet indice est inférieur à 1. L'indice des dommages foliaires de chaque température de congélation est calculé selon l'expression suivante :

$$I_t = \frac{CR_{\text{échantillon gelé}} - CR_{\text{témoin}}}{1 - \frac{CR_{\text{témoin}}}{100}} \qquad [3]$$

$I_t$ : Indice de dommages foliaires pour une température donnée;

$CR_{\text{échantillon gelé}}$ : Conductivité électrolytique relative d'un échantillon soumis à un gel d'une température donnée;

$CR_{\text{témoin}}$ : Conductivité électrolytique relative d'un échantillon témoin (4 ºC).

Toutes les analyses (statut nutritionnel des plants, fertilité du substrat, capacité d'échange cationique, pH, analyse texturale, glucides, physico-chimiques, etc.) sont effectuées par le laboratoire de chimie organique et inorganique (ISO/CEI 17025) de la Direction de la recherche forestière du ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec.

### 1.8 Qualification des plants d'épinette noire (1+0)

Avant la livraison du printemps 2007 et la mise en terre des plants destinés au reboisement, 120 plants de chaque traitement, choisis aléatoirement, ont été qualifiés (14 et 15 mai 2007) selon les 25 normes et critères de qualité des plants (insuffisance racinaire, hauteur, diamètre, concentration foliaire en azote, fourches, hauteur/diamètre, etc.) exigés par le ministère des Ressources naturelles et de la Faune (MRNF) du Québec (VEILLEUX *et al.* 2008). Cette qualification a été effectuée par des personnes accréditées par le MRNF. La qualification a permis d'établir le taux de conformité de chaque lot de plants, lequel est utilisé comme barème pour le paiement des différents lots produits par les pépiniéristes.

### 1.9 Analyses statistiques, modélisation de la croissance et de l'allocation de la matière sèche entre les parties aériennes et les racines

Les analyses statistiques des différentes variables morpho-physiologiques ont été effectuées en utilisant la procédure mixte de SAS (SAS Institute, Cary, NC, États-Unis). L'hypothèse de la normalité des termes d'erreur de toutes les variables a été respectée. L'indépendance entre les dates d'échan-

tillonnage a été supposée puisque celles-ci ont été randomisées et que les mesures des variables de croissance étaient prises sur des plants différents à chaque date. L'effet du traitement a été reconnu comme significatif à 10 % dans les conditions de pépinière forestière et en prenant compte de la variabilité morpho-physiologique entre les plants.

La hauteur et le diamètre au collet des deux traitements (JC et témoin), mesurés tout au long de la saison de croissance, ont été ajustés au moyen d'un modèle logistique asymptotique (Hunt 1982) en utilisant la procédure mixte non linéaire de SAS.

$$y_{ijkl} = \frac{a_{10} + a_{11} I_{[JC]}}{1 + e^{-(c_{30} + c_{31} I_{[JC]})(Date - (b_{20} + b_{21} I_{[JC]}))}} + u_j + \varepsilon_{ijkl}$$

Où

| | |
|---|---|
| $y_{ijkl}$ | : variable dépendante mesurée sur le plant l, à la date *k,* dans le bloc *j,* soumis au traitement *i*; |
| $I_{[JC]}$ | : 1 si le plant a subi le traitement « Jour court » et 0 sinon; |
| $a_{10}$ | : paramètre de référence de l'asymptote (traitement « Sans jour court, témoin »); |
| $a_{11}$ | : composante à additionner pour obtenir l'asymptote du traitement « Jour court »; |
| $b_{20}$ | : paramètre de référence du point d'inflexion (traitement « Sans jour court, témoin »); |
| $b_{21}$ | : composante à additionner pour obtenir le point d'inflexion du traitement «Jour court »; |
| $c_{30}$ | : paramètre de référence du taux de croissance (traitement « Sans jour court, témoin »); |
| $c_{31}$ | : composante à additionner pour obtenir le taux de croissance du traitement « Jour court »; |
| $u_j$ | : effet aléatoire du bloc *j* ~$N(0, \sigma_u^2)$; |
| $\varepsilon_{ijkl}$ | : erreur résiduelle, ~$N(0, \sigma^2)$. |

L'ajustement du modèle a été effectué pour chaque plant. Par la suite, les estimations des paramètres a, b et c de chacun des traitements ont été comparées à l'aide d'une analyse de variance. D'abord une approche multivariée a été utilisée pour comparer le vecteur des paramètres et par la suite, une approche univariée a été utilisée pour comparer chacune des composantes lorsque les résultats étaient significatifs.

Un modèle allométrique a été mis au point afin de quantifier l'effet de chaque traitement (jours courts et témoin) sur la répartition de la matière sèche entre les parties aériennes et les racines. Ce modèle qui utilise les données individuelles prises sur les plants, tout au long des dates d'échantillonnage, après le traitement de jours courts, se lit comme suit :

$$\mathrm{l}\ (y_{ij}) = b_{00} + b_{01} trt + b_{10} \ln(x_{ij}) + b_{11} \ln(x_{ij}) * trt + u_j + \varepsilon_{ij}$$

| | |
|---|---|
| $y_{ij}$ | : masse sèche de la partie aérienne mesurée sur le plant *j*, du bloc *i*; |
| $x_{ij}$ | : masse sèche des racines mesurée sur le plant *j*, du bloc *i*; |
| *trt* | : 1 si le plant a subi le traitement « Jour court » et 0 sinon; |
| $b_{00}$ | : ordonnée à l'origine de référence (traitement « Sans jour court, témoin »); |
| $b_{01}$ | : composante à additionner pour obtenir l'ordonnée à l'origine du traitement « Jour court »; |
| $b_{10}$ | : paramètre de référence de la pente (traitement « Sans jour court, témoin »); |
| $b_{11}$ | : composante à additionner pour obtenir la pente du traitement «Jour court »; |
| $u_j$ | : effet aléatoire du bloc *j* ~$N(0, \sigma_u^2)$; |
| $\varepsilon_{ij}$ | : erreur résiduelle, ~$N(0, \sigma^2)$. |

Les paramètres $b_{10}$ et $b_{11}$ indiquent le degré d'allocation de la matière sèche entre les racines et les parties aériennes lors de la phase exponentielle de croissance (Ledig *et al.* 1970).

# Chapitre deux

## Résultats

### 2.1 Variables environnementales et teneur en eau du substrat pendant la saison de croissance et la période de traitement de jours courts

L'enregistrement continu des variables environnementales à l'intérieur du tunnel (température et humidité relative de l'air), illustré à la figure 2a, montre que la température moyenne de l'air a varié de 13 à 29 °C lors de la période de germination et de croissance active (mi-avril à fin juillet 2006). Pendant la période de formation des bourgeons et d'endurcissement progressif (début août – fin septembre 2006), la température journalière moyenne de l'air à l'intérieur du tunnel a diminué de façon progressive et a varié de 6 à 23 °C. L'humidité relative de l'air à l'intérieur du tunnel a généralement oscillé de 60 à 85 % (Figure 2a), à l'exception de la fin de la période de germination et d'éclaircie.

Les mesures ponctuelles des teneurs en eau moyennes du substrat ont varié, en général, de 20 à 51 % (v/v) (Figure 2b) tout au long de la saison de croissance. Leurs erreurs standards variaient de 0,6 à 2,6 %. Le contrôle et les variations des teneurs en eau du substrat étaient identiques pour les deux traitements (Figure 2b). La teneur en eau du substrat pendant la fin de la période de germination et le début de la saison de croissance active, était maintenue entre 27 et 51 % (v/v). Avant le traitement de jours courts (13 juin 2006), la teneur en eau a été abaissée à 27 % et augmentée de façon rapide à 49 % (v/v) afin d'adapter les plants à la baisse des teneurs en eau pendant le traitement de jours courts. Cela a également permis de diminuer l'accroissement hebdomadaire en hauteur des plants afin de ne pas dépasser la hauteur ciblée par le pépiniériste. La diminution progressive et significative des teneurs en eau du substrat a été maintenue avant (17 – 29 juin 2006) et pendant la période (30 juin – 18 juillet 2006) du traitement de jours courts (Figure 2b). Du 17 juin à la fin de la période du traitement de jours courts, la teneur en eau moyenne du substrat a varié de 49 à 22 % (v/v). La période du traitement de jours courts a été suivie d'une diminution brusque de la teneur en eau du substrat (20 %, v/v; 1 août 2006) afin d'accélérer la fermeture complète des bourgeons et éviter leur débourrement ultérieur. Par la suite, la teneur en eau moyenne du substrat a été maintenue entre 33 et 45 % (v/v).

Les variations des différentes températures moyennes journalières des deux traitements pendant la période du traitement de jours courts, sont indiquées à la figure 3. Ces variations tiennent compte des températures de l'air, à la base des plants (Figure 3a) et au niveau du substrat (Figure 3b). Les variations des températures moyennes maximales de l'air et à la base des plants ont été relativement similaires pour les deux traitements (jours courts et témoin). Par contre, les températures à la base des plants du traitement jours courts (JC) étaient toujours supérieures pendant la nuit à celles enregistrées à la base des plants témoins (Figure 3a) à cause des pertes par rayonnement faibles. Le traitement de jours courts induit généralement des températures relativement élevées du substrat par rapport à celles du traitement témoin.

### 2.2 Croissance des plants, formation, débourrement des bourgeons et taux de conformité en réaction au traitement de jours courts

À l'inverse du traitement témoin, le traitement de jours courts a provoqué ($p$ = 0,0031) un arrêt de croissance en hauteur significatif après deux semaines d'application (Figure 4a), une augmentation importante de la masse des racines (Figures 4d et 5a-b) et une diminution significative ($p$ = 0,0026) de la masse des parties aériennes et totales des plants d'épinette noire (Figures 4c-e et 5c). À l'inverse de la hauteur, l'effet du traitement de jours courts sur la croissance en diamètre ne fut pas immédiat après deux semaines (Figure 4b) malgré de légères différences ($p$ = 0,0569) observées entre les deux traitements vers la mi-septembre. Toutes les variables de croissance ont été influencées ($p$ = 0,0009 à $p$ < 0,0001) par la date d'échantillonnage de façon significative. À l'exception de la masse sèche totale ($p$ = 0,3127), l'interaction date * traitement a eu un effet significatif ($p$ < 0,0001) sur l'évolution des autres variables de croissance (hauteur, diamètre, masse sèche de la partie aérienne et des racines et hauteur/diamètre).

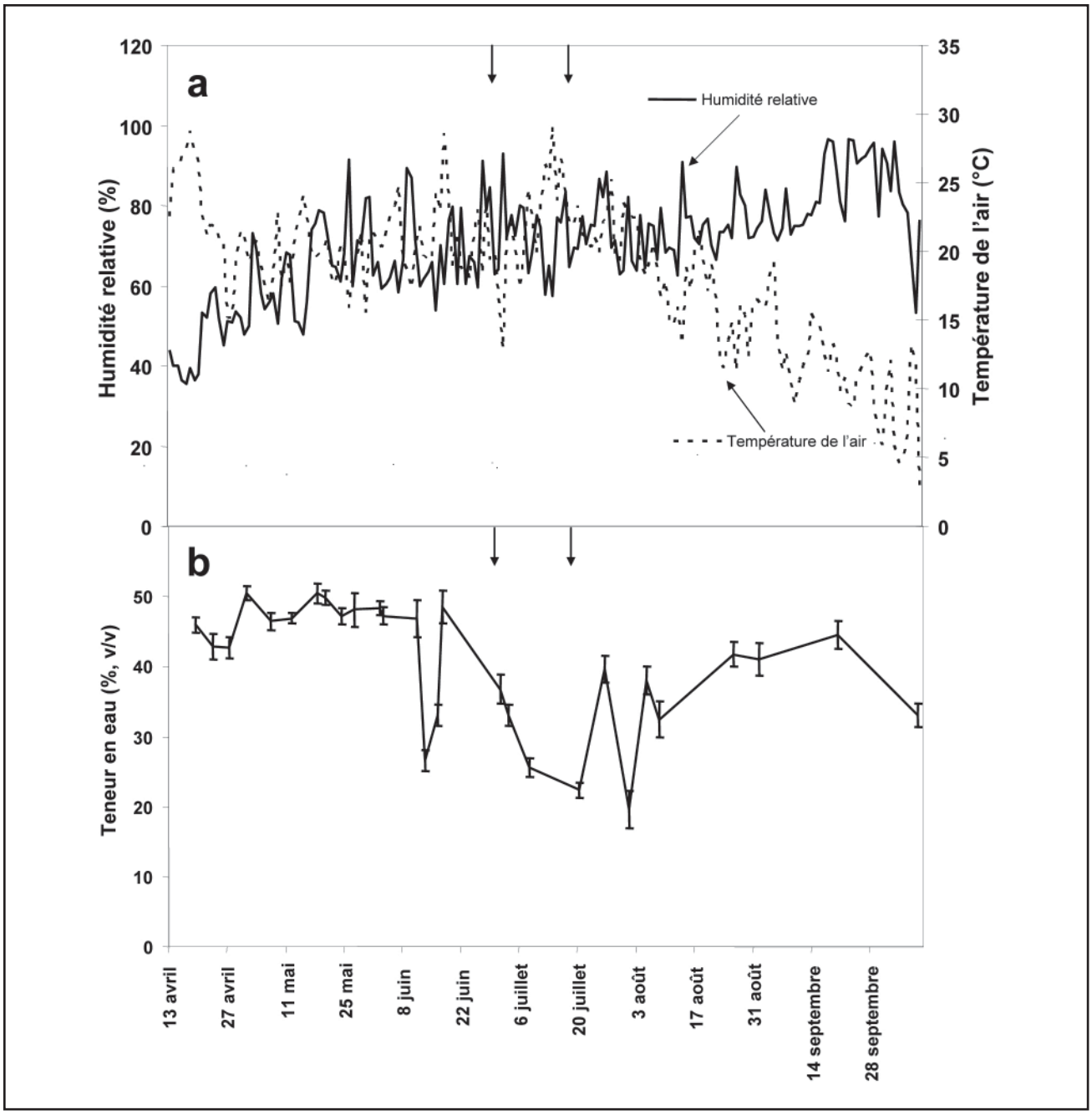



Figure 2. a) Variations de la température et de l'humidité relative de l'air dans le tunnel pendant la saison de croissance des plants d'épinette noire (1+0) produits sous tunnel en pépinière forestière; b) Variations des teneurs en eau du substrat déterminées tout au long de la saison de croissance à l'aide de la méthode gravimétrique (n = 12 récipients). Les flèches indiquent la période de croissance active durant laquelle le traitement de jours courts a été appliqué (30 juin au 18 juillet 2006). Les barres indiquent les erreurs standards associées aux teneurs en eau moyennes du substrat (n = 12 récipients).

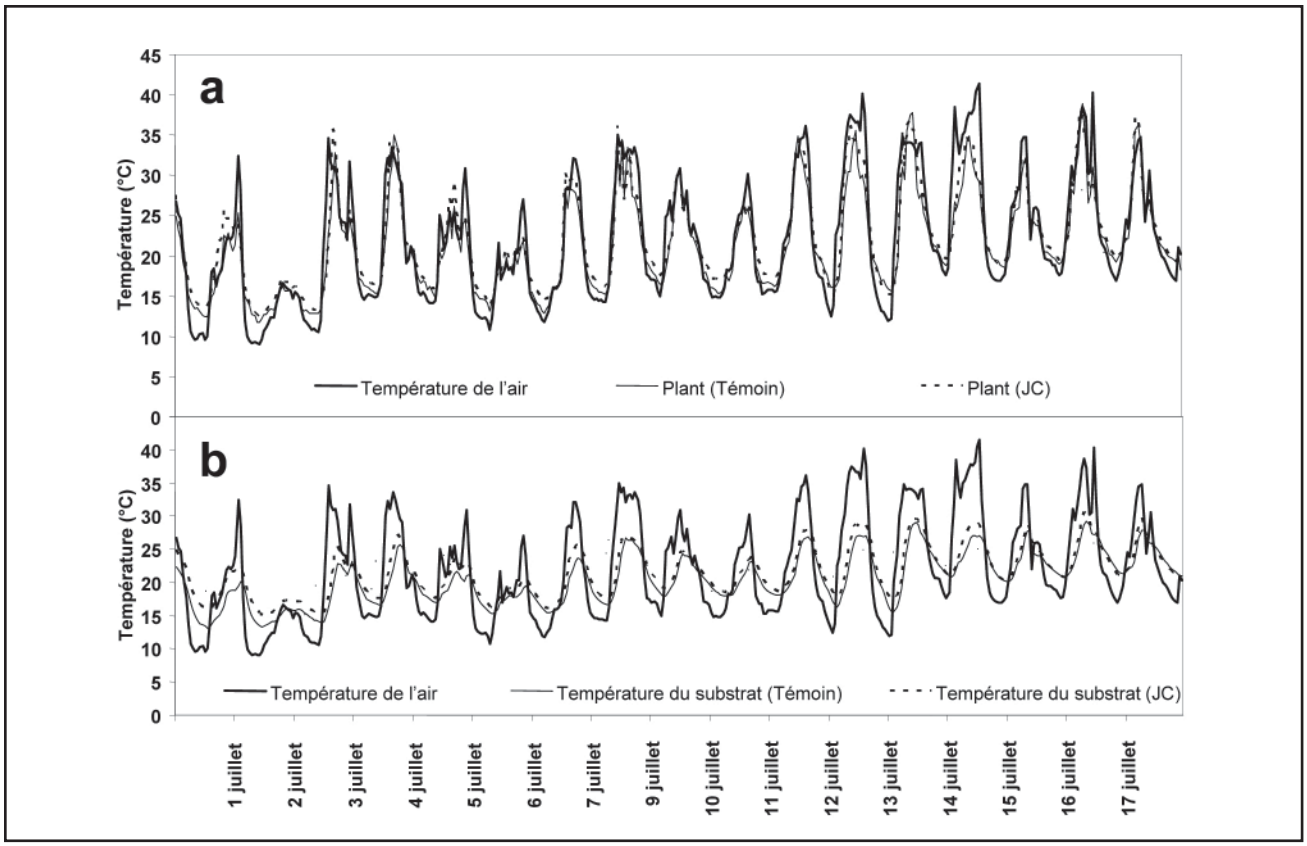



Figure 3. a) Variations des températures de l'air et à la surface des cavités des récipients en présence des plants témoins et de ceux soumis au traitement de jours courts; b) Variations des températures de l'air et du substrat des plants d'épinette noire (1+0) témoins et soumis au traitement de jours courts (JC).

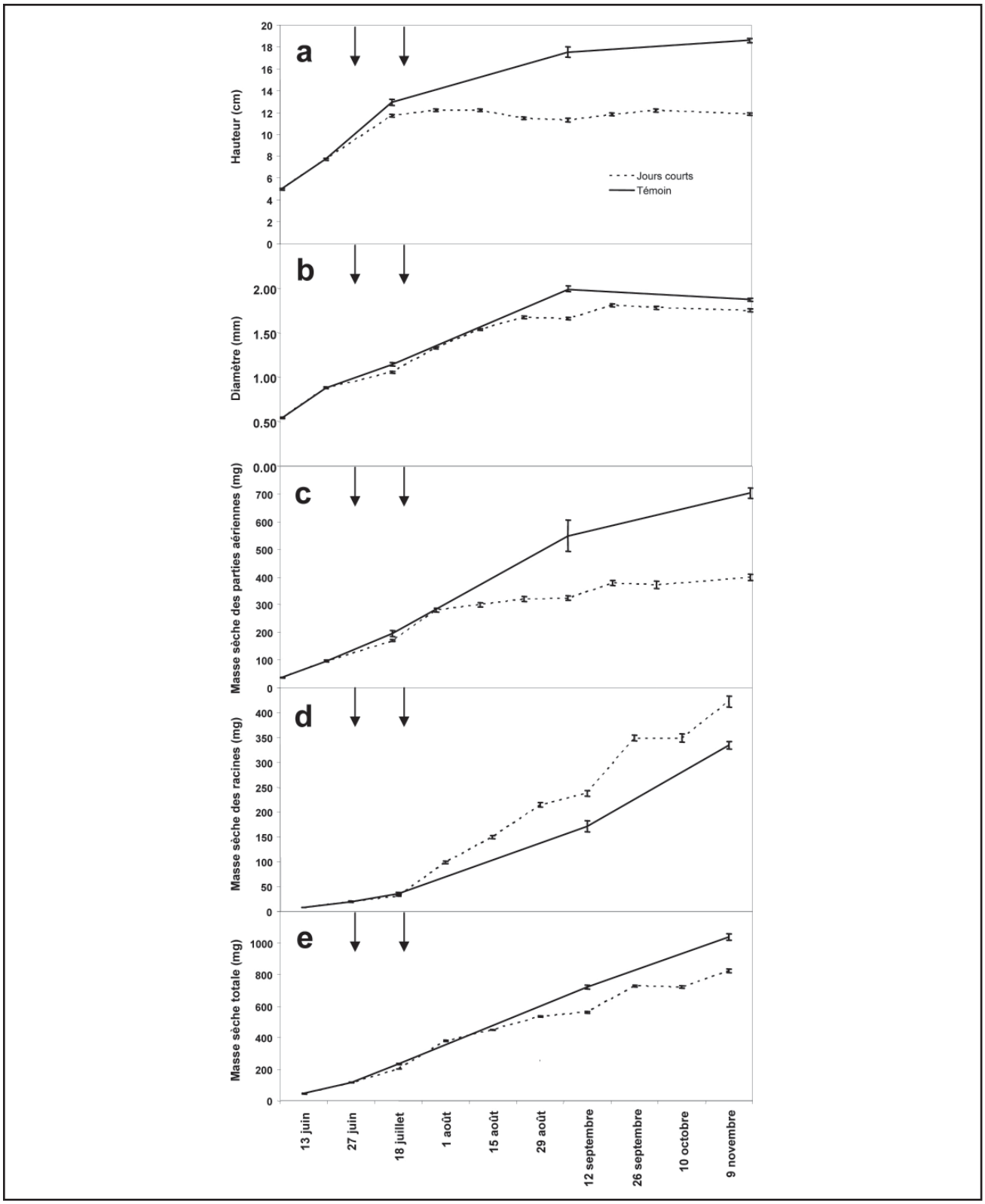



Figure 4. Variations saisonnières de la hauteur a); du diamètre au collet b); de la masse sèche des parties aériennes c); de la masse sèche des racines d) et de la masse sèche totale e) des plants d'épinette noire (1+0) témoins et soumis au traitement de jours courts (n = 250 ± ES, Erreur standard). Les flèches indiquent la période de croissance active durant laquelle le traitement de jours courts a été appliqué (30 juin au 18 juillet 2006).

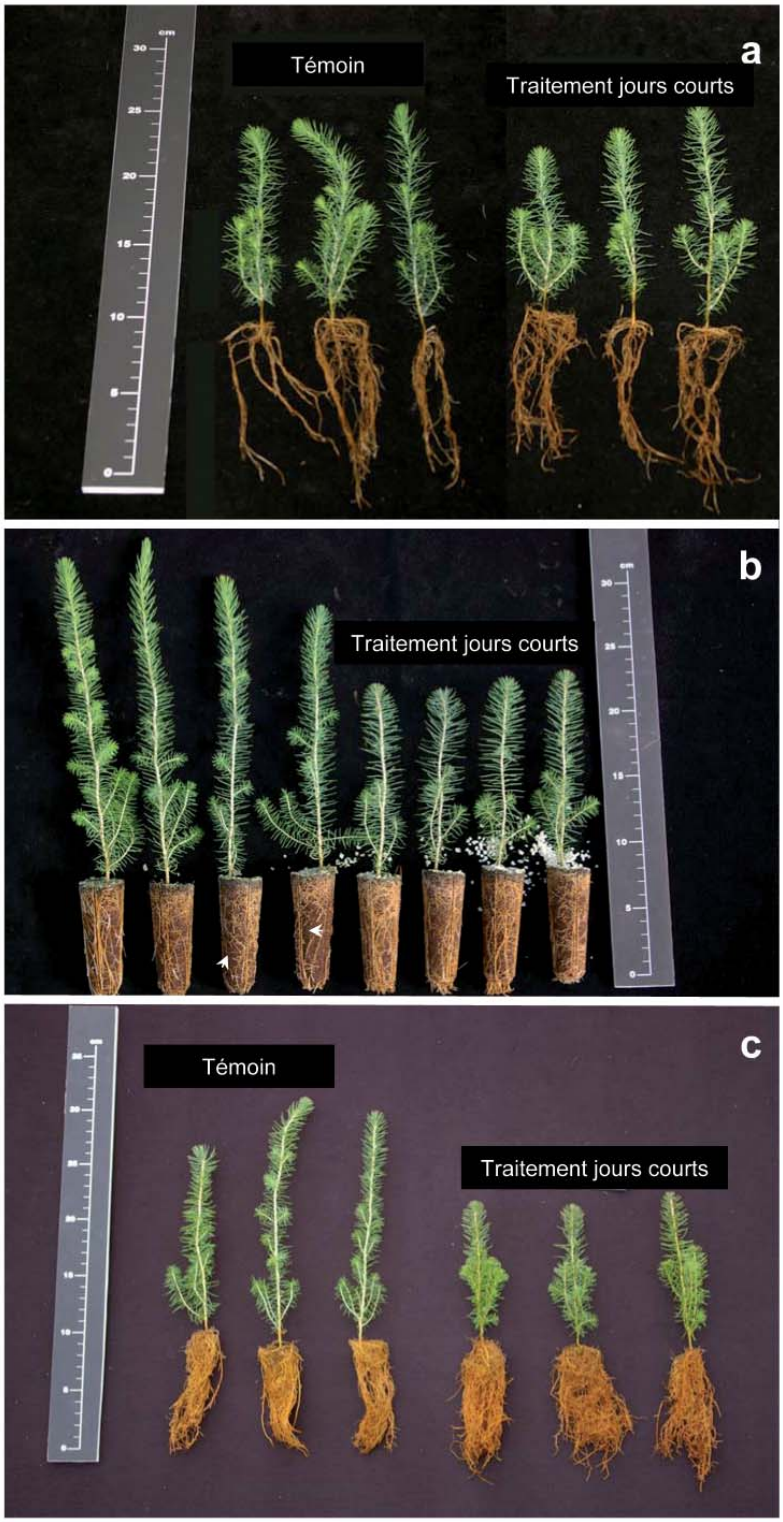



Figure 5. Morphologie et croissance des plants a) à la fin du traitement de jours courts (18 juillet 2006); b) en début d'automne (11 septembre 2006). Remarquez les différences en matière de croissance en hauteur et de développement des racines superficielles autour de la carotte. Les flèches (Figure b) indiquent l'absence ou une faible densité de racines sur une portion de la carotte de certains plants témoins; c) à la fin de la saison de croissance (9 novembre 2006). Notez le chevelu racinaire abondant et la croissance en hauteur des plants soumis au traitement de jours courts par rapport aux plants témoins.

Pour ce qui est de la formation des bourgeons, tous les plants ont formé un bourgeon blanc après deux semaines de traitement de jours courts alors que la formation des bourgeons des plants témoins, s'est étalée de la mi-juillet jusqu'à la mi-août (Figure 6a). Cette formation s'est donc effectuée de façon progressive pour les plants témoins et elle dépendait des conditions environnementales naturelles (température, photopériode, etc.). Pour le lot de semences que nous avons utilisé dans cette expérience, nous n'avons pas observé un nombre important de plants qui débourraient après la formation du bourgeon, à la suite du traitement de jours courts, même si les conditions environnementales étaient favorables. Au printemps suivant (14 mai 2007) et après un hivernage des plants sous la neige à l'extérieur du tunnel, les plants soumis au traitement de jours courts ont montré un débourrement précoce par comparaison aux plants témoins (Figure 6b). Ce débourrement a été caractérisé par un gonflement du bourgeon et par l'apparition des premières aiguilles.

L'évaluation de la qualité des plants selon les 25 critères et normes du MRNF a montré que le taux de conformité des plants d'épinette noire (1+0) soumis au traitement de jours courts était significativement supérieur (90,8 %) à celui du traitement témoin (70,5 %).

### 2.3 Modélisation de la croissance et allocation de la masse sèche entre les parties aériennes et les racines

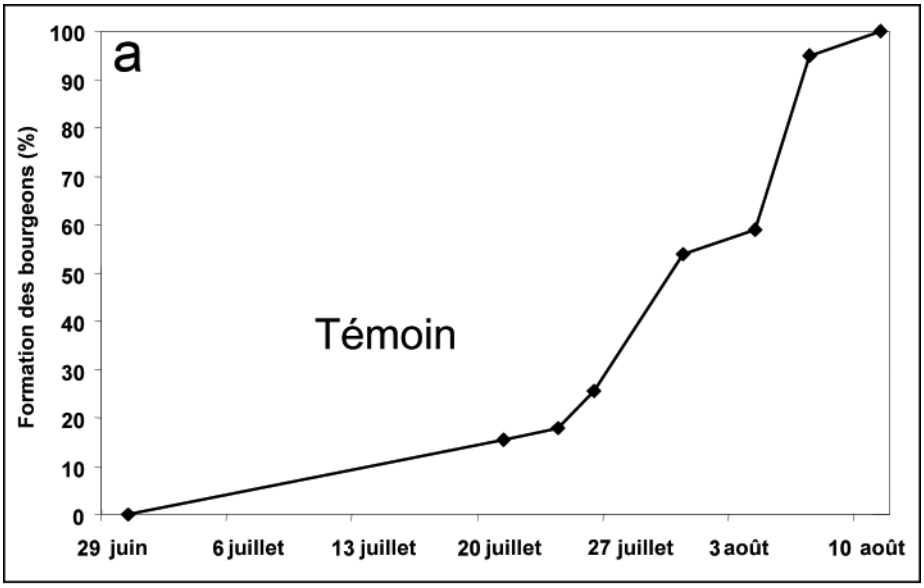
Le modèle logistique asymptotique a été ajusté à la croissance en hauteur et en diamètre des deux traitements (jours courts et témoin). La croissance en hauteur des deux traitements différait significativement pour les trois paramètres qui caractérisaient le modèle logistique, notamment l'asymptote (paramètre a, $p < 0{,}0001$; $a_{JC} = 11{,}9456$, $a_{Témoin} = 18{,}3369$), le point d'inflexion (paramètre b, $p < 0{,}0001$ $b_{JC} = 4{,}9226$, $b_{Témoin} = 19{,}3232$) et le taux de croissance (paramètre c, $p = 0{,}0130$ ; $c_{JC} = 0{,}05206$, $c_{Témoin} = 0{,}08872$) (Figure 7a). Des différences significatives du diamètre entre les deux traitements n'ont été observées que pour l'asymptote du modèle ($p = 0{,}0369$; $a_{JC} = 1{,}8208$, $a_{Témoin} = 1{,}9561$) (Figure 7b) soit, le diamètre légèrement supérieur à celui observé à la fin de la saison de croissance. Les différences n'ont pas été significatives entre les deux traitements pour les deux autres paramètres (b et c), ($p = 0{,}7269$, $b_{JC} = 21{,}046$, $b_{Témoin} = 22{,}1962$; $p = 0{,}4441$, $c_{JC} = 0{,}03754$, $c_{Témoin} = 0{,}04198$).

La détermination des modèles allométriques démontre que les deux traitements diffèrent significativement ($p < 0{,}0001$) eu égard au coefficient d'allocation (pente du modèle) de la matière sèche vers les racines (Figure 8). En effet, le traitement de jours courts alloue de façon significative, plus de matière sèche à la croissance des racines (coefficient d'allocation$_{JC}$ = 0,3185) par comparaison du traitement témoin (coefficient d'allocation$_{Témoin}$ = 0,5678). Pour une même masse des parties aériennes des plants extraits des deux traitements, le traitement de jours courts augmente l'accroissement moyen de la masse des racines de 25 % par rapport au traitement témoin (Figure 8). Par exemple, à la fin de la saison de croissance (9 novembre 2006), la moyenne de la masse des racines des plants soumis au traitement de jours courts (423 mg) était significativement supérieure à celle des plants témoins (335 mg) (Figures 4d et 5b), soit une augmentation de 26 % attribuable uniquement au traitement de jours courts.

### 2.4 Fertilité du substrat et nutrition minérale

L'évolution de la fertilité du substrat (N, P, K, Ca et Mg) et de la conductivité électrique de chaque date d'échantillonnage est similaire pour les deux traitements (JC et témoin) (Figure 9). Par exemple, la concentration moyenne en azote minéral dans le substrat a varié de 143 à 3 ppm et la conductivité électrique moyenne initiale a respectivement varié de 188 à 70 µS/cm au début (13 juin 2006) et à la fin (9 novembre 2006) de la saison de croissance (Figures 9a-d). En effet, la fertilité en azote était élevée au début de la période de croissance active afin de faciliter l'atteinte de la hauteur cible avant le traitement de jours courts. Par la suite, cette fertilité en azote a été réduite de façon significative après le traitement de jours courts afin de contrôler la croissance en hauteur et éviter le débourrement des plants en présence de conditions environnementales favorables. Les concentrations des deux autres éléments majeurs (P et K) n'étaient pas un facteur limitant de la croissance des plants (Figures 9b-c).

À l'inverse du contenu en calcium et en comparaison du traitement témoin, le traitement de jours courts a augmenté de façon significative le contenu en azote ($p = 0{,}0463$), en phosphore ($p = 0{,}0321$), en potassium ($p = 0{,}0815$) et en magnésium ($p = 0{,}0089$) dans les racines alors que ce traitement a provoqué une diminution significative du contenu en azote ($p = 0{,}0750$), en phosphore ($p = 0{,}0266$) et en potassium ($p = 0{,}0023$) (Figure 10)



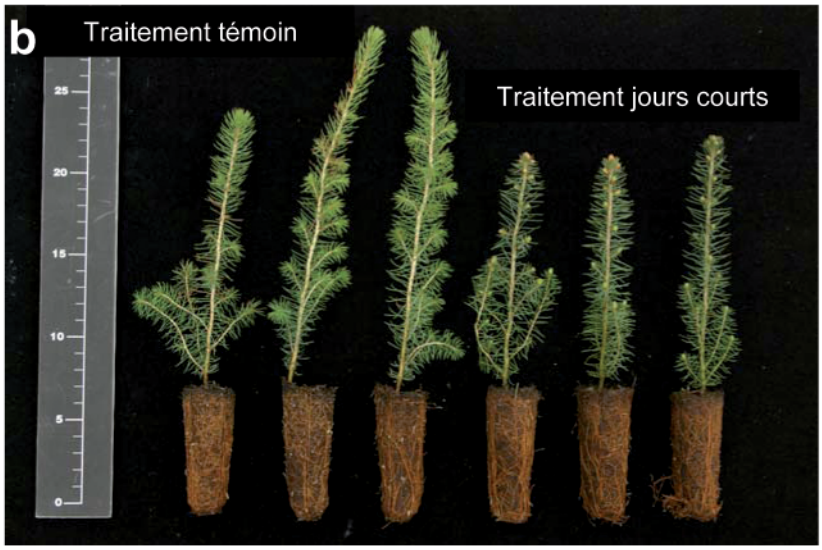




Figure 6. a) Pourcentage de formation des bourgeons des plants témoins. Les plants soumis au traitement de jours courts ont formé leurs bourgeons dès la fin du traitement (18 juillet 2006); b) Débourrement relativement rapide des bourgeons au printemps des plants soumis au traitement de jours courts par rapport aux plants témoins (14 mai 2007) après avoir passé, dans les deux cas, l'hiver sous la neige.

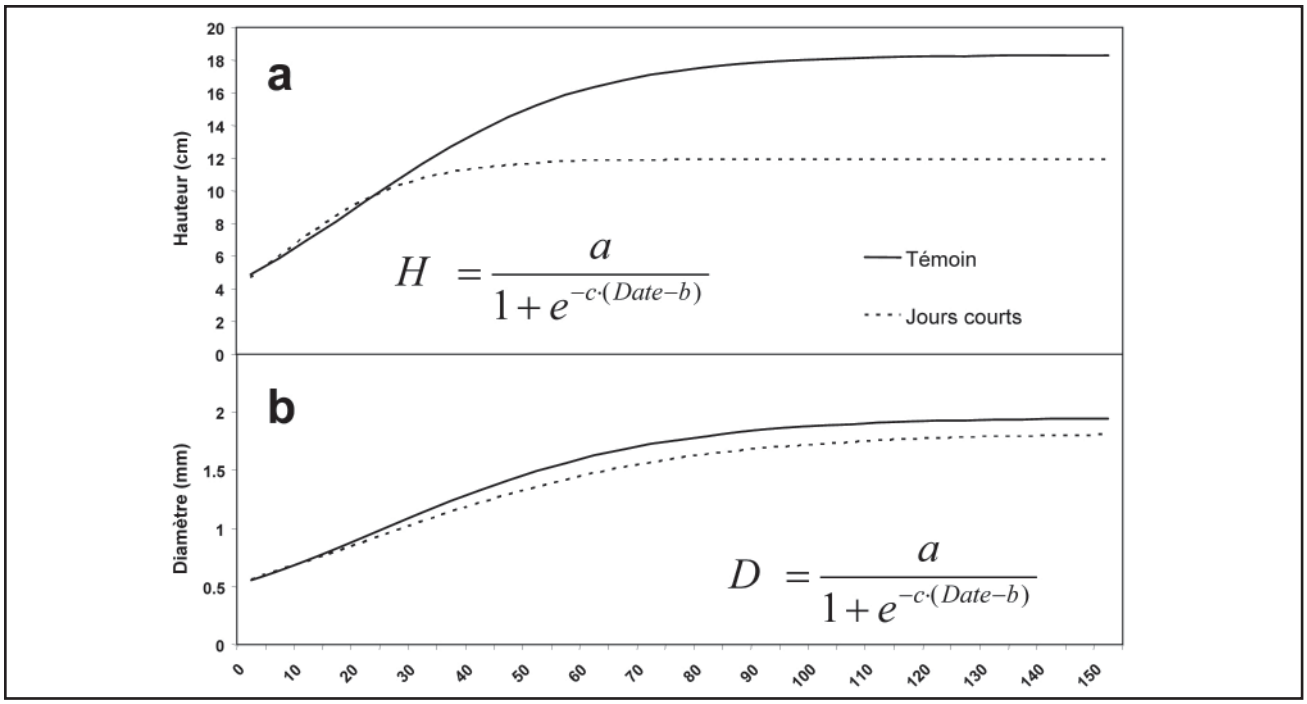



Figure 7. Modèles logistiques de la croissance a) en hauteur et b) en diamètre des plants soumis aux deux traitements.

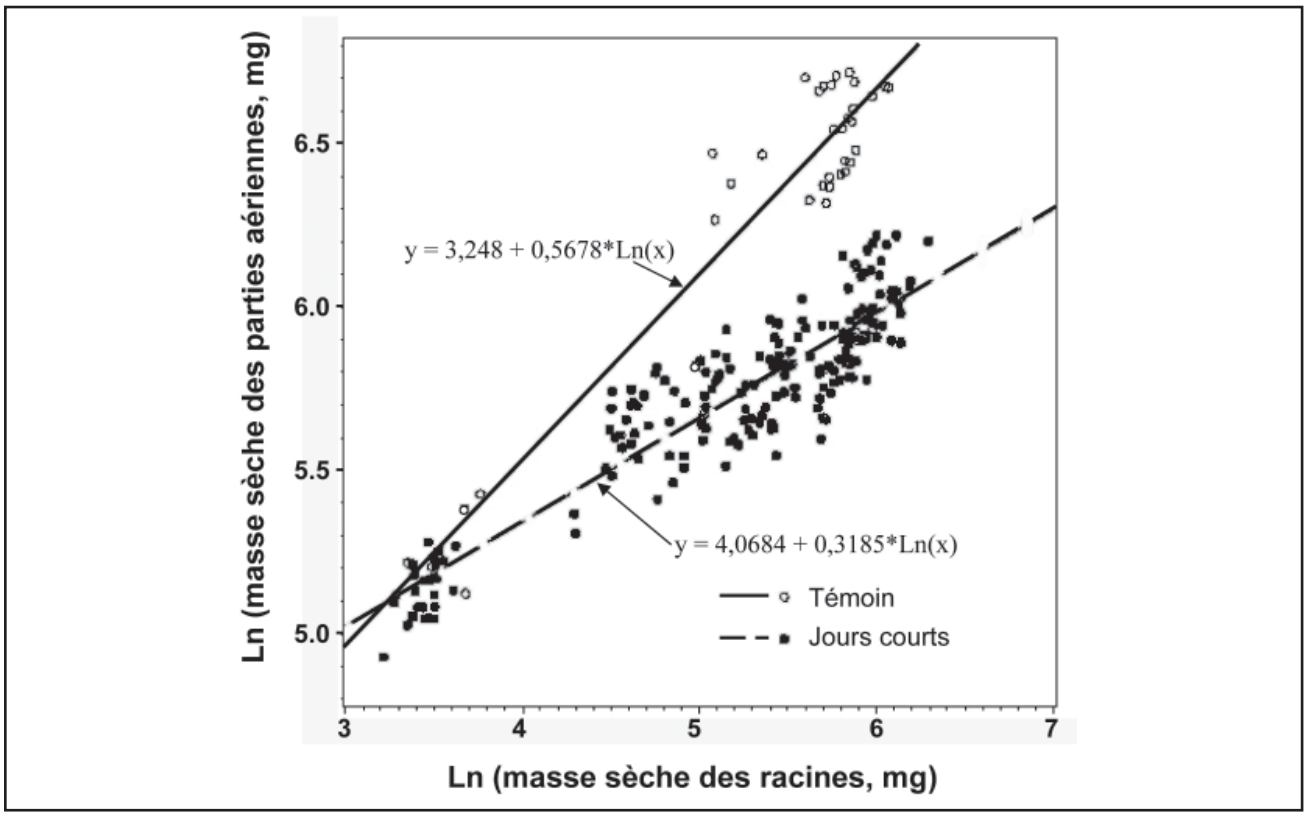



Figure 8. Modèles allométriques d'allocation de la matière sèche entre les parties aériennes et les racines des plants soumis au traitement de jours courts et des plants témoins.

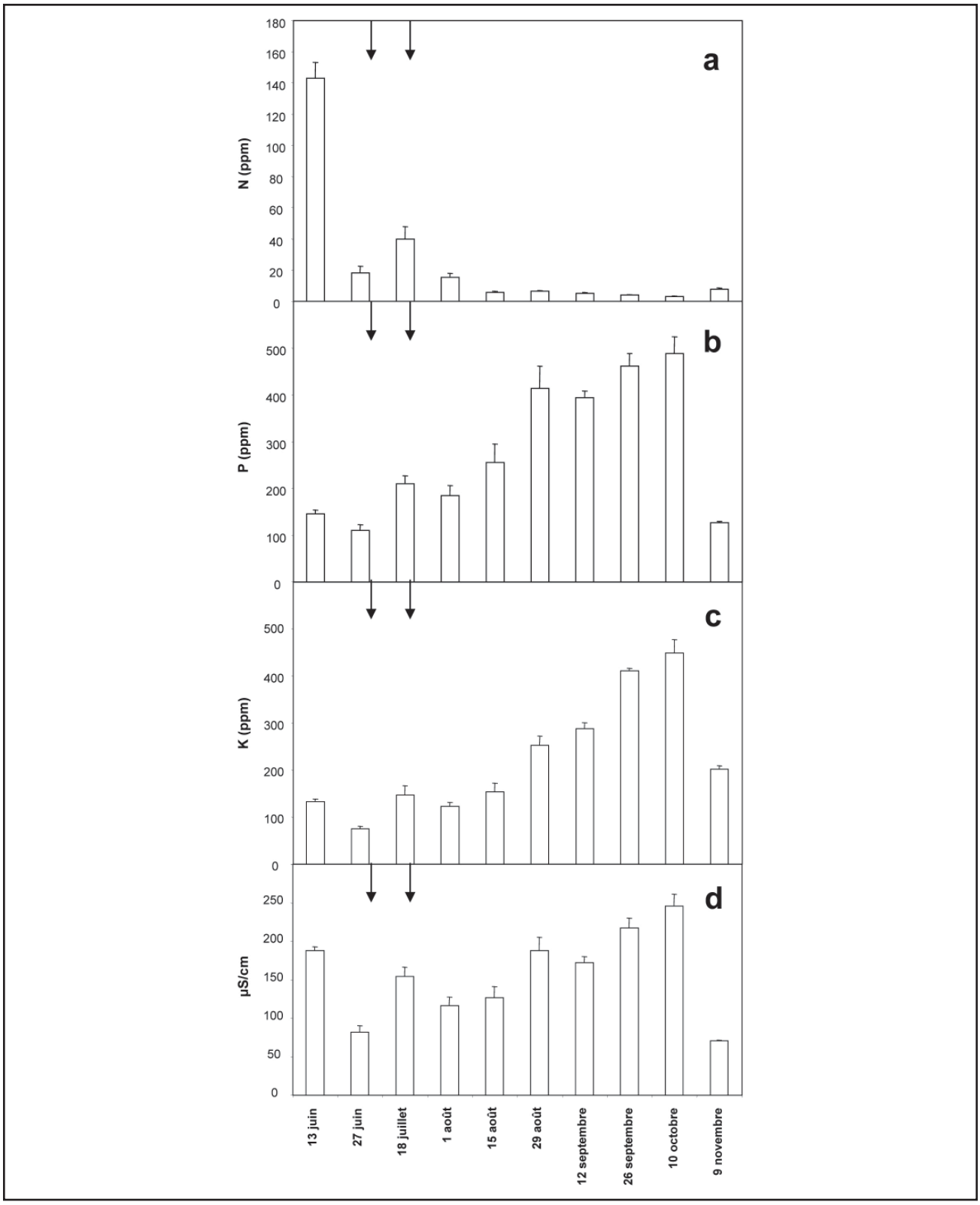



Figure 9. Évolution de la fertilité moyenne des deux traitements du substrat a) en azote (N); b) phosphore (P); c) en potassium (K) et de d) la conductivité électrique tout au long de la saison de croissance des plants dans les deux traitements (n = 5 échantillons composites ± ES. Chaque échantillon composite est constitué du mélange du substrat extrait de 50 plants/bloc/traitement).

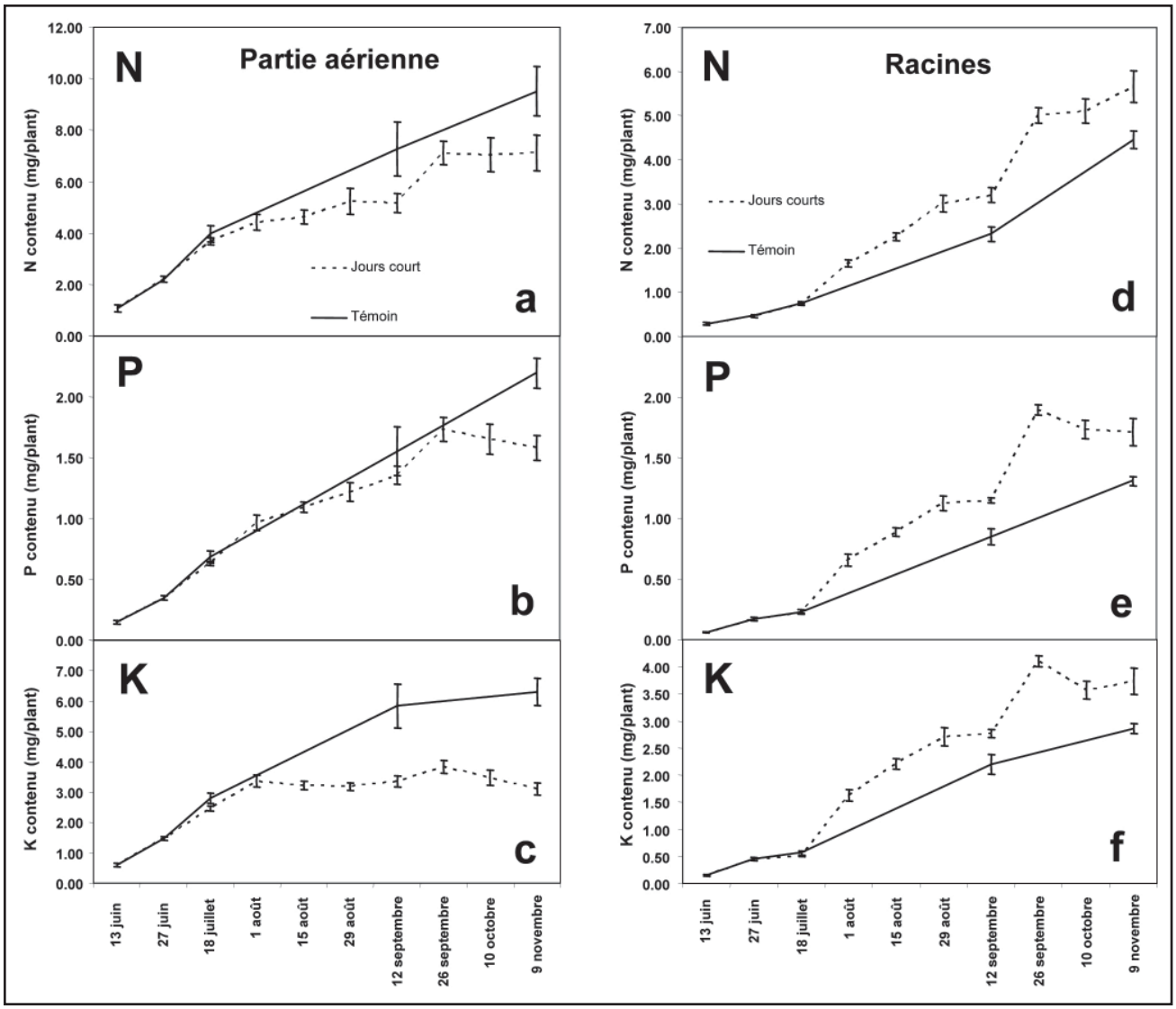



Figure 10. Contenu en éléments minéraux des parties aériennes et des racines des plants soumis au traitement de jours courts et des plants témoins (n = 5 échantillons composites ± ES. Chaque échantillon composite est constitué du mélange des parties aériennes ou des racines issues de 50 plants/bloc/traitement).

des parties aériennes. La date et l'interaction date * traitement ont également influencé de façon significative le contenu en éléments nutritifs. Cependant, les concentrations moyennes des éléments minéraux dans les racines avant (N : 2,33 %, P : 0,85 % et K : 2,27 %) et après le traitement de jours courts, par exemple à la dernière date d'échantillonnage, sont demeurées similaires dans les racines pour les deux traitements (jours courts, N : 1,34 %, P : 0,40 % et K : 0,88 %; témoin, N : 1,33 %, P : 0,39 % et K : 0,86 %). Les concentrations moyennes en azote et en phosphore des parties aériennes de cette même dernière date, ne différaient pas de façon importante entre les deux traitements, mais montraient un léger effet de dilution dans les plants témoins (jours courts, N : 1,77 %, P : 0,40 % et K : 0,78 %; témoin, N : 1,34 %, P : 0,31 % et K : 0,90 %).

### 2.5 Glucides

Le traitement de jours courts n'a eu aucune influence significative sur le contenu des parties aériennes en fructose ($p$ = 0,2654), ainsi que sur celui des racines en sucrose ($p$ = 0,6739), en glucose ($p$ = 0,2247) et en amidon ($p$ = 0,8070). Par contre, le contenu des parties aériennes des deux traitements différaient en raffinose ($p$ < 0,0001), sucrose ($p$ = 0,0027), glucose ($p$ = 0,0138), pinitol ($p$ < 0,0001) et en amidon ($p$ = 0,0005), ainsi que celui des racines en raffinose ($p$ = 0,0134), pinitol ($p$ = 0,0061) et en inositol ($p$ = 0,0012). Ainsi, par exemple, le traitement de jours courts a produit une augmentation significative du contenu des parties aériennes en sucrose (4,17 ± 0,44 mg/plant) et en pinitol (4,08 ± 0,21 mg/plant) par comparaison du contenu initial des parties aériennes (sucrose : 2,09 ± 0,50 mg/plant; pinitol : 1,75 ± 0,30 mg/plant) avant le traitement de jours courts.

### 2.6 Tolérance au gel

Le traitement de jours courts n'a eu aucun effet significatif sur la tolérance au gel. Aucun effet significatif n'a été observé ni sur la conductivité électrolytique (CR) relative ($p$ = 0,4479), ni sur l'indice de dommages ($I_t$) des plants ($p$ = 0,3844). L'interaction traitement * température des deux variables n'était pas également significative, soit CR ($p$ = 0,8794) et $I_t$ ($p$ = 0,9803).

# Chapitre trois

## Discussion

Cette étude démontre que le traitement de jours courts, durant deux semaines, appliqué à une échelle opérationnelle, pendant la saison de croissance active et une fois la hauteur cible généralement atteinte, provoque un arrêt immédiat de la croissance en hauteur des plants, une uniformité de la croissance en hauteur et la formation des bourgeons. En effet, l'épinette noire réagit très bien au traitement de jours courts. L'arrêt de croissance en hauteur de cette essence a déjà été observé lorsque l'objectif de ce traitement consistait à améliorer la tolérance au gel des plants (Calmé *et al.* 1993; Colombo *et al*. 1981, 2001; D'Aoust 1981) ou à préparer ceux-ci à l'entreposage dans les chambres réfrigérées (Colombo 1996). Par contre, en l'absence du traitement de jours courts et sous des régies de culture similaires pour les deux traitements (jours courts et témoin), la formation des bourgeons et la croissance en hauteur se sont étalées tout au long de la période de croissance active sous les conditions environnementales du tunnel. La modélisation de l'évolution de la croissance en hauteur tout au long de la saison de croissance démontre que le traitement de jours courts modifie de façon significative le taux de croissance (paramètre c), le point d'inflexion (paramètre b) et l'asymptote. Cette dernière se rapproche de la hauteur finale en fin de saison de croissance (paramètre a) (Figure 7a). À l'inverse de la hauteur, le traitement de jours courts ne provoque pas d'arrêt immédiat de la croissance en diamètre. L'absence de différences significatives entre les paramètres (b et c) des deux modèles propres à l'évolution de la croissance en diamètre des deux traitements (Figure 7b) confirme cette observation. Au cours d'une étude récente, Kohmann et Johnsen (2007) ont fait varier la date d'application du traitement de jours courts et ont observé que la croissance radiale des plants d'épinette de Norvège (*Picea abies* [L.] Karst.), par rapport aux plants témoins, est influencée de façon négative, selon la date d'application du traitement de jours courts. Les mécanismes qui expliquent les effets positifs ou négatifs de la date de ce traitement sur la croissance en diamètre radiale restent inconnus. La modélisation des variables de croissance non destructives et les plus utilisées (hauteur et diamètre au collet) lors des suivis de croissance permettra l'élaboration des standards de croissance des plants d'épinette noire (1+0) en réaction aux traitements de jours courts en pépinière forestière. Il est prévu d'intégrer ces standards de croissance, inexistants dans le cas du traitement de jours courts, au logiciel *Plantec2* afin de les utiliser à l'échelle opérationnelle. Cela permettra d'évaluer l'évolution de la croissance des plants et facilitera la prise de décision des pépiniéristes eu égard à l'ajustement de certaines techniques culturales. Ces standards, facilement utilisables, aideront également les pépiniéristes à satisfaire les critères et les normes de qualification des plants avant leur livraison sur les sites de reboisement.

L'originalité de cette étude consiste à appliquer un traitement de jours courts dans des conditions opérationnelles pendant la saison de croissance active afin d'augmenter la masse des racines, d'améliorer l'architecture des racines et la cohésion de la carotte (Figures 4d et 5). La comparaison des paramètres des modèles d'allocation de la matière sèche vers les racines entre les deux traitements permet de quantifier cette allocation. En effet, le traitement de jours courts accroît, en moyenne, l'allocation de la matière sèche vers les racines d'épinette noire (1+0) de 25 % (Figure 8). Cela réduit le rejet des plants causé par l'insuffisance racinaire et élève leur taux de conformité eu égard aux 25 critères de qualité morpho-physiologique, exigés au Québec, avant leur livraison sur le site du reboisement. Ainsi, le taux de conformité des plants d'épinette noire (1+0) soumis au traitement de jours courts était significativement supérieur (90,8 %) à celui du traitement témoin (70,5 %). Le recours au traitement de jours courts ne peut qu'améliorer la qualité des plants et la rentabilité des pépinières forestières.

La croissance et le développement des racines, plus particulièrement celles qui apparaissent à la suite de l'arrêt de croissance et de l'apparition des bourgeons, après traitement de jours courts, dans notre cas, sont généralement intimement liés aux produits de la photosynthèse nette courante (van den Driessche 1987, Lippu 1998, Pellicer *et al.* 2000, Pregitzer 2003, Ritchie 2003) et de la dynamique source : puits du plant (Kozlowski1992). Hawkins *et al.* (1994) ont montré que la photosynthèse des plants soumis au traitement de jours courts était

significativement supérieure à celle des plants témoins lorsque la période du traitement de jours courts était terminée. De plus une fois les bourgeons formés, la croissance des racines devient un puits très important des produits de la photosynthèse. Le traitement de jours courts contribue de façon significative à l'augmentation de certains glucides (sucrose et pinitol) et ces résultats correspondent à ceux observés pour l'épinette de Norvège (Rostad *et al.* 2006). Cette augmentation des glucides aurait un effet positif sur la croissance des racines des plants soumis au traitement de jours courts. En effet, Rowe *et al.* (2002) ont démontré que la masse et la surface des racines des boutures de *Pinus taeda* L. sont corrélées positivement avec certains glucides (myo-inositol, glucose, fructose, sucrose et raffinose) et la concentration foliaire en azote. L'évaluation de la concentration des éléments minéraux tout au long de la saison de croissance indique que les concentrations en azote étaient supérieures aux concentrations critiques de la croissance et des échanges gazeux des plants (Lamhamedi et Bernier 1994, Munson et Bernier 1993).

Dans notre étude, la formation des bourgeons s'est terminée aussitôt la fin de la durée du traitement de jours courts alors que dans des conditions similaires (production sous tunnel et traitement de jours courts), Calmé *et al.* (1993) ont observé un étalement de la formation des bourgeons sur une période dépassant un mois, après le traitement de jours courts, pour les plants d'épinette noire. À cet égard, il paraîtrait que l'apparition précoce des bourgeons de l'épinette noire dès la fin du traitement de jours courts, sous nos conditions expérimentales, serait le résultat de l'interaction de la baisse significative des teneurs en eau du substrat (Figure 1b) et de la fertilité du substrat, notamment en azote (Figure 9a), et du traitement de jours courts. Ces différents facteurs et leur interaction contribuent également à la formation et à l'accumulation importante des cires épicuticulaires à la surface des aiguilles (Bergeron *et al.* 2004, Lamhamedi *et al.* 2003b, Stowe *et al.* 2001) surtout pour les plants soumis au traitement de jours courts. La présence de ces cires diminue la transpiration épidermique. Les températures, relativement élevées sous tunnel, ne constituent pas un facteur limitant de la croissance des parties aériennes des plants d'épinette noire (Odlum et Ng 1995). Combinées aux masses des parties aériennes des plants témoins significativement supérieures à celles des plants soumis au traitement de jours courts, elles ne peuvent qu'accroître les pertes d'énergie par respiration des plants témoins d'épinette noire (Lamhamedi et Bernier 1994) par rapport à ceux du traitement de jours courts. Cela explique, du moins en partie, le coefficient élevé d'accroissement de l'allocation de la matière sèche vers les racines (Figure 8) et son effet positif sur la croissance des racines (Figures 4d et 8b) des plants soumis au traitement de jours courts par comparaison aux plants témoins.

Malgré que le traitement de jours courts fut appliqué tôt et que les conditions de croissance eussent été favorables tout au long de la saison de croissance, nous n'avons observé que le débourrement de quelques plants durant la période qui s'étendait de la fin du traitement de jours courts au début de l'automne. L'absence de débourrement pourrait s'expliquer par un contrôle rigoureux de la fertilité et des teneurs en eau du substrat tout au long de la saison de croissance, ainsi que par le choix judicieux d'une provenance de semences qui réagissait très bien au traitement de jours courts. En effet, dans les conditions expérimentales d'une serre, Lamhamedi *et al.* (2007) ont observé un débourrement hâtif de plus de la moitié des plants d'épinette noire (1+0) pour un lot de semences issues d'un autre verger à graines. Plusieurs types de débourrement ont été observés, celui du bourgeon apical, de certains bourgeons latéraux lesquels causent une perte de la dominance apicale ou un débourrement généralisé comme Cline et Harrington (2007) l'ont décrit. Cela indique que le débourrement après le traitement de jours courts est variable selon l'origine génétique des semences de l'épinette noire et que l'application du traitement de jours courts en phase de croissance active (début juillet) ne garantit pas un arrêt de croissance définitif tout au long de la saison de croissance. Kohmann et Johnsen (2007) ont également observé que le débourrement, après un traitement de jours courts, varie selon l'origine génétique des semences de *Picea abies* et la localisation géographique de la pépinière. Pour éviter le type de débourrement consécutif à un traitement de jours courts, ces auteurs suggèrent de prolonger la durée du traitement de jours courts d'une semaine, soit à trois semaines et la combiner à l'augmentation de la durée de la photopériode. Cependant, le débourrement relativement rapide des plants soumis au traitement de jours courts par comparaison aux plants témoins (Figure 6b) prédisposerait les plants à un gel tardif printanier surtout dans les régions écologiques où les fréquences de gel sont relativement élevées.

# Conclusion

Après deux semaines d'application du traitement de jours courts (JC), conjuguée à une baisse progressive des teneurs en eau, la totalité des plants d'épinette noire (1+0) soumis au traitement de jours courts a produit des bourgeons et cessé leur croissance en hauteur. Ce type de traitement a également amélioré l'uniformité de la croissance en hauteur des plants.

Le traitement de jours courts a augmenté de façon significative l'allocation de la matière sèche vers la croissance des racines, ce qui a permis d'augmenter significativement la masse des racines et la cohésion de la carotte des plants. Cette augmentation a amélioré le taux net de conformité de 20 % par rapport aux plants témoins.

Cependant, une optimisation et un suivi judicieux des régies de fertilisation et d'irrigation tout au long de la saison de croissance s'avèrent nécessaires pour atteindre les résultats escomptés de ce traitement. Le traitement de jours courts ne peut pas à lui seul améliorer la cohésion de la carotte et la diminution du taux de rejet des plants causée par l'insuffisance racinaire. Le pépiniériste doit apporter une attention particulière à toutes les étapes et techniques de production de plants.

Les modèles logistiques de croissance en hauteur et du diamètre au collet conçus pour ces deux traitements peuvent être utilisés comme standards de croissance par les pépiniéristes. L'intégration de ces modèles dans le logiciel *Plantec2* de gestion des cultures en pépinière forestière n'en est que l'application pratique évidente.

Les résultats de cette étude indiquent clairement que le recours au traitement de jours courts, combiné à un suivi et une optimisation très rigoureuse des techniques culturales, ne peut qu'améliorer la rentabilité des pépinières forestières en diminuant de façon significative le rejet de plants causé par l'insuffisance racinaire et en augmentant leur taux de conformité.

# Références bibliographiques


Bergeron, O., M.S. Lamhamedi, H.A. Margolis, P.Y. Bernier et D.C. Stowe, 2004. *Irrigation control and physiological responses of nursery-grown black spruce seedlings (1+0) cultivated in air-slit containers*. Hort. Sci. 39 : 599-605.

Bernier, P.Y., J.D. Stewart et A. Gonzalez, 1995. *Effects of the physical properties of* Sphagnum *peat on water stress in containerized* Picea mariana *seedlings under simulated field conditions*. Scand. J. For. Res. 10 : 184-189.

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

Calmé, S., H.A. Margolis et F.J. Bigras, 1993. *Influence of cultural practices on the relationship between frost tolerance and water content of containerized black spruce, white spruce, and jack pine seedlings*. Can. J. For. Res. 23 : 503-511.

Caron, J., 2001. *La tourbe et les milieux artificiels*. Dans : S. Payette et L. Rochefort (éds.). Écologie des tourbières du Québec-Labrador. Les Presses de l'Université Laval, Québec. p. 399-410.

Cline, M.G. et C.A. Harrington, 2007. *Apical dominance and apical control in multiple flushing of temperate woody species*. Can. J. For. Res. 37 : 74-83.

Colombo, S.J., 1996. *Frost hardening spruce container stock for overwintering in Ontario*. New Forests 13 : 441-459.

Colombo, S.J. et E.M. Raitonen, 1993. *Frost hardening in first-year eastern larch* (Larix laricina) *container seedlings*. New Forests 7 : 55-61.

Colombo, S.J., D.P. Webb et G. Glerum, 1981. *Cold hardiness and bud development under short days in black spruce and white spruce seedlings.* Dans : J.B. Scarratt, C. Glerum et C.A. Plezman (éds.). Proceedings of the canadian containerized tree seedling symposium. 14-16 septembre, 1981. Toronto, Ontario. p. 171-176.

Colombo, S.J., M.I. Menzies et C. O'Reilly, 2001. *Influence of nursery cultural practices on cold hardiness of coniferous forest tree seedlings.* Dans : F.J. Bigras et S.J. Colombo (éds.). Conifer cold hardiness. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Pays-Bas. p. 223-252.

D'Aoust, A.L., 1981. *The induction of dormancy by short-day treatment of container-grown black spruce seedlings*. Laurentian Forest Research Centre, Canadian Forestry Service, Québec, Canada. Rapport LAU-X-47. 16 p.

Davis, A.S. et D.F. Jacobs, 2005. *Quantifying root system quality of nursery seedlings and relationship to outplanting performance*. New Forests 30 : 295-311.

Girard, D., J. Gagnon et C.-G. Langlois, 2001. Plantec : *un logiciel pour gérer la fertilisation des plants dans les pépinières forestières*. Ministère des Ressources naturelles, Direction de la recherche forestière, Sainte-Foy, Québec. Note de recherche forestière n° 111. 8 p. http://www.mrnf.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Gagnon-Jean/Note111.pdf

Hawkins, C.D.B. et K.B. Shewan, 2000. *Frost hardiness, height, and dormancy of 15 short-day, nursery-treated interior spruce seed lots*. Can. J. For. Res. 30 : 1096-1105.

Hawkins, C.D.B., R.Y.N. Eng et M.J. Krasowski. 1994. *Short day treatment promotes photosynthesis in interior spruce seedlings: Summary of poster*. Dans : Proceedings, Forest and Conservation Nursery Associations. 1994, July 11-14; Williamsburg, VA, Gen. Tech. Rep. RM-GTR-257. Fort Collins, CO, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station : 268-270.

Grossnickle, S.C., J.T. Arnott, J.E. Major et T.J. Tschaplinski, 1991. *Influence of dormancy induction on western hemlock seedlings. I. Seedling development and stock quality assessment.* Can. J. For. Res. 21:164-174.

Heiskanen, J., 1993. *Favourable water and aeration conditions for growth media used in containerized tree seedling production: A review.* Scand. J. For. Res. 8 : 337-358.

HUNT, R., 1982. *Plant growth curves: The functional approach to plant growth analysis*. Edward Arnold (Publishers) Limited, Londres, Grande-Bretagne. 248 p.

KALRA, Y.P. et D.G. MAYNARD, 1992. *Méthodes d'analyse des sols forestiers et des tissus végétaux.* Rapport d'information NOR-X-319F. Forêts Canada, Centre de foresterie du Nord, Edmonton, Canada. 129 p.

KOHMANN, K. et Ø. JOHNSEN, 2007. *Effects of early long-night treatment on diameter and height growth, second flush and frost tolerance in two-year-old* Picea abies *container seedlings*. Scan. J. For. Res. 22 : 375-383.

KOZLOWSKI, T.T., 1992. *Carbohydrate sources and sinks in woody plants*. Bot. Rev. 58 : 107-222.

KRASOWSKI, M.J., T. LETCHFORD et A.M. EASTHAM, 1993. G*rowth of short-day treated spruce seedlings planted throughout British Columbia*. FRDA Report 209. B.C. Ministry of Forests, Research Branch, Victoria, Canada. 39 p.

LAMBANY, G., 1994. *Évolution des glucides dans les tissus de plants soumis à un entreposage de longue durée.* Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles, Direction de la recherche forestière. Mémoire de recherche forestière n° 112. 28 p.

LAMHAMEDI, M.S., 2006. *Principaux facteurs influençant le développement racinaire et effets de l'irrigation sur la croissance et la physiologie des racines en pépinière forestière*. Dans : 4e atelier sur la production de plants forestiers au Québec. 15-16 mars 2006, Québec, Canada. http://www.mrnf.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Lamhamedi-Mohammed/4e-atelier-principaux-facteurs.pdf

LAMHAMEDI, M.S. et P.Y. BERNIER, 1994. *Ecophysiology and field performance of black spruce* (Picea mariana)*: a review*. Ann. Sci. For. 51 : 529-551.

LAMHAMEDI, M.S., P.Y. BERNIER et C. HÉBERT, 1997. *Effect of shoot size on the gas exchange and growth of containerized* Picea mariana *seedlings under different watering regimes.* New Forests. 13(1-3) : 209-223.

LAMHAMEDI, M.S., P.Y. BERNIER et G. LAMBANY, 1998b. *Relating carbohydrate concentrations to photosynthetic rates and growth in* Picea mariana *seedlings*. Ann. Rech. For. 31 : 26-39.

LAMHAMEDI, M.S., H. CHAMBERLAND et F.M. TREMBLAY, 2003b. *Epidermal transpiration, ultrastructural characteristics and net photosynthesis of white spruce somatic seedlings in response to* in vitro *acclimatization*. Physiol. Plantarum 18 : 544-561.

LAMHAMEDI, M.S., L. VEILLEUX et M. RENAUD, 2005. *Élaboration des seuils de tolérance au gel des plants d'épinette blanche (1+0) en pépinière forestière selon les régions écologiques du Québec*. Ministère des Ressources naturelles, Direction de la recherche forestière, Sainte-Foy, Québec. Mémoire de recherche forestière n° 147. 50 p.

LAMHAMEDI, M.S., P.Y. BERNIER, C. HÉBERT et R. JOBIDON, 1998a. *Physiological and growth responses of three types of containerized* Picea mariana *seedlings outplanted with and without vegetation control*. For. Ecol. Manage. 110 : 13-23.

LAMHAMEDI M.S., H. CHAMBERLAND, P.Y. BERNIER et F.M. TREMBLAY, 2000. *Clonal variation in morphology, growth, physiology, anatomy and ultrastructure of container-grown white spruce somatic plants*. Tree Physiol. 20 : 869-880.

LAMHAMEDI, M.S., M. RENAUD, P. DESJARDINS et L. VEILLEUX, 2007. *Effets du traitement de jours courts sur la croissance des racines, la tolérance au gel et la nutrition minérale des plants d'épinette noire (1+0) produits en pépinière forestière.* Dans : Des plants aux plantations : Techniques, technologies et performances. Carrefour de la recherche forestière. 19-20 septembre 2007, Québec, Canada. p : 25-31. http://www.mrn.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Lamhamedi-Mohammed/Recueil-PlantsPlantations-25-31.pdf

LAMHAMEDI, M.S., H.A. MARGOLIS, M. RENAUD, L. VEILLEUX et I. AUGER, 2003a. *Effets de différentes régies d'irrigation sur la croissance, la nutrition minérale et le lessivage des éléments nutritifs des semis d'épinette noire (1+0) produits en récipients à parois ajourées en pépinière forestière.* Can. J. For. Res. 33 : 279-291.

LAMHAMEDI, M.S., G. LAMBANY, H.A. MARGOLIS, M. RENAUD, L. VEILLEUX et P.Y. BERNIER, 2001. *Growth, physiology, and leachate losses in* Picea glauca *seedlings (1+0) grown in air-slit containers under different irrigation regimes*. Can. J. For. Res. 32 : 1968-1980.

Lamhamedi, M.S., L. Labbé, H.A. Margolis, D.C. Stowe, L. Blais et M. Renaud, 2006. *Spatial variability of substrate water content and growth of white spruce seedlings*. Soil Sci. Soc. Am. J. 70 : 108-120.

Landis, T.D., R.W. Tinus et J.P. Barnett, 1989. *The container tree nursery manual*. *Vol. 4. Seedling nutrition and irrigation*. U.S. Dep. Agric. Agric. Handbook. 674. 119 p.

Landis, T.D., R.W. Tinus et J.P. Barnett, 1990. *The container tree nursery manual. Vol 2. Containers and growing media*. U.S. Dep. Agric. Agric. Handbook. 674. p. 41-85.

Langlois, C.G. et J. Gagnon, 1993. *A global approach to mineral nutrition based on the growth needs of seedlings produced in forest tree nurseries.* Dans : N.J. Barrow (éd.). Plant nutrition: from genetic engineering to field practice. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Pays-Bas. p. 303-306.

Ledig, F.T., F.H. Bormann et K.F. Wenger, 1970. *The distribution of dry matter growth between shoot and roots in loblolly pine*. Bot. Gaz. 131 : 349-359.

Lippu, J., 1998. *Redistribution of $^{14}$C-labelled reserve carbon in* Pinus sylvestris *seedlings during shoot elongation*. Silva Fennica 32(1) : 3-10.

Luoranen, J., P. Helenius, L. Huttunen et R. Rikala, 2007. *Short-day treatment enhances root egress of summer-planted* Picea abies *seedlings under dry conditions*. Scan. J. For. Res. 22 : 384-389.

MacDonald, J.E. et J.N. Owens, 2006. *Morphology, physiology, survival and field performance of containerized coastal Douglas-fir seedlings given different dormancy-induction treatment*. Hort. Sci. 41 : 1416-1420.

Mathers, H.M., S.B. Lowe, C. Scagel, D.K. Struve et L.T. Case, 2007. *Abiotic factors influencing root growth of woody nursery plants in containers.* Hort. Technology 17 : 151-162.

Munson, A.D. et P.Y. Bernier, 1993. *Comparing natural and planted black spruce seedlings. II. Nutrient uptake and efficiency of use*. Can. J. For. Res. 23 : 2435-2442.

Odlum, K.D., et P. Ng, 1995. *Selecting greenhouse temperatures to control black spruce and jack pine seedling growth*. Ministry of Natural Resources, Ontario Forest Research Institute, Ontario, Canada. 40 p.

Parkinson, J.A. et S.E. Allen, 1975. A *wet oxidation procedure suitable for the determination of nitrogen and mineral nutrients in biological material*. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 6 : 1-11.

Pellicer, V., J.-M. Guehl, F.-A. Daudet, M. Cazet, L.M. Riviere et P. Maillard, 2000. *Carbon and nitrogen mobilization in* Larix x eurolepis *leafy stem cuttings assessed by dual $^{13}$C and $^{15}$N labeling: relationships with rooting*. Tree Physiol. 20 : 807-814.

Pregitzer, K.S., 2003. *Woody plants, carbon allocation and fine roots*. New Phytologist 158 : 419-430.

Ritchie, G.A., 2003. *Root physiology and phenology: The key to transplanting success*. Dans : L.E. Riley, R.K. Dumroese, et T.D. Landis (éds.). National Proceedings: Forest and Conservation Nursery Associations-2002. Ogden, UT U.S. Dep. Agric., Rocky Mountain Research Station. p : 98-104.

Rostad, H., A. Granhus, I.S. Fløistad et S. Morgenlie, 2006. *Early summer frost hardiness in* Picea abies *seedlings in response to photoperiod treatment.* Can. J. For. Res. 36 : 2966-2973.

Rowe, D.B., F.A. Blazich, B. Goldfarb et F.C. Wise, 2002. *Nitrogen nutrition of hedged stock plants of Loblolly pine. II. Influence of carbohydrate and nitrogen status on adventitious rooting of stem cuttings*. New Forests 24 : 53-65.

Stowe, D.C., M.S. Lamhamedi et H.A. Margolis, 2001. *Water relations, cuticular transpiration, and bud characteristics of air-slit containerized* Picea glauca *seedlings in response to controlled irrigation regimes*. Can. J. For. Res. 31 : 2200-2212.

Tan, W., 2007. *Impacts of nursery cultural treatments on stress tolerance in 1+0 container white spruce* (Picea glauca *[Moench] Voss) seedlings for summer-planting*. New For. 33 : 93-107.

TAN, W., S. BLANTON et J.P. BIELECH, 2008. *Summer planting performance of white spruce 1+0 container seedlings affected by nursery short-day treatment*. New For. 35 : 187-205.

TIMMER, V.R. et B.D. MILLER, 1991. *Effects of contrasting fertilization and moisture regimes on biomass, nutrients, and water relations of container grown red pine seedlings*. New For. 5 : 335-348.

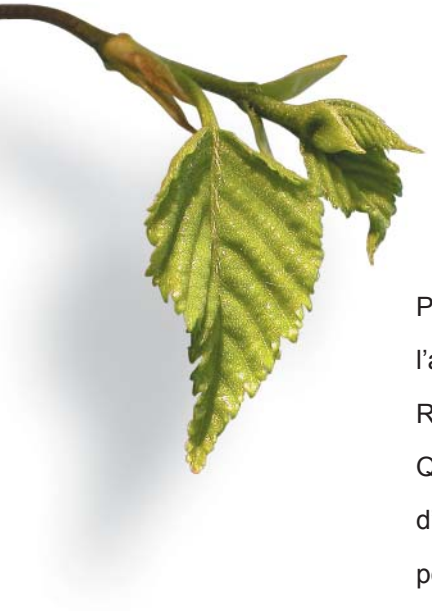
TURNER, J. et S.J. MITCHELL, 2003. *The effect of short day treatments on containerized Douglas-fir morphology, physiology and phenology*. New Forests 26 : 279-295.

VAN DEN DRIESSCHE, R., 1987. *Importance of current photosynthate to new root growth in planted conifer seedling*. Can. J. For. Res. 17 : 776-782.

VEIJALAINEN, A-M., M.-L. JUNTUNEN, J. HEISKANEN et A. LILJA, 2008. *Growing* Picea abies *container seedlings in peat and composted forest-nursery waste mixtures for forest regeneration*. Scan. J. For. Res. 22 : 390-379.

VEILLEUX, P., A. BONNEAU, J.P. GIRARD, L. LABRECQUE, R. LEVER, J. LORTIE et M. TOURIGNY, 2008. I*nventaire de qualification des plants résineux cultivés en récipients. Guide terrain.* Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec, Direction générale des pépinières et des stations piscicoles, Québec, Canada. 131 p.

WALINGA, I., J.J. VAN DER LEE, V.J.G. HOUBA, W. VAN VARK et I. NOVOSAMSKY, 1995. *Plant analysis manual.* Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Pays-Bas. 262 p.



Pour atteindre les objectifs de reboisement et assurer l'aménagement durable des forêts, le ministère des Ressources naturelles et de la Faune (MRNF) du Québec veille à ce que tout soit mis en œuvre afin d'optimiser les techniques de production de plants en pépinière et que les plants produits et mis en terre possèdent des standards morpho-physiologiques de qualité très élevée. Depuis près de 30 ans, le MRNF réalise des projets de recherche-développement dont la priorité est d'assurer, de façon continue, l'accompagnement, le transfert de connaissances, d'expertises et de son savoir-faire auprès de l'ensemble des pépinières forestières privées (18) et gouvernementales (6) du Québec, tout en permettant ainsi l'intégration rapide de ses résultats à l'échelle opérationnelle. Les résultats de ce mémoire démontrent clairement que le recours au traitement de jours courts ne peut qu'améliorer la qualité morpho-physiologique des plants, notamment celle des racines, et contribuer à accroître la rentabilité des pépinières forestières en diminuant la quantité de plants rejetés et en augmentant leur taux de conformité.

Ressources naturelles et Faune
Québec

Le papier des pages intérieures de ce Mémoire de recherche forestière est fabriqué à 100% avec des fibres recyclées.