

$$P'(t) = \frac{r}{k} P(t)(b - P(t))$$
$$V_{AE,ik} = \beta_1 d h p_{ik}^{\beta_2} H_{ik}^{\beta_3} + \varepsilon_{2,ik}$$



# Variabilité de l'architecture des parties aériennes des pieds-mères de mélèze hybride : effets des régions de culture et de l'origine génétique des semences

par Fabienne Colas et Mohammed S. Lamhamedi

MÉMOIRE DE RECHERCHE FORESTIÈRE N° 171

DIRECTION DE LA RECHERCHE FORESTIÈRE



# Variabilité de l'architecture des parties aériennes des pieds-mères de mélèze hybride : effets des régies de culture et de l'origine génétique des semences

par Fabienne Colas et Mohammed S. Lamhamedi

MÉMOIRE DE RECHERCHE FORESTIÈRE N° 171

DIRECTION DE LA RECHERCHE FORESTIÈRE

# Mandat de la DRF

La Direction de la recherche forestière a pour mandat de participer activement à l'orientation de la recherche et à l'amélioration de la pratique forestière au Québec, dans un contexte d'aménagement forestier durable, en réalisant des travaux de recherche scientifique appliquée. Elle acquiert de nouvelles connaissances, du savoir-faire et du matériel biologique et contribue à leur diffusion ou leur intégration au domaine de la pratique. Elle subventionne aussi des recherches en milieu universitaire, le plus souvent dans des créneaux complémentaires à ses propres travaux.

## Les mémoires de recherche forestière de la DRF

Depuis 1970, chacun des Mémoires de recherche forestière de la DRF est révisé par au moins trois pairs 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  
Direction de la recherche forestière  
2700, rue Einstein, Québec (Québec)  
Canada, G1P 3W8  
Courriel : [recherche.forestiere@mrn.gouv.qc.ca](mailto:recherche.forestiere@mrn.gouv.qc.ca)  
Internet : [www.mrn.gouv.qc.ca/forets/  
connaissances/recherche](http://www.mrn.gouv.qc.ca/forets/connaissances/recherche)

© Gouvernement du Québec

On peut citer ce texte en indiquant la référence. Citation recommandée :

COLAS, F. et M.S. LAMHAMED, 2013. *Variabilité de l'architecture des parties aériennes des pieds-mères de mélèze hybride : effets des régies de culture et de l'origine génétique des semences*. Gouvernement du Québec, Ministère des Ressources naturelles, Direction de la recherche forestière, Mémoire de recherche forestière n° 171, 64 p.

Toutes les publications produites par la Direction de la recherche forestière, du ministère des Ressources naturelles, 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.

ISSN : 1183-3912  
ISBN : 978-2-550-68972-0  
ISBN (PDF) : 978-2-550-68973-7  
F.D.C. 232.3  
L.C. SD 404.3

## Notes biographiques



Fabienne COLAS a obtenu un diplôme de technicienne en biotechnologie à l'École Nationale de Chimie de Paris en 1984. Elle a obtenu une maîtrise en biologie génétique appliquée à l'Université Paris 7 Jussieu en 1988. En 1990, le même établissement lui décernait un diplôme d'études supérieures spécialisées en génétique et physiologie végétale.

Au Québec, en 1998, après cinq saisons comme assistante de recherche, elle entre à l'emploi de la Direction de la recherche forestière comme chercheuse. Ses travaux de recherche portent sur la conservation des semences destinées au programme de reboisement et également à la conservation de la diversité génétique forestière, l'intégration de l'embryogenèse somatique dans la gestion des vergers à graines, ainsi que l'optimisation des conditions culturales des semenciers dans les vergers à graines hors sol de mélèze pour favoriser leur fructification.



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 d'État spécialisé en sciences forestières (M.Sc.). En 1991, l'Université Laval (Québec,

Canada) lui décerne 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 en 1993-1995, puis en 1996-1997, directeur scientifique dans le cadre du projet d'installation de pépinières modernes financé par la Banque mondiale en Tunisie [Pampev Internationale - Direction générale des forêts, Tunisie]. De plus, M. Lamhamedi a été attaché de recherche au Centre de recherche en biologie forestière (Université Laval) en 1998-1999. En 1999, M. Lamhamedi est devenu membre de l'Ordre des ingénieurs forestiers du Québec (OIFQ). Chercheur émérite à la Direction de la recherche forestière du ministère des Ressources naturelles du Québec depuis juin 1999, il est aussi chercheur associé au Centre d'étude de la forêt (CEF) et professeur associé à la Faculté de foresterie, de géographie et de géomatique, de même qu'à la Faculté des sciences de l'agriculture et de l'alimentation de l'Université Laval. Il a agi à titre de rédacteur adjoint à la Revue canadienne de Recherche forestière de janvier 2006 à décembre 2012, et est membre permanent du comité de lecture de la revue *Nature et Technologie* depuis novembre 2010. Il est l'auteur de nombreuses publications scientifiques et techniques, et dirige ou codirige des étudiants gradués à la maîtrise et au doctorat. Son expertise porte sur l'optimisation des régies de culture, la conception des standards de tolérance au gel des plants dans les pépinières forestières, 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 dans les pépinières forestières. M. Lamhamedi s'occupe également de transfert d'expertise, de connaissances et de savoir-faire auprès des 19 pépinières forestières (6 gouvernementales et 13 privées) du Québec. De plus, sa participation à différents projets de modernisation des pépinières forestières et de lutte contre l'ensablement dans des pays en développement (Tunisie, Ghana, Nicaragua, Maroc, etc.) lui a valu une renommée mondiale pour l'adaptation de l'expertise québécoise et canadienne en production de plants.



# Remerciements

Nous tenons à remercier Mme Michèle Bettez et l'équipe du Centre de semences forestières de Berthier<sup>1</sup> (ministère des Ressources naturelles, MRN) pour la fourniture des semences et la réalisation des tests de germination préliminaires dans les chambres de croissance, ainsi que Mme Julie Gravel-Grenier, M. Claude Bérubé et l'équipe de la pépinière forestière de Saint-Modeste<sup>2</sup> (MRN) pour l'ensemencement et la culture des plants jusqu'à leur repiquage.

Nous tenons à souligner la qualité du travail technique réalisé pour cet essai par MM. Patrick Lemay, Mario Renaud et Pascal Desjardins de la Direction de la recherche forestière<sup>3</sup> (DRF).

Nous remercions tout le personnel du laboratoire de chimie organique et inorganique de la DRF pour les analyses minérales des échantillons.

Nos remerciements s'adressent également à Mmes Josianne DeBlois et Marie-Claude Lambert de l'équipe de biométrie de la DRF pour les analyses statistiques de cet essai.

Nous tenons à remercier M. Nelson Thiffault qui a agi à titre d'éditeur associé, ainsi que les deux réviseurs anonymes, qui, grâce à leurs commentaires et suggestions, ont permis de bonifier ce manuscrit. Nos remerciements s'adressent également à Mme Linda Veilleux pour le photomontage, à M. Mario Renaud pour la révision linguistique, à Mme Denise Tousignant pour la révision et l'édition de ce mémoire, à Mme Maripierre Jalbert pour la mise en page du document et l'ajustement des illustrations, et à Mme Nathalie Langlois pour la révision typographique.

Le financement de cette étude est assuré par la DRF dans le cadre du projet n° 1120549-112310111. Ce projet a été assujéti à une évaluation de pertinence et une évaluation scientifique par des comités indépendants qui assurent également les évaluations des projets issus des universités et des organismes de recherche du Québec. La gestion de ces évaluations est assurée par un organisme indépendant de gestion des fonds de recherche dédiés aux différents domaines de recherche, soit le Fonds de recherche du Québec – Nature et technologies<sup>4</sup>.

---

<sup>1</sup> [www.mrn.gouv.qc.ca/forets/semences/semences-berthier.jsp](http://www.mrn.gouv.qc.ca/forets/semences/semences-berthier.jsp)

<sup>2</sup> [www.mrn.gouv.qc.ca/forets/semences/semences-pepinieres-saint-modeste.jsp](http://www.mrn.gouv.qc.ca/forets/semences/semences-pepinieres-saint-modeste.jsp)

<sup>3</sup> [www.mrn.gouv.qc.ca/forets/connaissances/recherche/index.jsp](http://www.mrn.gouv.qc.ca/forets/connaissances/recherche/index.jsp)

<sup>4</sup> [www.frqnt.gouv.qc.ca](http://www.frqnt.gouv.qc.ca)



## Résumé

Le mélèze hybride (*Larix x marschlinsii* Coaz, MEH) est obtenu en croisant le mélèze d'Europe (*Larix decidua* P. Mill.) avec le mélèze du Japon (*Larix kaempferi* [Lamb.] Carrière), peu importe le sens du croisement. Au Québec, en raison d'un approvisionnement en semences insuffisant lié à la complexité de la production opérationnelle de semences de MEH, la totalité de la production de plants de cette espèce est réalisée par bouturage. Depuis quelques années, une proportion importante de plants chétifs (de 15 à 30 %) a été observée dans la population opérationnelle de pieds-mères sur lesquels sont prélevées les boutures. Ces plants chétifs se caractérisent par une architecture buissonnante de la partie aérienne, une croissance en hauteur très réduite et l'absence de dominance apicale. Ces caractéristiques ne permettant pas le prélèvement de tigelles (ou boutures), elles rendent très difficile l'atteinte des objectifs de production de plants par bouturage.

Les graines de MEH sont produites par pollinisation de masse dans un verger à graines sous abri, où les arbres sont cultivés en pot. Les semenciers présents dans le verger sont issus de plusieurs sélections génétiques. Selon le schéma actuel, les arbres porteurs de fleurs femelles sont pollinisés avec un mélange de pollen dont la composition est variable selon les années. Les graines utilisées pour la production de pieds-mères sont des mélanges entre les différents clones producteurs pour une année donnée. Il est donc impossible d'identifier avec exactitude les parents dont sont issues les graines.

Deux hypothèses peuvent être émises pour expliquer l'occurrence d'une proportion importante de plants chétifs : i) un effet de la régie d'irrigation qui favorise la formation de plants chétifs, et ii) la présence de combinaisons génétiques défavorables.

Cet essai avait pour objet d'étudier l'effet de la régie d'irrigation et de l'origine génétique des semences, combinés au contrôle de la fertilisation, sur l'occurrence de plants chétifs. Deux

régies d'irrigation ont été testées : une sèche, avec une teneur en eau du substrat maintenue à 25-30 % v/v, et une humide, avec une teneur en eau de 40-45 % v/v. Les plants ont été produits à partir de 6 lots opérationnels de graines (combinaisons génétiques différentes : mère connue, père inconnu) produits entre 2001 et 2009.

Pour les 6 lots étudiés, la régie d'irrigation n'a pas eu d'effet significatif sur la variabilité de la hauteur des plants et la présence de plants chétifs, qui varie de 48 à 84 % selon les lots. Un effet du lot de graines a cependant été mis en évidence sur le développement des parties aériennes des plants. Ainsi, au sein des différents lots, et dans des proportions variables, on retrouverait des génotypes issus de combinaisons génétiques défavorables entraînant la production de plants chétifs.

Le scénario actuel ne permet pas d'éliminer toute possibilité de produire des plants chétifs puisque l'origine génétique des différents lots ne peut être connue avec exactitude. Cette incertitude a un impact important sur la gestion de la culture opérationnelle des plants, et également, sur l'atteinte des objectifs de production par la pépinière. Afin de maximiser le taux d'enracinement des boutures, les pieds-mères sont renouvelés tous les ans, ce qui requiert de nouveaux ensemencements chaque année. Le problème lié à la présence de plants chétifs sera donc récurrent tant que l'origine de leur formation ne sera pas identifiée.

En cultivant les plants par arbre mère d'origine, le pépiniériste pourrait plus facilement gérer les cultures si des combinaisons génétiques propices à la formation de plants chétifs s'avéraient.

À moyen terme, grâce à l'expansion du verger à graines sous abri de mélèzes, il est prévu que tous les plants de MEH soient produits à partir de semences. Le recours à des croisements dirigés (mère et père connus) permettrait d'expliquer l'occurrence des plants chétifs. La résolution de ce problème est essentielle pour la poursuite du programme de production de plants du MEH.

Mots clés : graine, germination, *Larix x marschlinsii*, essence à croissance rapide, production de plants, régie de culture, gabarit de plants, architecture des parties aériennes, pieds-mères, bouturage

## Abstract

Hybrid larch (*Larix x marschlinsii* Coaz, HL) is obtained by crossing European larch (*Larix decidua* P. Mill.) with Japanese larch (*Larix kaempferi* [Lamb.] Carrière). Either species can serve as the male or female parent. Because the complexity of hybrid seed production at an operational scale limits HL seed supply, all HL plants for the province of Quebec are currently produced by cuttings. For the last few years, up to 15 to 30% of the stockplant population from which the cuttings are harvested has been composed of stunted individuals, which are characterized by a bushy architecture, very reduced height growth and the absence of apical dominance. These traits prevent the harvest of cuttings from stunted stockplants, and can compromise reaching the overall production goals for cuttings.

HL seeds are produced by mass pollination in a sheltered seed orchard containing pot-grown grafts from trees of several genetic selections. According to the actual strategy, female flower-bearing trees are pollinated using a pollen mixture of variable composition from year to year. For any given year, the seed mix used to produce stockplants comes from several seed-bearing clones. It is thus impossible to precisely identify the parents of the stockplants.

Two hypotheses could explain the presence of a high proportion of stunted plants: i) an effect of the irrigation regime, which could favour the appearance of stunted plants, and ii) the presence of unfavourable genetic combinations.

This trial compared the effects of two irrigation regimes and of the genetic origin of seeds, in combination with fertilization control, on the occurrence of stunted HL plants. Irrigation regime was either “dry” (substrate water content maintained at 25-30% v/v), or “moist” (40-45% v/v). Stockplants

were grown from 6 operational seedlots produced between 2001 and 2009 (variable genetic combinations: mother known, father unknown).

For all 6 seedlots, irrigation regime did not significantly influence height variability or the occurrence of stunted plants, which varied from 48 to 84% among lots. However, a significant effect of seedlot was observed on above-ground development of the stockplants. This suggests that a variable proportion of genotypes within each lot could show unfavourable genetic combinations which lead to a stunted architecture.

The current scenario does not exclude all possibilities of producing stunted plants, since the genetic origin of the different seedlots cannot be known with precision. This uncertainty affects the operational management of stockplants, and can compromise reaching the nursery's production objectives. To maximize the rooting of cuttings, stockplants are renewed each year, and this requires annual sowings. The problem of the presence of stunted plants will therefore remain recurrent as long as the origin of their formation is not identified.

Growing stockplants separately according to their mother tree would enable nurserymen to manage their cultures more easily, while taking into account genetic combinations that favour the occurrence of stunted plants, if these were confirmed. In the medium term, the expansion of the sheltered larch seed orchard should allow all HL plants to be produced by seeds. The use of controlled crosses (in which both the mother and the father are known) could help explain the occurrence of stunted plants. Solving this problem is essential for the pursuit of the HL plant production program.

**Keywords:** seed, germination, *Larix x marschlinsii*, rapid-growing species, plant production, seedling size, crop management, plant architecture, stockplants, cuttings

# Table des matières

<b>Résumé</b> .....	vii
<b>Abstract</b> .....	viii
<b>Liste des figures</b> .....	xi
<b>Liste des tableaux</b> .....	xiii
<b>Liste des annexes</b> .....	xv
<b>Introduction</b> .....	1
<b>Chapitre premier – Matériel et méthodes</b> .....	5
1.1 Lots de semences .....	5
1.2 Production de plants .....	5
1.2.1 Ensemencement et repiquage .....	5
1.2.2 Dispositif expérimental, contrôle des deux régies d’irrigation et de la fertilisation .....	6
1.2.2.1 Contrôle de l’irrigation .....	7
1.2.2.2 Contrôle de la fertilisation .....	8
1.2.3 Évaluation des variables environnementales en serre .....	8
1.2.4 Évaluation de la croissance et de la nutrition minérale des plants .....	10
1.3 Analyses statistiques.....	10
<b>Chapitre deux – Résultats</b> .....	13
2.1 Conditions de croissance des plants et variables environnementales en serre .....	13
2.2 Teneurs en eau du substrat et quantités d’eau utilisées .....	13
2.3 Croissance et architecture des plants de mélèze hybride issus des différents lots de semences ..	16
2.3.1 Croissance des plants selon la régie d’irrigation .....	16
2.3.1.1 Croissance en hauteur .....	16
2.3.1.2 Masses sèches des parties aériennes, des racines et du plant entier .....	17
2.3.2 Hétérogénéité de l’architecture des parties aériennes .....	20
2.3.3 Formation des bourgeons terminaux de la tige principale des plants .....	24
2.3.4 Nutrition minérale.....	25
<b>Chapitre trois – Discussion</b> .....	27
<b>Conclusion et recommandations opérationnelles</b> .....	31
<b>Références bibliographiques</b> .....	33
<b>Annexes</b> .....	39



## Liste des figures

<b>Figure 1.</b>	Occurrence de plants chétifs au sein de la population opérationnelle de futurs pieds-mères de MEH cultivés en récipients à la pépinière de Saint-Modeste en 2009-2010 .....	3
<b>Figure 2.</b>	Germination et repiquage des jeunes semis de MEH .....	6
<b>Figure 3.</b>	Contrôle précis de l'irrigation et de la fertilisation des récipients pendant l'expérience .....	7
<b>Figure 4.</b>	Quantités cumulatives des principaux éléments minéraux (azote, phosphore et potassium) ajoutées au substrat de croissance des plants de MEH.....	8
<b>Figure 5.</b>	Mesurage continu des variables environnementales prévalant dans la serre durant la saison de croissance .....	9
<b>Figure 6.</b>	Évolution des conditions environnementales quotidiennes prévalant dans la serre du 15 avril au 15 juin 2011 .....	14
<b>Figure 7.</b>	Suivi de la teneur en eau et de l'irrigation des récipients durant la saison de croissance (du 14 mars au 15 juin 2011) .....	15
<b>Figure 8.</b>	Évolution de la croissance des plants de MEH du bloc 2 à 4 dates successives au cours de la saison de croissance .....	17
<b>Figure 9.</b>	Exemples du gabarit des plants de MEH atteint à la fin de la saison de croissance pour les 6 lots de graines testés .....	18
<b>Figure 10.</b>	Proportion (%) de plants chétifs de MEH pour chaque lot et chaque régie lors de l'échantillonnage final .....	20
<b>Figure 11.</b>	Gabarit des plants de MEH des lots 2 et 5 lors du mesurage final, selon leur classe de hauteur (H; classe 1 : $H \leq 11,6$ cm et classe 2 : $H > 11,6$ cm) et la régie d'irrigation.....	21
<b>Figure 12.</b>	Évolution de la hauteur moyenne des plants de MEH au cours de la saison de croissance pour les 6 lots de l'essai .....	22
<b>Figure 13.</b>	Logarithme des masses sèches totales, des racines et des parties aériennes des plants de 6 lots de MEH, après 22 semaines de culture en serre .....	23
<b>Figure 14.</b>	Proportion (%) de plants ayant un bourgeon fermé à la dernière date d'échantillonnage pour les 6 lots de MEH .....	24
<b>Figure 15.</b>	Fertilité des substrats selon la classe de hauteur (H) des plants de MEH à la fin de la saison de croissance, pour les deux régies (humide et sèche) .....	26



# Liste des tableaux

<b>Tableau 1.</b> Informations sur les 6 lots de graines de MEH sélectionnés pour la réalisation de l'essai .....	5
<b>Tableau 2.</b> Analyse de la variance sur la variable hauteur pour les 6 lots de MEH et pour les différentes dates de mesure au cours de la saison de croissance.....	16
<b>Tableau 3.</b> Analyse de la variance sur la masse sèche des parties aériennes, des racines et totale des plants à la fin de la saison de croissance, pour les 6 lots de MEH.....	20
<b>Tableau 4.</b> Analyse de la variance sur le nombre de branches latérales de plus de 1 cm, pour les 6 lots de MEH et pour les différentes dates de mesure au cours de la saison de croissance .....	22
<b>Tableau 5.</b> Analyse de la variance sur la proportion de plants ayant un bourgeon fermé, pour les 6 lots de MEH et pour les différentes dates de mesure au cours de la saison de croissance .....	25
<b>Tableau 6.</b> Analyse de la variance des résultats des analyses minérales pour la concentration, en %, des différents éléments (N, P, K, Ca, Mg) dans les parties aériennes et les racines des plants de MEH .....	25
<b>Tableau 7.</b> Recommandations de modifications de pratiques afin de limiter et mieux comprendre l'occurrence de la présence de plants chétifs parmi les populations de MEH.....	31



# Liste des annexes

<b>Annexe 1.</b> Schéma du dispositif expérimental installé dans la serre.....	39
<b>Annexe 2.</b> Calcul de la quantité d'eau à ajouter pour le maintien de la teneur en eau des deux régies d'irrigation .....	40
<b>Annexe 3.</b> Dates de fertilisation, type de fertilisant utilisé et quantité d'éléments (N, P et K) reçus par plant de MEH durant la saison de croissance, pour les deux régies d'irrigation .....	41
<b>Annexe 4.</b> Statistiques descriptives pour la hauteur des plants de MEH pour chaque combinaison de régie d'irrigation (H : humide = 40-45 % v/v, S : sèche à 25-30 % v/v) et de lot, et ce, pour chacune des dates de mesurage .....	42
<b>Annexe 5.</b> Moyennes ajustées, erreur type et résultats du test de comparaisons multiples pour le nombre de branches latérales de plus de 1 cm et pour la proportion de plants ayant un bourgeon fermé, pour tous les lots de MEH et sur l'ensemble de la saison de croissance, d'après les analyses de la variance .....	43
<b>Annexe 6.</b> Proportion de plants avec une dominance apicale parmi les 6 lots de plants de MEH sur l'ensemble de la saison de croissance, selon la régie d'irrigation (H: humide = 40-45 % v/v, S : sèche = 25-30 % v/v) .....	44



# Introduction

Le mélèze hybride (*Larix x marschlinii* Coaz, MEH) correspond au croisement entre le mélèze d'Europe (*Larix decidua* P. Mill., MEE) et le mélèze du Japon (*Larix kaempferi* [Lamb.] Carrière, MEJ), peu importe le sens du croisement. Le MEH se caractérise par une productivité élevée qui dépasse celle de ses parents, un accroissement annuel moyen qui dépasse celui du mélèze laricin indigène (*Larix laricina*, 10 contre 6 m<sup>3</sup>·ha<sup>-1</sup>·an<sup>-1</sup>) et une bonne résistance aux maladies (TOUSIGNANT et STIPANICIC 2000). Le programme d'amélioration génétique des mélèzes mené au Québec a mis l'accent sur la réalisation de croisements entre les meilleurs individus de MEE et de MEJ, afin de développer des mélèzes hybrides rustiques, adaptés à plusieurs régions écologiques du Québec, et qui répondent aux besoins de l'industrie forestière québécoise (PERRON 2010). Ceci est en accord avec les autres travaux sur les mélèzes qui ont principalement concerné les croisements interspécifiques (Voir PÂQUES 1989 pour une liste des travaux réalisés afin d'évaluer les performances des mélèzes hybrides). Les variétés de MEH actuellement disponibles devraient permettre d'obtenir des accroissements annuels moyens variant de 2,3 m<sup>3</sup>·ha<sup>-1</sup>·an<sup>-1</sup> à 8,5 m<sup>3</sup>·ha<sup>-1</sup>·an<sup>-1</sup> à 30 ans (BOLGHARI et BERTRAND 1984), ce qui fait du MEH une essence de choix, parmi les plus performantes utilisées dans le programme de reboisement du Québec. Le bois de MEH peut notamment être utilisé pour la confection de planchers, le revêtement extérieur de maisons ou de bâtiments commerciaux, la fabrication de bois d'ingénierie, l'ébénisterie, etc. (RIOU-NIVERT 2001 ; KOUBAA et ZHANG 2009).

Les mélèzes, comme tous les conifères, ont une production semencière très variable selon les années (RUDOLF 1974 ; SHIN et KARNOSKY 1995). De plus, le genre *Larix* est reconnu comme un faible producteur de graines pleines (BONNET-MASIMBERT *et al.* 1998 ; LAROPPE *et al.* 2002 ; OWENS et KITTIRAT 2004 ; TIGABU et ODÉN 2004 ; SHEARER 2008), ce qui engendre des difficultés d'approvisionnement en semences. Les causes en sont multiples : floraison femelle insuffisante, manque de pollinisation, de fécondation, ou les deux, gel des strobiles après la pollinisation, dégénérescence de l'ovule ou du jeune embryon (HÅKANSSON 1960 ; OWENS 1992 ; SHIN et KARNOSKY 1995 ; SLOBODNIK et GUTTENBERGER 2000 ; LEE 2003). En outre, les mélèzes ont une floraison précoce au printemps, ce qui rend leurs strobiles, ainsi que la pollinisation elle-même, vulnérables aux conditions météorologiques (précipitations de

pluie ou de neige, gels tardifs) et nuit ultimement à la production de graines (LEE 2003 ; SLOBODNIK et GUTTENBERGER 2003). En plus de la faible fécondité du genre *Larix*, le pourcentage de germination des graines produites est assez faible (de 15 à 60 %), et ce, quelle que soit l'espèce (SHEARER 2008).

Bien que le manque de graines limite le déploiement du MEH (LAROPPE *et al.* 2002), le potentiel de croissance du MEH en fait une essence en demande pour le reboisement au Québec (projet TRIADE en Mauricie [CÔTÉ *et al.* 2010], aires d'intensification de la production ligneuse).

Pour pallier le problème du manque de semences disponibles, le bouturage de masse<sup>5</sup> de MEH constitue une solution prometteuse, car il permet, à partir d'un nombre restreint de semences, de produire des plants de haute qualité morpho-physiologique et dotés également d'une très bonne diversité génétique. Le recours au bouturage en utilisant des semences hautement améliorées permet d'atteindre des gains génétiques très élevés par comparaison aux plants issus de semences (ISIK *et al.* 2004). Il permet également d'augmenter rapidement le nombre total de plants génétiquement améliorés livrés au reboisement (TOUSIGNANT 1999), de rendre rapidement accessible tout progrès génétique issu des programmes d'amélioration (PÂQUES 1992), et de réduire les coûts des plants puisque les graines de MEH sont chères à produire (PERKS *et al.* 2006).

Au Québec, afin de tirer le meilleur parti des semences disponibles, tous les plants de MEH sont produits par bouturage de masse (TOUSIGNANT et RIOUX 2002). Les graines utilisées pour la production de pieds-mères sont issues de l'unique verger à graines sous abri, dont le concept a été développé au Québec (COLAS *et al.* 2008), où les semenciers sont cultivés en pots de 16 à 110 L, selon l'âge de l'arbre. Ce type de verger est très bien adapté aux caractéristiques particulières du développement des mélèzes, et permet la floraison et la production récurrente de semences de MEH malgré la rudesse des conditions climatiques. Le verger est composé de clones sélectionnés pour la première et la deuxième génération d'amélioration des MEE et MEJ (PERRON 2008 ; 2010) qui ont tous été certi-

<sup>5</sup> Lors d'un bouturage de masse, les boutures sont prélevées en vrac dans la population de pieds-mères, de sorte que c'est la population dans son ensemble qui est multipliée.

fiés comme des espèces pures grâce à l'utilisation de marqueurs moléculaires (GROS-LOUIS *et al.* 2005). Les clones de MEE et MEJ sont pollinisés entre eux à l'aide d'un mélange de pollen dont la composition varie selon les années, car celle-ci est tributaire de la fructification des différents clones. L'application du pollen est réalisée par pollinisation électrostatique (PHILIPPE et BALDET 1997) à l'aide d'une version portative du pistolet électrostatique de pollinisation qui a été adaptée au Québec (COLAS *et al.* 2008).

La contribution des différents clones au pool génétique des lots de graines varie selon leur fructification annuelle respective. Ainsi, d'une année à l'autre, les clones ayant participé à la pollinisation vont varier, ce qui pourrait probablement affecter la croissance, l'architecture des parties aériennes et la qualité morpho-physiologique des plants et des pieds-mères du MEH. Actuellement, les récoltes de cônes sont effectuées par clone mère (MEE et MEJ séparément). Lors de l'extraction des semences, des regroupements, basés sur l'appartenance à une même population de sélection, sont effectués pour réduire le nombre de lots et augmenter ainsi leur volume, ce qui facilite les différentes opérations de traitement dans l'unique centre de semences forestières au Québec (Centre de semences forestières de Berthier, CSFB). Les graines sont extraites à l'aide d'un extracteur spécialement conçu pour les mélèzes et qui permet de récupérer le maximum des graines produites dans les cônes (BALDET et CONCHE 2007).

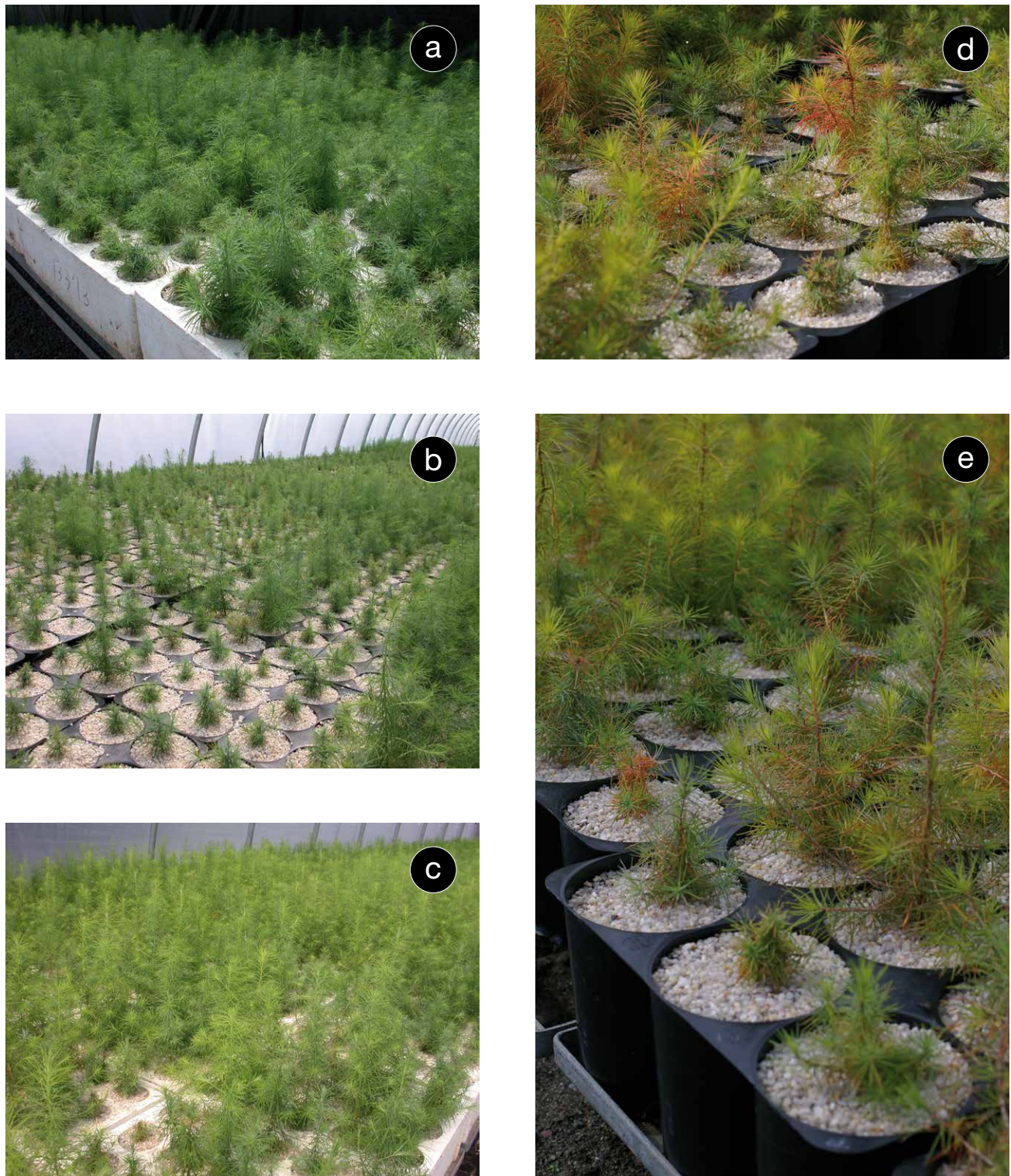
Pour répondre à l'objectif de production annuelle de 600 000 plants issus de boutures, la pépinière de Saint-Modeste, unique pépinière québécoise ayant développé l'expertise propre à la production de plants issus de boutures de MEH, doit produire environ 35 000 pieds-mères qui sont issus de mélanges de semences reçus du CSFB. Ces pieds-mères doivent être renouvelés à chaque année, car le vieillissement accéléré des pieds-mères de MEH induit une perte de l'aptitude à l'enracinement et une forte tendance au plagiotropisme des plants produits à partir de boutures (PÂQUES 2001).

Les graines, stratifiées, sont d'abord ensemencées à la mi-mars dans des pastilles Jiffy<sup>MD</sup> et mises à germer dans une serre chauffée. Puis, après germination, les pastilles sont repiquées dans des récipients à plus grosses cavités de 700 à 1300 cm<sup>3</sup> (voir matériel et méthodes, figure 2). Ceci réduit l'espace de serres requis lors de la germination et évite de gérer les cavités vides tout au long de la culture lorsque la germination des graines n'est pas optimale.

L'apparition des plants chétifs dans les cultures a été progressive depuis 2004. Elle a pris plus d'ampleur à partir de la production de 2008 et a été à l'origine de la modification de la stratégie de production des pieds-mères de MEH à la pépinière de Saint-Modeste. Par exemple, en 2009, environ 20 à 25 % des plants de MEH avaient un gabarit réduit en raison de la formation prématurée du bourgeon terminal et d'une architecture des parties aériennes très particulière par rapport à l'ensemble des individus issus du même lot de semences (Figure 1a, b, d, e). Bien que ces plants chétifs soient moins développés que les autres, il a quand même été possible de prélever 4 à 5 tiges (= boutures) par plant pour le bouturage, ce qui était bien inférieur à l'objectif moyen de 15 à 20 boutures par pied-mère observé pour le MEH. Cependant, la qualité morpho-physiologique des plants issus de ces boutures prélevées sur des pieds-mères chétifs et rabougris n'avait pas alors été évaluée.

En 2010, le même lot de semences a été utilisé à nouveau pour la production opérationnelle, et la proportion de plants chétifs détectés s'est alors élevée de 30 à 35 % (Figure 1c). En raison de l'arrêt prématuré de la croissance en hauteur, ces plants sont très petits; ils n'ont pas permis le prélèvement des tiges destinées au bouturage. La présence de ces plants de petite dimension dans la population de futurs pieds-mères engendre une hétérogénéité de croissance en hauteur et d'architecture de la partie aérienne qui nuit à l'atteinte des objectifs de production de tiges, et donc, de plants issus de boutures de MEH. De plus, une telle hétérogénéité de gabarits au sein de la population des pieds-mères issus du même lot de semences constitue un défi de taille pour le pépiniériste en matière de gestion de l'irrigation et de la fertilisation, et ce, tout au long de la saison de croissance.

Actuellement, et tant que des graines produites par les plus récentes sélections du programme d'amélioration génétique ne seront pas disponibles en quantité suffisante, l'allocation des lots de semences de MEH pour la production de pieds-mères est effectuée en prenant comme critère la meilleure germination, sans égard à l'âge des lots. Pour la réalisation de cet essai, les lots ont été choisis afin de vérifier l'hétérogénéité des gabarits des plants. Ceci permettra d'en tenir compte lors des prochaines allocations. Ainsi, à l'avenir, s'il est connu qu'un lot comporte une proportion de 30 % de plants chétifs, l'allocation de graines sera augmentée de manière à ne pas nuire à l'objectif de production de pieds-mères.



**Figure 1.** Occurrence de plants chétifs au sein de la population opérationnelle de futurs pieds-mères de MEH cultivés en récipients à la pépinière de Saint-Modeste en 2009-2010. Plants cultivés en serre dans le récipient P15 (récipient de 15 cavités de 700 cm<sup>3</sup>/cavité; a et c) ou M6 (récipient de 6 cavités de 1300 cm<sup>3</sup>/cavité, b), puis transférés à l'extérieur à l'automne (d et e : plants cultivés dans le récipient M6 peu avant la chute des aiguilles).

Actuellement, il est impossible de déterminer la cause exacte de l'importante proportion de plants chétifs. Deux hypothèses pourraient expliquer la présence de cette variabilité prononcée de l'architecture de la partie aérienne des pieds-mères de MEH :

1- Les régies de culture, notamment la fertilisation et l'irrigation, pourraient être les causes principales. Ces régies pourraient augmenter de façon significative la proportion de plants chétifs, ainsi que la variabilité de croissance des parties aériennes. En effet, les mélèzes sont exigeants en eau (GOWER *et al.* 1995) et l'utilisent moins efficacement que les autres conifères à feuillage persistant (KLOEPEL *et al.* 1998). Ils ont cependant une très haute efficacité d'utilisation de l'azote (GOWER *et al.* 1995; KLOEPEL *et al.* 1998). De plus, LAMHAMEDI *et al.* (2006) ont montré chez des plants d'épinette blanche (*Picea glauca* Moench Voss) en pépinière que la croissance des parties aériennes est fortement reliée aux variations spatiales des teneurs en eau du substrat.

2- D'autres travaux ont montré que l'architecture des parties aériennes est fortement reliée au génotype des semences, c'est-à-dire leur origine génétique (LAMHAMEDI *et al.* 2000a). Chez les mélèzes, au jeune âge, l'effet génétique sur la croissance est exclusivement maternel (PAQUES 2004). Ainsi, au stade de la pépinière, l'hétérogénéité et la variabilité observées en matière d'architecture de la partie aérienne des plants du MEH pourraient être reliées au lot de semences, soit l'origine génétique des semences.

L'objectif général de ce mémoire consiste à évaluer l'effet de deux régies d'irrigation, combiné à celui d'un contrôle rigoureux de la fertilisation et de la fertilité du substrat, sur l'architecture des parties aériennes, la croissance et la nutrition minérale des plants de MEH issus de différents lots de semences, donc de combinaisons génétiques différentes.

# Chapitre premier

## Matériel et méthodes

### 1.1 Lots de semences

En janvier 2011, la pépinière de Saint-Modeste (47° 50' 10" N., 69° 23' 10" O., Québec, Canada) a reçu 11 lots de semences de MEH sélectionnés à partir de la banque de semences du CSFB (46° 03' 36" N, 73° 12' 00" O., Québec, Canada) en fonction de leur future allocation pour la production de pieds-mères de MEH pour le bouturage. Ces lots correspondaient à des mélanges de différents croisements ayant les mêmes essences mère et père (MEE x MEJ ou MEJ x MEE), qui ont été produits, à différentes années, par pollinisation de masse dans un verger à graines sous abri (COLAS *et al.* 2008). Ces lots ont été mis en germination en milieu artificiel afin de déterminer s'il était possible de détecter, dès la germination, les plants chétifs au sein des populations, et ainsi, de mieux sélectionner les lots qui seraient utilisés pour la production opérationnelle de pieds-mères en 2011 et les années subséquentes.

Les graines des lots ont été stratifiées au CSFB durant 21 jours (ISTA 2009) avant leur expédition. Parmi les 11 lots mis en germination à la pépinière de Saint-Modeste, 6 ont été sélectionnés pour les besoins de l'essai (Tableau 1). Les critères de sélection des lots sont la présence de plants plus petits

détectés dès la fin du stade de germination des semences au CSFB, le pourcentage de germination et la vitesse de germination (ou valeur germinative [CZABATOR 1962]).

### 1.2 Production de plants

#### 1.2.1 Ensemencement et repiquage

L'ensemencement a eu lieu le 5 janvier 2011 à la pépinière de Saint-Modeste. Les semences stratifiées ont été déposées individuellement dans des pastilles Jiffy<sup>MD</sup> de 28 mm de diamètre (masse sèche de  $6,1 \pm 0,04$  g<sup>6</sup>, n = 30) préalablement saturées d'eau (masse saturée de  $42,5 \pm 0,02$  g, n = 30), à raison de 330 pastilles Jiffy<sup>MD</sup> par plateau. La concentration en éléments minéraux des pastilles était de  $40 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  d'azote (N),  $28 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  de phosphore (P) et  $165 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  de potassium (K) (n = 36). Les plateaux de germination ont été placés dans une serre de la pépinière dont la température était fixée à 21 °C le jour (un système de ventilation fonctionne à partir de 23 °C) et 19 °C la nuit. Un système d'éclairage composé de lampes à sodium haute pression PL Light System (LR66456, puissance de 400 W,

<sup>6</sup> Dans tout le document, les valeurs présentées sont les valeurs moyennes  $\pm$  erreur type.

**Tableau 1.** Informations sur les 6 lots de graines de MEH sélectionnés pour la réalisation de l'essai. Le nombre de semences par kg, le pourcentage de graines pleines selon le test aux rayons X, les données sur la germination et la proportion de plants chétifs détectés lors du test de germination en germe ont été déterminés après l'extraction des lots au Centre de semences forestières de Berthier.

Lot	Code du lot	Année de production	Milliers de semences par kg	Pourcentage de graines pleines (%) <sup>*</sup>	Pourcentage de germination (%) <sup>†</sup>	Valeur germinative <sup>‡</sup>	Proportion de plants chétifs (%) <sup>§</sup>
1	2001-123-1-1	2001	214,7	100	76	21	3,0
2	2004-127-1-1	2004	252,5	83	94	32	0,5
3	2004-128-1-1	2004	259,1	85	77	28	1,0
4	2005-124-1-1	2005	270,2	84	82	30	2,0
5 <sup>§</sup>	2006-180-1-1	2006	246,0	nd	69	8	1,0
6	2009-139-1-1	2009	213,0	89	72	24	0,5

<sup>\*</sup> Pourcentage de graines pleines selon le test aux rayons X.

<sup>†</sup> Pourcentage de germination et valeur germinative du lot stratifié. La valeur germinative est le produit du nombre moyen de semis germés par jour durant le test par le nombre maximum de semis germés par jour.

<sup>‡</sup> Proportion de plants chétifs détectés lors du test de germination en germe.

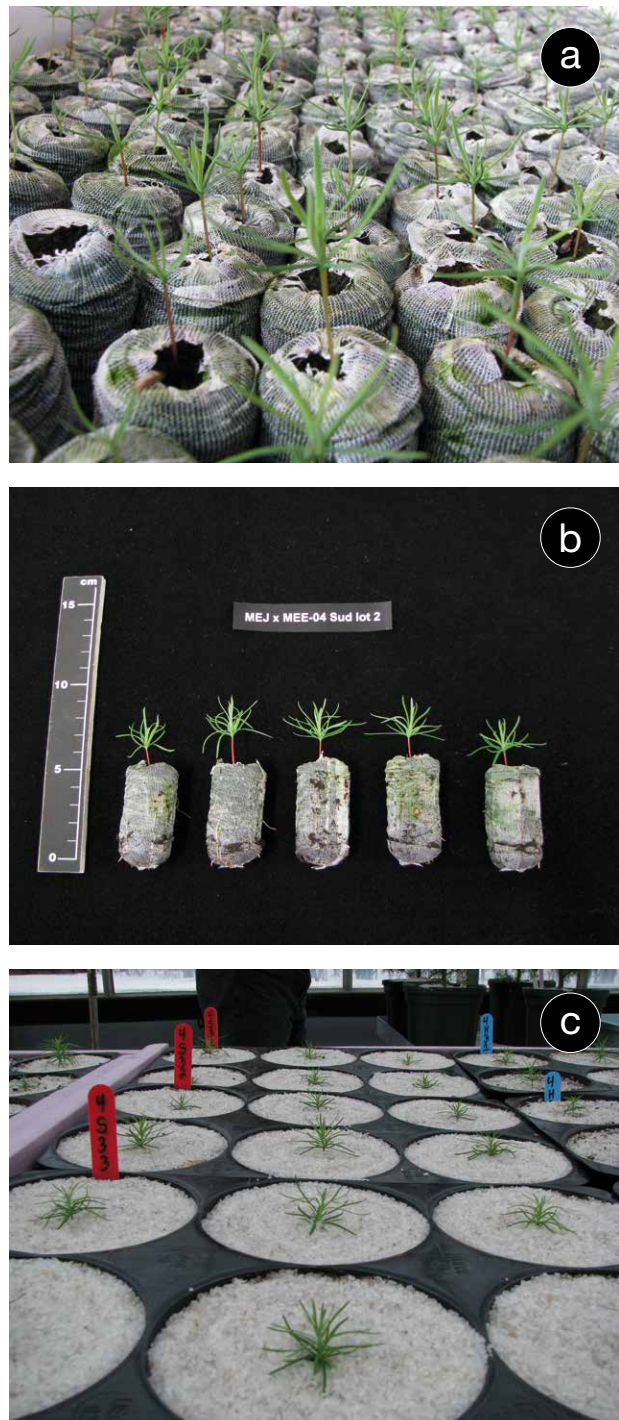
<sup>§</sup> Le lot 5 est celui qui a été utilisé lors des ensemencements opérationnels 2009 et 2010 pour lequel une proportion croissante de plants chétifs (20-25 % à 30-35 %) a été observée à l'échelle opérationnelle.

intensité d'environ 8 000 lux) fonctionnait 20 heures par jour (de 3 h à 23 h), et l'humidité relative minimale était de 50 %. Pour limiter la dessiccation des pastilles Jiffy<sup>MD</sup>, les semis étaient irrigués par brumisation à l'aide d'un robot, toutes les heures pendant les 3 à 4 semaines de la période de germination.

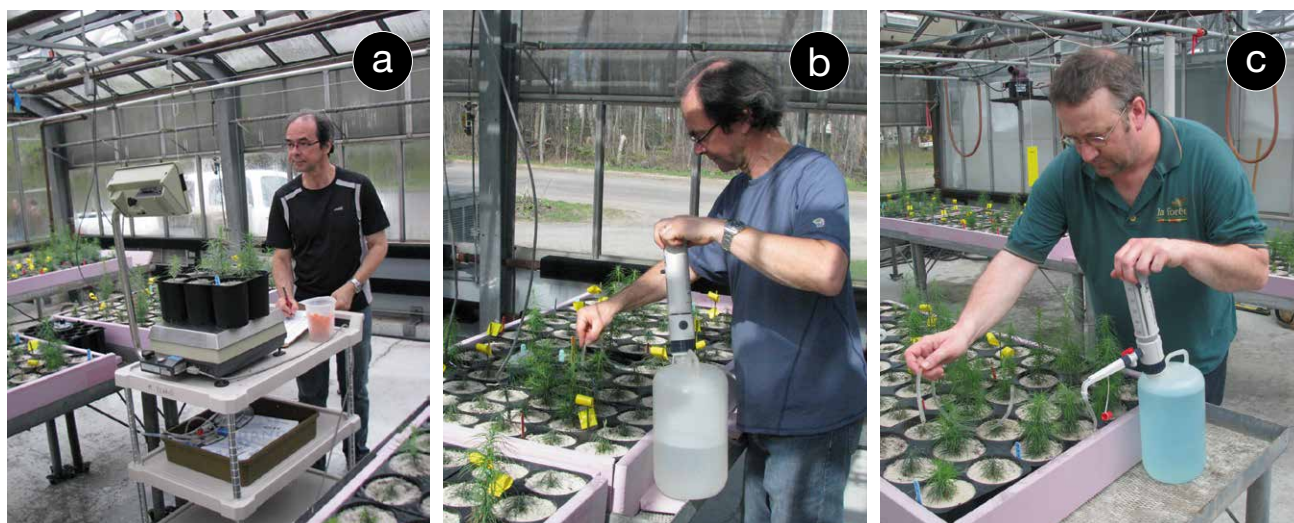
Neuf semaines après l'ensemencement, 108 plants par lot (Figure 2a, b) ont été sélectionnés puis repiqués dans des récipients M6 à parois pleines (modèle HIKO v-1300, BCC, Suède; 6 cavités, 1 300 cm<sup>3</sup>/cavité, densité de 71,5 plants·m<sup>-2</sup>), ce qui correspond à 18 récipients par lot de semences. Le repiquage dans les récipients a été effectué, le 8 mars 2011, dans les serres du Complexe scientifique à Québec où s'est déroulée la suite de la culture. Le substrat utilisé, fourni par la pépinière de Saint-Modeste, était un mélange de tourbe (72 %), vermiculite (20 %) et compost (8 %). La fertilité initiale du substrat était de 290 mg·kg<sup>-1</sup> de N, 592 mg·kg<sup>-1</sup> de P et 2 052 mg·kg<sup>-1</sup> de K. Les récipients ont été empotés par la pépinière en utilisant la chaîne d'empotage opérationnelle. La densité du substrat était de 0,11 g·cm<sup>-3</sup>. Dans chaque cavité du récipient M6, un espace a été fait manuellement avec l'index pour recevoir la pastille Jiffy<sup>MD</sup> colonisée par les racines du jeune plant. Après l'insertion de la pastille Jiffy<sup>MD</sup> dans la cavité, le substrat était compacté légèrement avec les mains, afin d'assurer un excellent contact entre le substrat et les racines. Ceci permet d'éviter la formation de poches d'air autour des racines, facilite l'absorption de l'eau et des éléments minéraux et limite les effets de stress liés à une diminution du potentiel hydrique à l'interface substrat-racines (LAMHAMEDI *et al.* 1992). Au moment du repiquage, les plants de chacun des lots avaient une taille uniforme. La masse moyenne des plants était de 30,1 mg pour les parties aériennes et 9 mg pour les racines. Le contenu minéral en N, P et K était respectivement de 0,8, 0,2 et 0,4 mg pour les parties aériennes et de 0,2, 0,1 et 0,1 mg pour les racines. Le substrat a été recouvert d'une couche de silice d'environ 5 mm ajoutée manuellement, ce qui correspond à une masse de 780 g par récipient (Figure 2c). Cette méthode est la même que celle utilisée à la pépinière de Saint-Modeste.

### 1.2.2 Dispositif expérimental, contrôle des deux régies d'irrigation et de la fertilisation

Les plants issus des différents lots de semences de MEH ont été soumis à deux régies d'irrigation différentes (régie humide : teneur en eau du substrat de 40-45 % v/v et régie sèche : 25-30 % v/v), tout au long de la saison de croissance, dans une serre du Complexe scientifique (Québec). Les teneurs en eau cibles des deux régies d'irrigation ont été déterminées de façon à n'entraîner ni une mortalité



**Figure 2.** Germination et repiquage des jeunes semis de MEH. a) Les graines stratifiées sont mises à germer en serre dans des pastilles Jiffy<sup>MD</sup> à base de substrat tourbeux. b) Semis obtenus après la germination des graines. La pastille Jiffy<sup>MD</sup> hydratée a une hauteur de 5 cm. Remarquez la croissance des racines à l'interface substrat-filet. c) Plants produits en pastilles Jiffy<sup>MD</sup> après leur repiquage en récipient M6 (6 cavités de 1 300 cm<sup>3</sup>/cavité). Remarquez l'uniformité de la hauteur et de l'architecture des parties aériennes des plants de MEH au début de l'expérience.



**Figure 3.** Contrôle précis de l'irrigation et de la fertilisation des récipients pendant l'expérience. a) Pesée de tous les récipients de l'essai, deux à trois fois par semaine, afin d'ajuster la teneur en eau par la méthode gravimétrique. b) Irrigation à l'aide d'une macropipette de précision, cavité par cavité, pour maintenir la teneur en eau (% v/v) des deux régies ciblées. c) Fertilisation de chaque plant du dispositif expérimental à l'aide d'une macropipette de précision.

des plants, ni le lessivage des éléments minéraux. Initialement, la valeur de teneur en eau ciblée pour la régie humide était de 45-50 % v/v; elle a été ramenée à 40-45 % puisque le substrat à saturation avait une teneur en eau de 52 %, soit presque la valeur cible de teneur en eau. Une cible aussi élevée n'aurait pas été compatible avec une bonne croissance des plants, notamment en raison de la faible aération du substrat. Également, les arrosages et les fertilisations auraient alors induit du lessivage des éléments minéraux et réduit le contrôle des conditions de culture des plants. La même fertilité du substrat a été maintenue pour les deux régies d'irrigation.

Les récipients des 6 lots et des 2 régies d'irrigation ont été répartis dans un dispositif à parcelles partagées (*split-plot*) comportant 3 blocs aléatoires complets. En parcelles principales, on retrouve les lots de semences, lesquels ont été répartis au hasard à l'intérieur de chaque bloc. À l'intérieur de chaque parcelle principale, les 2 régies d'irrigation ont été attribuées aléatoirement à l'une des 2 sous-parcelles, correspondant à l'unité expérimentale. Ainsi, chaque unité expérimentale était constituée de 3 récipients / lot de semences / régie d'irrigation / bloc, c'est-à-dire 18 plants (Annexe 1).

Du Styrofoam<sup>MD</sup> de 2,5 cm d'épaisseur a été placé en bordure des récipients autour de chaque bloc pour limiter l'effet de l'augmentation excessive de la température du substrat causée par l'ensoleillement, et les effets négatifs de celle-ci sur la croissance des racines des cavités de bordure (voir figure 3).

Une permutation circulaire des tables, dans chacun des blocs à l'intérieur de la serre, a été réalisée toutes les deux semaines, avec pour objectif d'éviter des effets très localisés ou des gradients, même faibles, de certaines variables environnementales : température, exposition, ensoleillement, humidité relative, etc.

#### 1.2.2.1 Contrôle de l'irrigation

L'irrigation a été ajustée par gravimétrie selon la méthode décrite par LAMHAMEDI *et al.* (2009). Ainsi, les teneurs en eau ciblées ( $E$ , en % v/v) ont été déterminées selon l'équation 1 :

$$E = \frac{[MT - (M + S + SU)]}{V} \times 100 \quad [1]$$

où

$MT$  est la masse totale du récipient lors de la mesure (g),

$M$  est la masse du récipient vide (g),

$S$  est la masse de la silice à la surface des 6 cavités de chaque récipient (g),

$SU$  est la masse sèche du substrat (substrat + 6 pastilles Jiffy<sup>MD</sup> par récipient) (g),

$V$  est le volume total des cavités de chaque récipient (cm<sup>3</sup>), soit 7 800 cm<sup>3</sup>.

Les valeurs de  $M$ ,  $S$  et  $SU$  ont été déterminées en calculant la moyenne des données mesurées avec 5 récipients M6. La masse initiale des plants était négligeable et n'a donc pas été considérée dans le calcul. Dans cette expérience, la masse totale visée pour chaque récipient afin de maintenir la teneur en eau désirée était de 5600 g pour la régie humide (H, 45 % v/v) et de 4500 g pour la régie sèche (S, 30 % v/v).

Durant les 90 jours de la saison de croissance, tous les récipients de l'expérience ont été pesés à 35 reprises, soit tous les 2 ou 3 jours, avec une balance électronique d'une capacité de  $20 \text{ kg} \pm 0,1 \text{ g}$  (Figure 3a). Avec le résultat de la pesée, le volume d'eau à ajouter a été calculé par récipient pour chacune des 2 régies, de manière à maintenir les teneurs en eau cibles. Un volume d'eau moyen à ajouter par récipient a été calculé en fonction de la masse de tous les récipients des trois blocs de chaque régie. Ce volume moyen a été ensuite divisé par 6 pour déterminer le volume à ajouter dans chacune des cavités des récipients (Annexe 2).

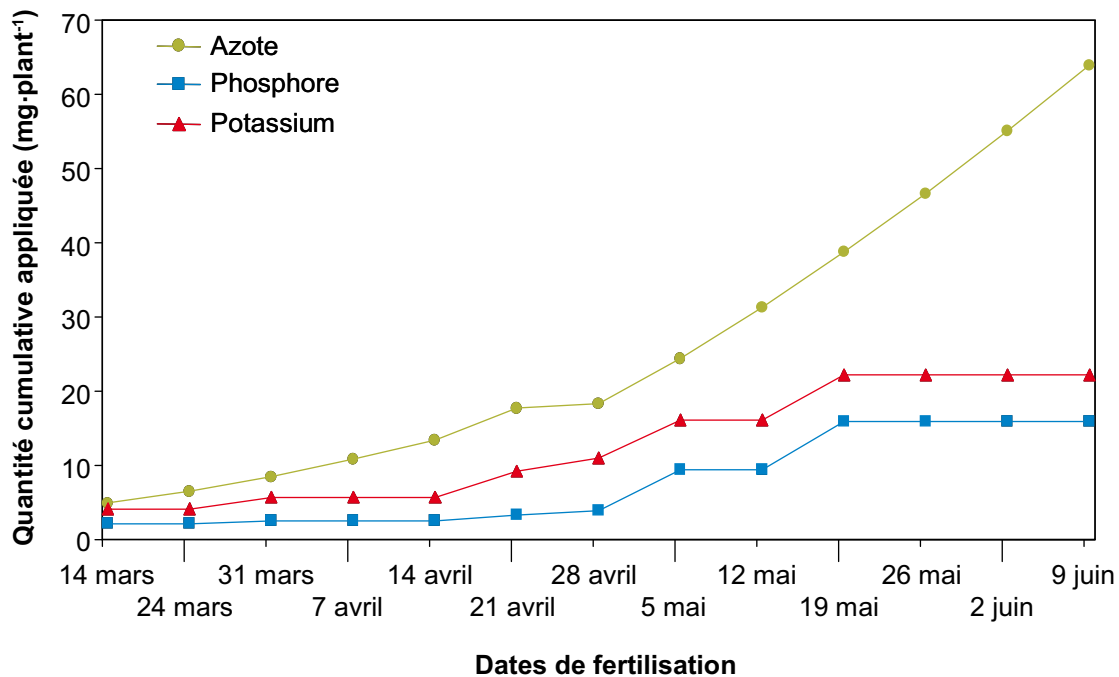
L'irrigation a ensuite été faite à l'aide d'une macropipette automatique de précision (Dispensette III [10-100 ± 0,5 ml], Brand, Wertheim, Allemagne), cavité par cavité (Figure 3b). Pendant toute la durée de l'expérience et quelle que soit la date d'arrosage, aucun lessivage n'a été observé.

### 1.2.2 Contrôle de la fertilisation

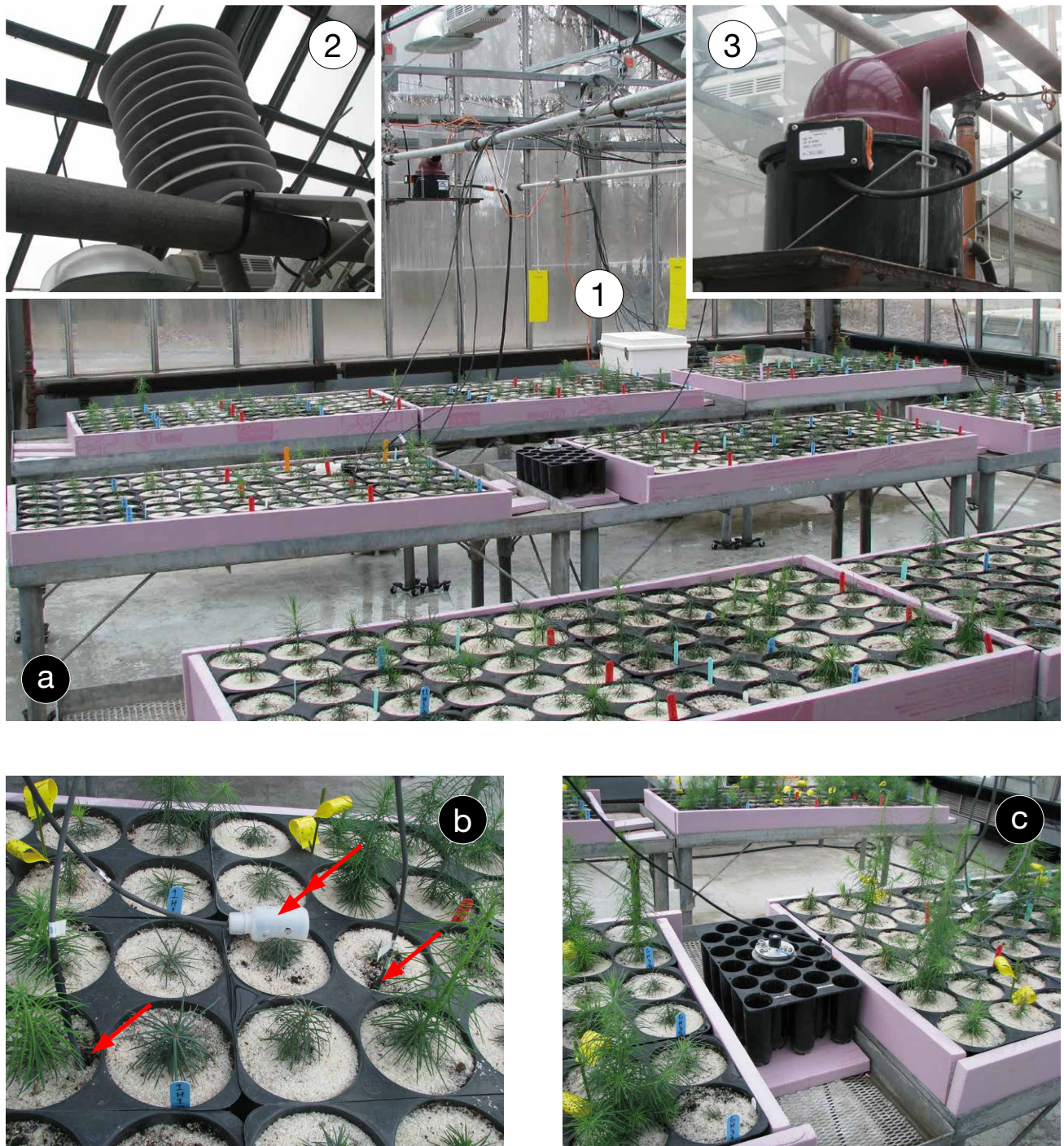
Les plants ont été fertilisés une fois par semaine durant la saison de croissance, en général une journée différente de celle dédiée à l'ajustement de l'irrigation. La solution fertilisante a été appliquée à chaque plant à l'aide d'une macropipette automatique de précision (Figure 3c). Les apports en éléments minéraux (quantités de N, P, K, Ca et Mg, oligo-éléments, type de fertilisant et volume de solution fertilisante à appliquer) ont été ajustés en utilisant le logiciel *Plantec* dédié à la gestion de la fertilisation en pépinière forestière (GIRARD *et al.* 2001). Le calendrier de fertilisation était le même que celui en vigueur à la pépinière de Saint-Modeste (Annexe 3). Les quantités ajoutées des principaux éléments sont présentées à la figure 4. Au total, 63,9 mg de N (ammonium, nitrate), 15,9 mg de P et 22,3 mg de K ont été reçus par plant. Les plants ont également reçu des éléments secondaires et des microéléments.

### 1.2.3 Évaluation des variables environnementales en serre

Les conditions environnementales prévalant dans la serre ainsi qu'au niveau des plants ont été enregistrées de façon continue à partir du 15 avril 2011, à l'aide de différentes sondes connectées à un consigneur de données (modèle CR1000, Campbell Scientific, Edmonton, Alberta, Canada, figure 5a1). Dix sondes ont été utilisées



**Figure 4.** Quantités cumulatives des principaux éléments minéraux (azote, phosphore et potassium) ajoutées au substrat de croissance des plants de MEH. Pour les deux régies d'irrigation, humide et sèche, la quantité d'éléments a été délivrée de façon précise à l'aide d'une macropipette.



**Figure 5.** Mesurage continu des variables environnementales prévalant dans la serre durant la saison de croissance. a) 1- Consignateur de données CR1000 (Campbell Scientific, Edmonton, Alberta, Canada); 2- Sonde pour la mesure de la température de l'air et de l'humidité relative dans la serre (HMP 45C); 3- Humidificateur (Herrmidifier 707). b) Sondes pour mesurer la température du substrat (flèche) et à la surface de la silice (double flèche) (modèle 107B). c) Sonde de mesure de l'intensité lumineuse reçue par les plants (Quantum LI-190SB).

pour enregistrer différentes variables environnementales, notamment la température (°C) et l'humidité relative de l'air à 2 m du sol (modèle HMP 45C, Campbell Scientific, figure 5a2), la température du substrat (deux sondes par régie d'irrigation) et à la surface de la silice (une sonde par régie d'irrigation [modèle 107B, Campbell Scientific], figure 5b), ainsi que l'intensité lumineuse à la hauteur des plants (modèle LI-190SB Quantum, LI-COR, Lincoln, NE, États-Unis, figure 5c).

Un mois après le début de l'essai, 2 humidificateurs (Herrmidifier 707, Sandford, NC, États-Unis) ont été installés dans la serre pour faciliter le maintien de l'humidité relative autour de 60 % (Figure 5a3). En même temps, un arrosage complémentaire par les rampes de brumisation a été programmé pour s'effectuer midi et soir.

#### 1.2.4 Évaluation de la croissance et de la nutrition minérale des plants

À partir du 31 mars 2011, soit 3 semaines après le repiquage et 12 semaines après l'ensemencement, la hauteur de tous les plants a été mesurée à intervalles de 2 semaines, pour un total de 6 dates d'échantillonnage : 31 mars, 14 et 28 avril, 12 et 27 mai, et 15 juin 2011. Le diamètre des plants a été mesuré lors de l'échantillonnage final. Le nombre de branches latérales de plus de 1 cm, la présence du bourgeon terminal et l'éventuel débourement de ce bourgeon ont été également évalués. Les plants chétifs étaient caractérisés par l'architecture buissonnante de leur partie aérienne (forme de coussinet), leur croissance en hauteur très réduite et l'absence d'une tige principale (dominance apicale).

À la dernière date d'échantillonnage, soit le 15 juin, les masses des parties aériennes et des racines de chacun des plants ont été déterminées séparément après un séchage de 48 heures dans une étuve réglée à 60 °C.

Cependant, pour limiter le nombre d'analyses minérales et afin de tenir compte des différentes dimensions de plants, pour chacune des combinaisons de lot/régie/bloc, les 18 plants de chaque unité expérimentale ont été séparés en 2 classes de hauteur ( $H$ , cm); classe 1 : hauteur  $\leq H/2$  et classe 2 : hauteur  $> H/2$ , où  $H$  est la moyenne, en cm, de la hauteur des plants les plus hauts parmi les 6 lots de chacune des régies et dans chaque bloc. Le nombre de plants utilisés pour calculer  $H$  varie d'une unité expérimentale à l'autre. Ainsi, chaque unité expérimentale a fourni 2 sous-échantillons composites (petits et grands plants) contenant un nombre variable de plants. À noter que, pour une

unité expérimentale donnée, une seule classe a pu être utilisée lorsque les plants étaient tous de petit ou de grand gabarit.

À partir de ces échantillons composites, les concentrations des éléments minéraux (N, P, K, Ca et Mg) des parties aériennes et des racines ont été déterminées. Ainsi, pour chaque unité expérimentale et selon la classe de hauteur (1 et 2), 2 analyses minérales ont permis de déterminer les concentrations et les contenus en minéraux des parties aériennes et des racines des plants. Au sein de chaque bloc (3), les substrats des récipients de tous les lots de plants ont été regroupés par régie (2) et classe de hauteur (2) pour constituer 12 échantillons composites, afin de déterminer la conductivité électrique et la fertilité du substrat.

Les analyses minérales des plants et du substrat ont été réalisées par le laboratoire de chimie organique et inorganique (ISO / CEI 17025) du Service du soutien scientifique de la Direction de la recherche forestière. Les procédures d'analyse sont décrites par LAMHAMED *et al.* (2003), à l'exception de la détermination de la quantité d'azote dans les tissus décrite par GAGNON (2011). L'efficacité d'utilisation des éléments minéraux majeurs, notamment l'azote, le phosphore et le potassium, a été ensuite calculée comme le rapport entre la masse sèche totale d'un plant et le contenu du plant entier en cet élément (ÅGREN 1985). L'équation 2 présente l'exemple de l'efficacité d'utilisation de l'azote ( $NUE$ ) :

$$NUE = \frac{\text{Masse sèche totale}}{\text{Contenu en azote du plant entier}} \quad [2]$$

### 1.3 Analyses statistiques

Afin de déterminer les effets des régies d'irrigation et des lots de semences sur les variables mesurées, des analyses de la variance ont été effectuées sur chacune d'elles à l'aide de modèles linéaires mixtes généralisés, lesquels permettent d'analyser des données provenant de distributions autres que la distribution normale, ce qui était nécessaire dans cette étude. Ces modèles permettent, par des techniques de régression, d'analyser la relation de causalité entre une variable réponse suivant une distribution de la famille exponentielle, et des variables explicatives. Ils tiennent aussi compte des effets aléatoires. Les lots de graines, les régies d'irrigation et les dates ont été considérés comme des facteurs à effets fixes dans les modèles tandis que les blocs, les récipients, les plants et leurs interactions ont été considérés comme des facteurs à effets aléatoires.

La procédure GLIMMIX de SAS (version 9.2, SAS INSTITUTE INC. 2009) a été utilisée pour modéliser les différentes variables, en spécifiant la distribution et la fonction de lien appropriée (LITTELL *et al.* 2002) : 1) distribution normale et fonction de lien identité pour la hauteur, les masses et les variables de nutrition minérale; 2) distribution de Poisson et fonction de lien logarithmique pour le nombre de branches latérales de plus de 1 cm, et 3) distribution binomiale et fonction de lien logit pour la proportion de plants ayant un bourgeon terminal fermé.

Une analyse à mesures répétées a été utilisée en considérant les mesures de toutes les dates de mesurage, pour toutes les variables de croissance (hauteur, nombre de branches latérales, présence du bourgeon terminal), sauf le diamètre et les analyses des masses sèches et des variables de nutrition minérale, pour lesquelles les données ont été prélevées à une seule date. La structure autorégressive d'ordre un [*first-order autoregressive, ar(1)*] a été retenue comme matrice de variances-covariances afin de tenir compte de la dépendance entre les mesures prises sur un même plant dans le temps. Pour ce qui est des masses et des variables de nutrition minérale, des analyses univariées ont été effectuées sur les mesures prises à la fin de l'expérience (15 juin 2011).

Les tests sur les effets fixes ont été faits avec un seuil théorique de 5 %. Lorsqu'un effet fixe était significatif, des comparaisons multiples entre les moyennes ont été effectuées, afin de déterminer où se situaient les différences, à l'aide d'une approche par simulations (WESTFALL 1999).

Dans le cas de la hauteur, des masses et des variables de nutrition minérale, l'hypothèse de la normalité a été vérifiée à l'aide de la statistique de Shapiro-Wilk et de graphiques, tandis que l'homogénéité des variances a été vérifiée graphiquement. En ce qui concerne les analyses de la variance pour la hauteur et les masses sèches, une transformation logarithmique de la variable a été utilisée pour normaliser les résidus et stabiliser leur variance. Cette transformation biaise un peu les estimations des moyennes lors du retour à l'échelle originale. Le biais peut être corrigé en prenant  $\exp(\bar{y} + \sigma^2/2)$  comme transformation inverse pour obtenir la moyenne sous l'échelle originale (correction =  $\sigma^2/2$ , CALAMA et MONTERO [2005]). Dans le cas des concentrations et de l'efficacité d'utilisation, si l'homogénéité des variances laissait à désirer, une analyse pondérée par l'inverse de la variance selon la classe de hauteur a été faite.



# Chapitre deux

## Résultats

### 2.1 Conditions de croissance des plants et variables environnementales en serre

L'enregistrement continu des différentes variables environnementales dans la serre a débuté le 15 avril 2011 (Figure 6).

La température moyenne de l'air de la serre s'est maintenue entre 20 °C et 25 °C tout au long de la saison de croissance (Figure 6a). Malgré le fonctionnement des unités de climatisation dans les serres, des pics de chaleur ont été observés à plusieurs reprises, conséquence des journées ensoleillées du printemps (Figure 6b), particulièrement durant la deuxième moitié du mois d'avril. L'humidité relative de l'air a été en constante augmentation durant la saison de croissance (Figure 6a) notamment en raison de l'ajout d'humidificateurs pour limiter le dessèchement et favoriser le maintien des teneurs en eau des substrats.

L'enregistrement continu des températures dans le substrat ne montre pas de différences entre les régies d'irrigation humide et sèche (Figure 6c). La température moyenne au niveau des plants a suivi la même tendance que celle observée dans la serre, mais était, la plupart du temps, supérieure à celle-ci.

L'intensité de lumière reçue par les plants était variable selon les journées (Figure 6d). Environ 40 % du temps, la lumière reçue par les plants était supérieure à  $600 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ . Dans la serre, cependant, en raison de la présence des rampes d'irrigation, des lampes d'éclairage d'appoint et d'autre matériel installé en hauteur, de l'ombre était projetée sur la sonde de mesure LI-COR, ce qui a réduit artificiellement la mesure de lumière effectivement reçue par la sonde.

### 2.2 Teneurs en eau du substrat et quantités d'eau utilisées

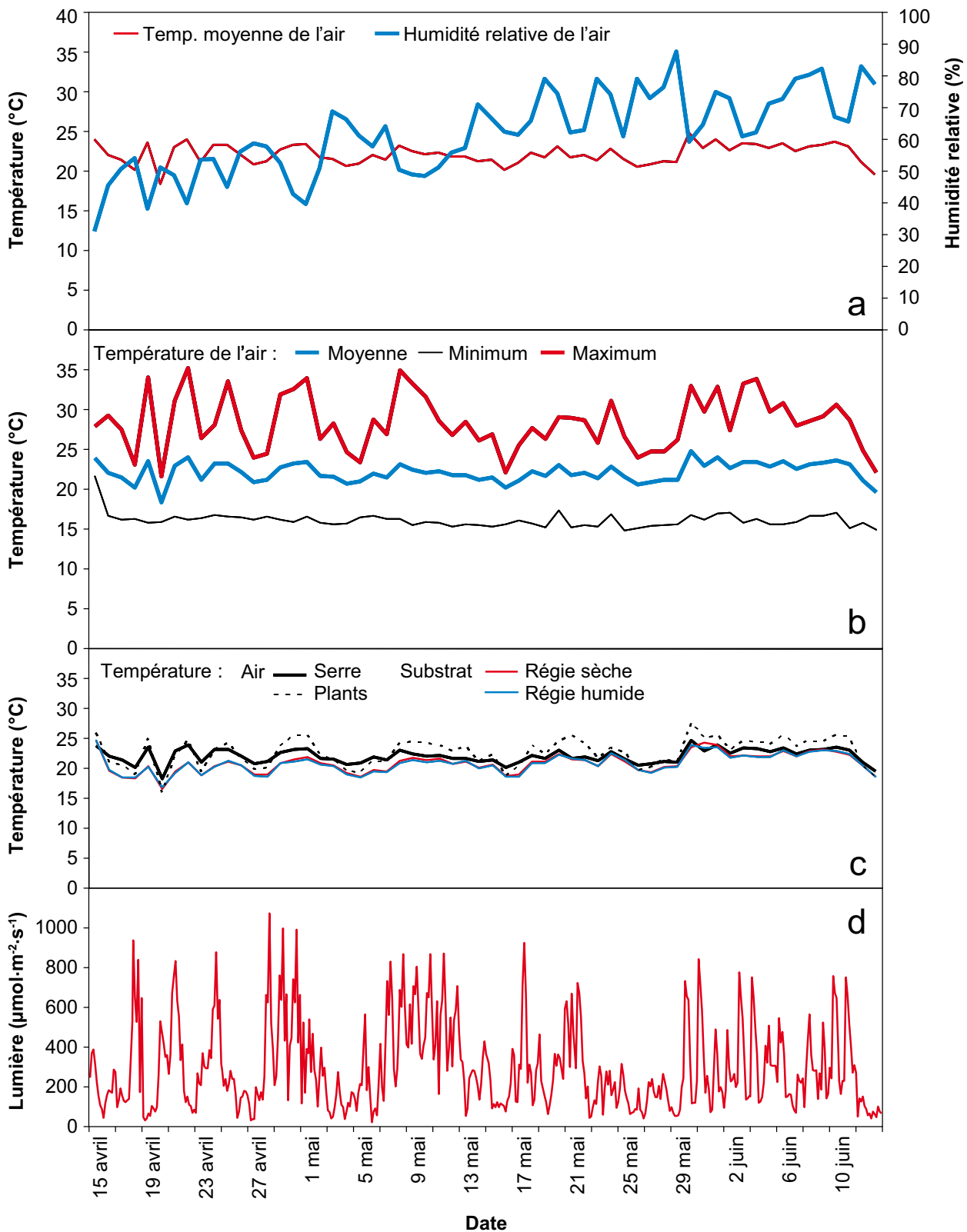
L'évolution des teneurs en eau dans le substrat pour les deux régies d'irrigation est présentée à la figure 7a.

Après chaque pesée, la teneur en eau des récipients a été ajustée pour atteindre les valeurs cibles. Durant la saison de croissance, la teneur en eau (% v/v) est restée relativement stable autour

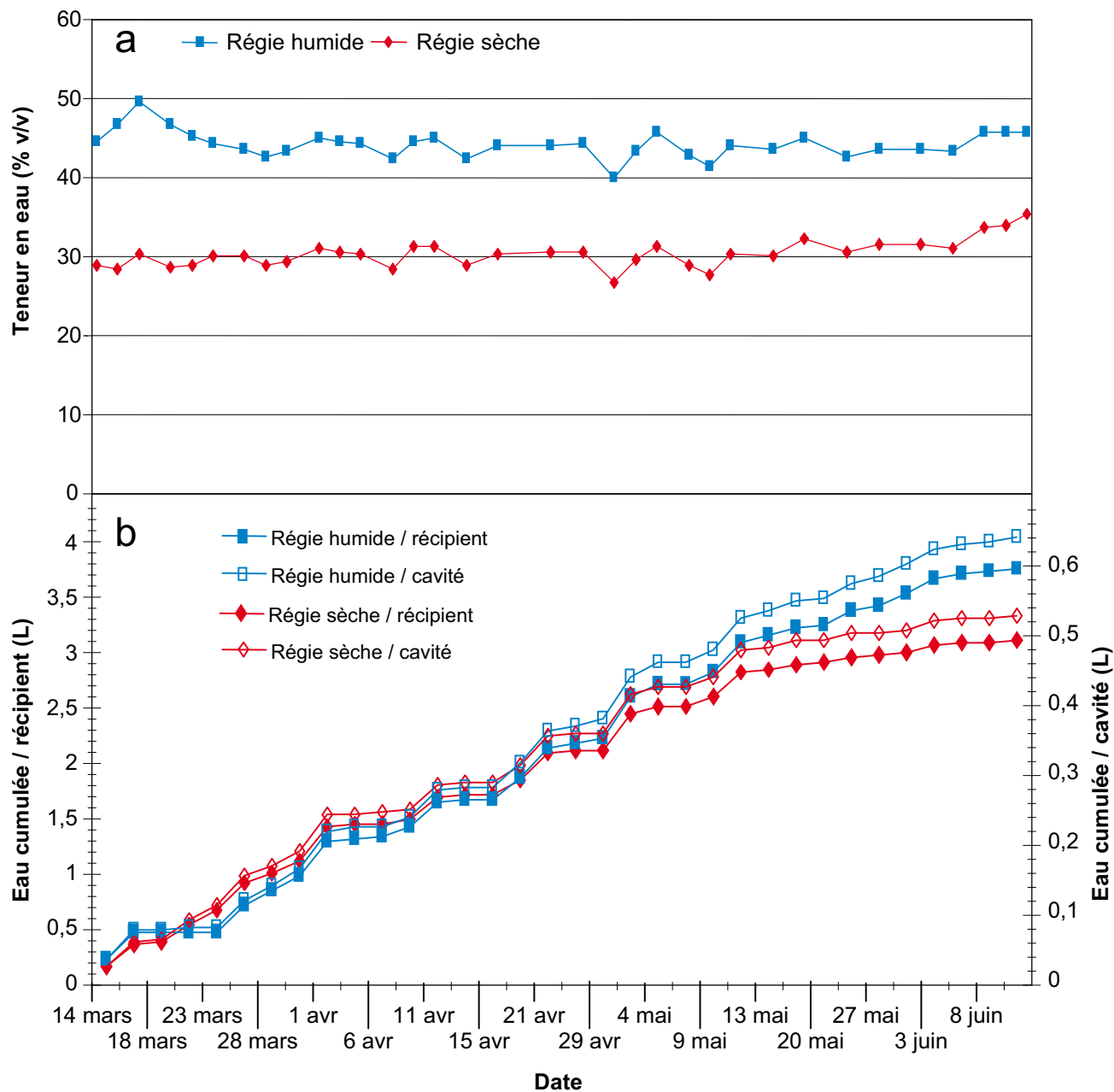
des valeurs cibles. Le 2 mai, on observe une baisse importante de la valeur de teneur en eau pour les deux régies, soit un écart de 9 % pour la régie humide et de 13 % pour la régie sèche. Cette date correspond à un pic de chaleur ( $T^{\circ}\text{moy.} = 23,4 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $T^{\circ}\text{min.} = 15,8 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $T^{\circ}\text{max.} = 34 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ) enregistré dans la serre, le jour précédant l'irrigation (voir figure 6b). Un autre pic de chaleur similaire a été enregistré le 8 mai ( $T^{\circ}\text{moy.} = 23,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $T^{\circ}\text{min.} = 16,3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $T^{\circ}\text{max.} = 35 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ), mais celui-ci ne s'est pas traduit par une chute de teneur en eau. En effet, les plants avaient été irrigués le même jour, ce qui a pu atténuer les effets de la chaleur sur la teneur en eau pour les jours suivants.

Pour la régie humide, la quantité totale moyenne d'eau reçue par récipient était de 3,8 L, soit 0,63 L par cavité (Figure 7b). Pour la régie sèche, la quantité totale moyenne d'eau reçue par récipient était de 3,2 L, soit 0,53 L par cavité. Tous récipients confondus (54 par régie), cela correspond à un ajout de 207 L d'eau pour la régie humide et de 170 L pour la régie sèche. Au cours du temps, la quantité d'eau ajoutée a varié de 0 à 6,6 L par récipient pour la régie humide, et de 0 à 5,8 L par récipient pour la régie sèche. La quantité moyenne d'eau ajoutée par récipient chaque jour d'irrigation était de  $2,0 \pm 0,33 \text{ L}$  pour la régie humide, et de  $1,7 \pm 0,30 \text{ L}$  pour la régie sèche. Par exemple, lors de l'irrigation suivant le pic de chaleur du 8 mai, la quantité moyenne d'eau ajoutée a été de 6,6 L d'eau pour chacun des récipients de la régie humide, et de 5,8 L pour chacun des récipients de la régie sèche.

En plus des volumes d'eau ajoutés pour l'irrigation des plants, il faut comptabiliser les volumes des solutions fertilisantes. En effet, à partir du 17 mars 2011, les plants ont été fertilisés une fois par semaine à l'aide de solutions de composition variable (Annexe 3). Dans tous les cas, chaque cavité, quelle que soit la régie, a reçu 10 mL de solution fertilisante. Pour éviter le lessivage des éléments minéraux, les jours de fertilisation n'étaient pas les mêmes que les jours d'irrigation. D'ailleurs, durant la totalité de la saison de croissance, aucun lessivage n'a été constaté, et ce, pour tous les récipients des deux régies.



**Figure 6.** Évolution des conditions environnementales quotidiennes prévalant dans la serre du 15 avril au 15 juin 2011. a) Température moyenne de l'air (°C) et humidité relative moyenne de l'air (%). b) Température de l'air moyenne, minimale et maximale (°C). c) Température moyenne de l'air dans la serre, au niveau des plants, et température du substrat, pour les deux régies d'irrigation (humide et sèche). d) Intensité de lumière ( $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ) reçue par les plants entre 9 h et 16 h.



**Figure 7.** Suivi de la teneur en eau et de l'irrigation des récipients durant la saison de croissance (du 14 mars au 15 juin 2011). a) Évolution de la teneur en eau du substrat (% v/v) pour les deux régies d'irrigation (humide : teneur en eau cible de 40-45 % v/v; sèche : 25-30 % v/v). b) Cumul des quantités d'eau ajoutées, en litres, pour chacune des régies humide et sèche, par récipient et par plant.

## 2.3 Croissance et architecture des plants de mélèze hybride issus des différents lots de semences

### 2.3.1 Croissance des plants selon la régie d'irrigation

#### 2.3.1.1 Croissance en hauteur

Lors du repiquage, au sein de chacun des lots, les plants avaient été sélectionnés et avaient une hauteur homogène ( $2,9 \pm 0,16$  cm). Il n'y avait aucune hétérogénéité apparente en matière de croissance et d'architecture pour les parties aériennes de tous les plants dans chacun des lots de semences. Les plants du lot 2 étaient toutefois de plus petite taille que ceux des autres lots, leur germination ayant débuté plus tardivement. Cette différence s'est maintenue jusqu'au troisième mesurage (28 avril).

Les statistiques descriptives pour la hauteur (nombre de plants mesurés, moyenne, valeurs maximale et minimale, erreur type et coefficient de variation) selon le lot de semences de MEH, la date d'échantillonnage et la régie d'irrigation sont présentées dans l'annexe 4.

Dès le premier mesurage le 31 mars, soit 3 semaines après le repiquage, une hétérogénéité dans la hauteur des plants a été observée, et ce, pour tous les lots de semences, peu importe la régie d'irrigation (Annexe 4). Cette hétérogénéité s'est accentuée tout au long de la saison de croissance. Les plants chétifs, qui étaient peu développés au premier mesurage, le sont restés jusqu'à la fin de la période d'observation (Figures 8 et 9). Cette hétérogénéité de la croissance en hauteur est caractérisée par une variabilité très prononcée aussi bien intralot qu'interlots, et ce, peu importe la régie d'irrigation et la date d'échantillonnage (Figure 10). Elle est clairement indiquée par des coefficients de variation très élevés (Annexe 4). La proportion de plants chétifs est présentée par lot et par régie d'irrigation à la figure 10.

À l'issue du mesurage final, 2 catégories de plants ont été déterminées. Les plants de la classe 1, « petits plants », avaient une hauteur inférieure ou égale à 11,6 cm. Cette classe était principalement composée de plants chétifs. Les plants de la classe 2, « grands plants », avaient une hauteur moyenne supérieure à 11,6 cm. La figure 11 illustre deux lots représentatifs.

L'analyse de la variance montre que la croissance en hauteur a été affectée significativement par la date d'échantillonnage ( $p < 0,0001$ ) et par l'interaction Lot x Date ( $p < 0,0001$ , tableau 2 et figure 12).

L'analyse de la variance de la hauteur prise à la dernière date d'échantillonnage montre que le lot de semences a eu un effet significatif ( $p = 0,0148$ ; tableau 2). Les comparaisons multiples ont permis de mettre en évidence que le lot 3 produit des plants significativement plus petits que les lots 1 et 6.

**Tableau 2.** Analyse de la variance sur la variable hauteur pour les 6 lots de MEH et pour les différentes dates de mesure au cours de la saison de croissance.

Source de variation	Dernière date			Toutes les dates		
	dln*	dld†	$p$	dln	dld	$p$
Lot	5	24,21	<b>0,0148</b>	5	25,16	<b>0,0010</b>
Régie	1	24,24	0,5199	1	24,53	0,2068
Lot x Régie	5	24,21	0,9398	5	24,51	0,8566
Date				4	43,76	<b>&lt; 0,0001</b>
Lot x Date				20	43,74	<b>&lt; 0,0001</b>
Régie x Date				4	2380	0,8547
Lot x Régie x Date				20	2380	0,8795

\* Degrés de liberté au numérateur.

† Degrés de liberté au dénominateur selon Satterthwaite.

Les comparaisons des moyennes des hauteurs des plants ont montré la présence de différences significatives (seuil  $\alpha = 5\%$ ) entre les différents lots évalués, et ce, pour chacune des dates d'échantillonnage et la dernière date.

De plus, l'analyse de la variance a montré que la hauteur n'a pas été influencée de façon significative par la régie d'irrigation ( $p = 0,2068$ ), ni par les interactions Régie x Date ( $p = 0,8547$ ), Lot x Régie ( $p = 0,8566$ ) et Lot x Régie x Date ( $p = 0,8795$ , tableau 2).

Afin de s'assurer de l'absence de différences significatives entre les deux régies d'irrigation en ce qui concerne la hauteur des plants, des calculs de puissance<sup>7</sup> ont été effectués en utilisant les mesures de hauteur observées lors de la dernière date d'échantillonnage, soit le 15 juin 2011. Les estimés des variances obtenus de l'analyse de la variance ont été utilisés et différents écarts absolus entre les 2 régies ont été considérés, de même que différentes tailles d'échantillons (nombre de blocs allant de 2 à 5).

Ainsi, avec notre dispositif à 3 blocs, la probabilité de détecter un écart de 0,5 cm était de 8,1 %, de 17,9 % pour un écart de 1 cm, de 31,8 % pour un écart de 1,5 cm, de 51,6 % pour un écart de 2 cm et de 71 %, 84,8 %, 93,3 % et 97,8 % pour

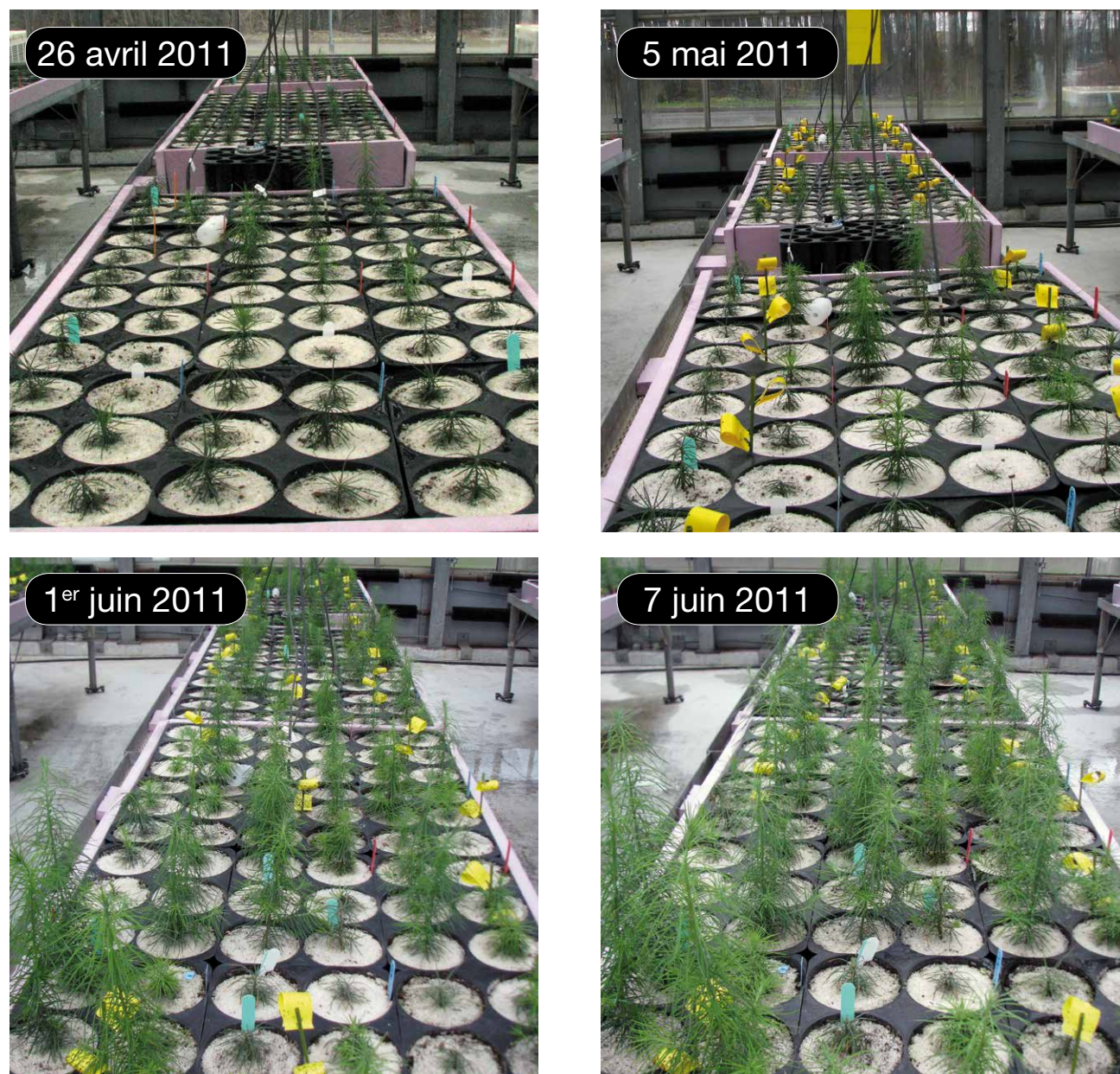
<sup>7</sup> Puissance : probabilité de détecter une différence significative entre les traitements quand cette différence existe vraiment dans la population.

des écarts respectifs de 2,5 cm, 3 cm, 3,5 cm et 4 cm. Donc, s'il existait réellement une différence de 3 cm entre les hauteurs moyennes des 2 régies dans la population (différence considérée comme importante à déceler), l'analyse effectuée aurait eu 85 % des chances de la détecter. À noter que tous lots confondus, les hauteurs moyennes observées étaient de 13,1 cm pour la régie humide et de 12,1 cm pour la régie sèche, ce qui correspond à une différence de 1,0 cm entre les 2 régies. Le fait de ne pas avoir détecté de différences significatives entre les régies est donc attribuable à une absence de différence dans la population plutôt qu'à une taille d'échantillon insuffisante par rapport à la variabilité observée.

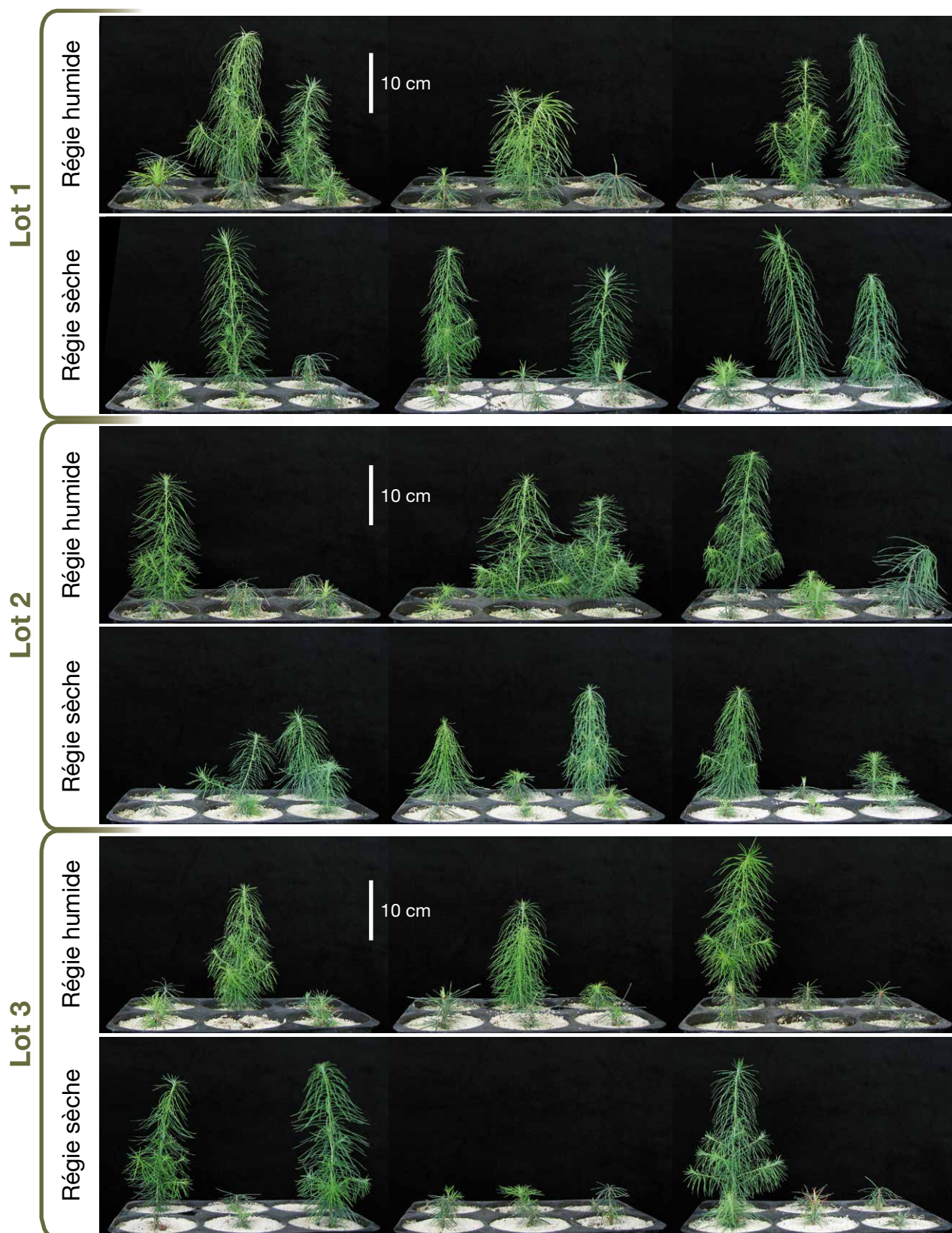
Les résultats montrent également que le fait d'augmenter le nombre de blocs n'aurait pas eu d'effet majeur sur la puissance obtenue, probablement à cause de la grande variabilité observée à l'intérieur d'une unité expérimentale. Cette variabilité prononcée à l'intérieur de chaque lot s'est manifestée par des coefficients de variation très élevés (Annexe 4).

### 2.3.1.2 Masses sèches des parties aériennes, des racines et du plant entier

Le lot de semences de MEH a eu un effet significatif sur la croissance moyenne, notamment sur la masse finale des parties aériennes ( $p = 0,0192$ ) et des racines ( $p = 0,0021$ ), de même que sur la masse



**Figure 8.** Évolution de la croissance des plants de MEH du bloc 2 à 4 dates successives au cours de la saison de croissance. Notez l'apparition de l'hétérogénéité dans la hauteur des plants dans tous les récipients.



**Figure 9.** Exemples du gabarit des plants de MEH atteint à la fin de la saison de croissance pour les 6 lots de graines testés. Pour chaque lot et chaque régie, un récipient représentatif a été sélectionné dans chacun des 3 blocs (suite à la page suivante).

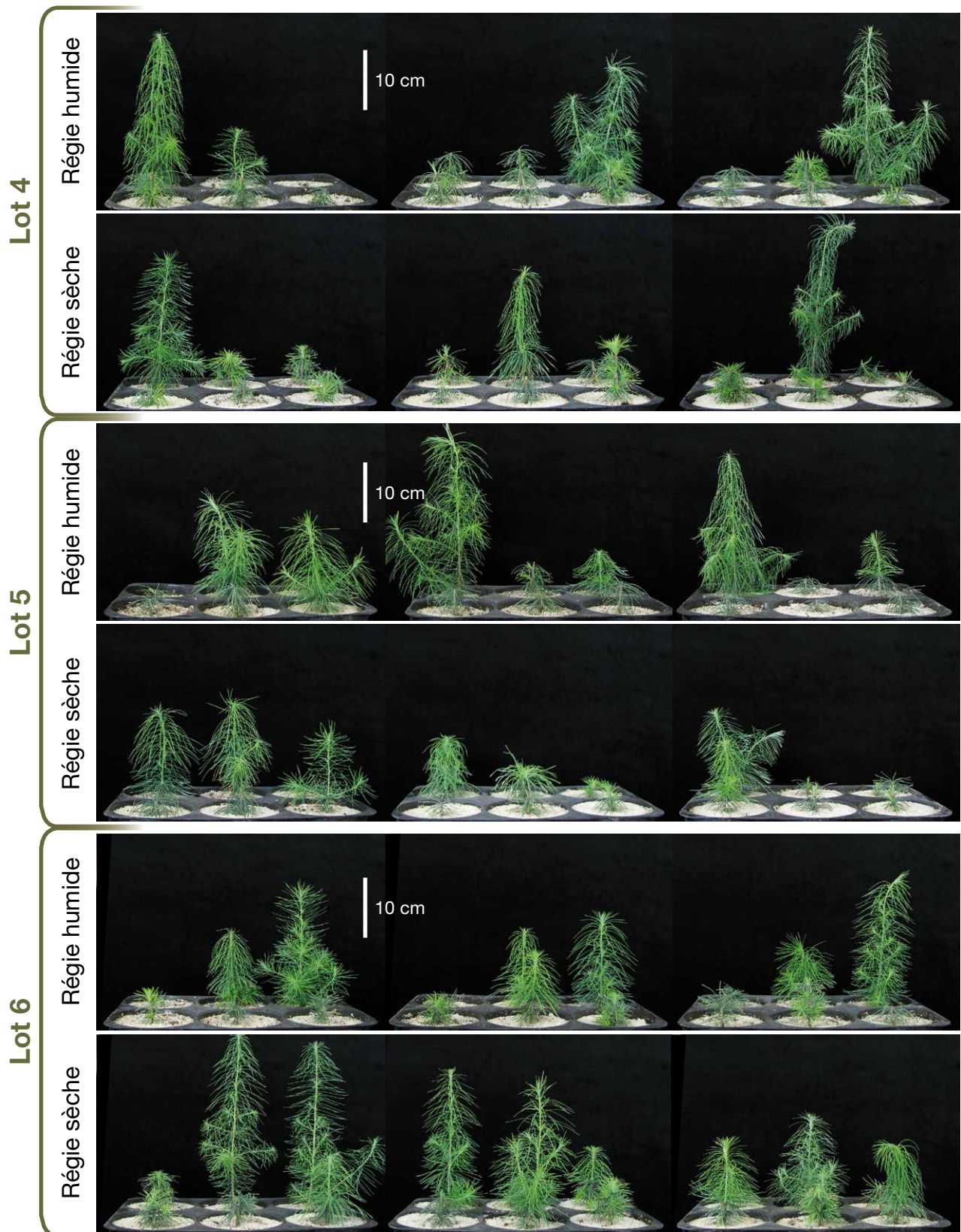
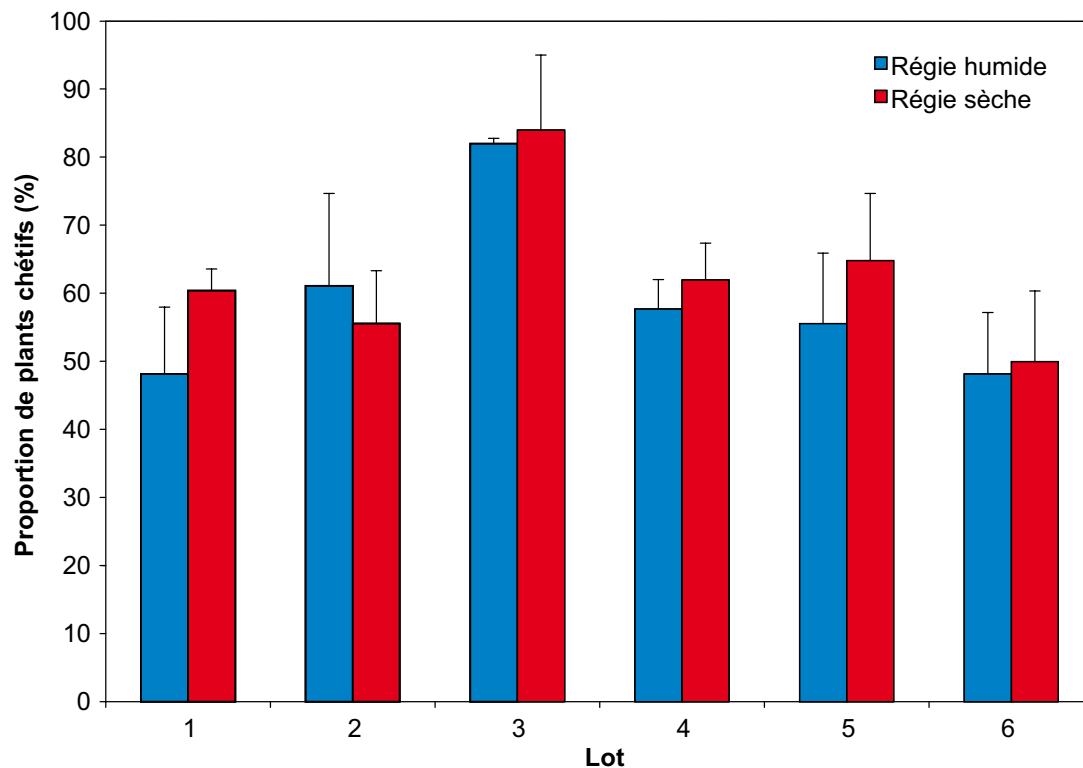


Figure 9. (suite et fin)



**Figure 10.** Proportion (%) de plants chétifs de MEH pour chaque lot et chaque régie lors de l'échantillonnage final. Les barres d'erreur représentent l'erreur type ( $n = 36$ ).

totale des plants ( $p = 0,0056$ , tableau 3 et figure 13). Par exemple, à la dernière date d'échantillonnage, la masse totale des plants du lot 3 était significativement inférieure de 72 % à celle des plants du lot 6. Cette différence n'est plus que de 36 % lorsqu'on compare les masses des racines obtenues pour ces deux lots. Par ailleurs, la croissance moyenne des plants de MEH n'a pas été influencée par la régie d'irrigation ni par l'interaction Lot x Régie.

L'hétérogénéité des plants observée pour la hauteur se retrouvait également au niveau des systèmes racinaires. On observe d'ailleurs des différences plus importantes quant aux masses des systèmes racinaires, comparativement aux masses des parties aériennes ou aux masses totales. En

moyenne, les plants du lot 2 avaient la masse de système racinaire la plus faible, et ceux du lot 1, la masse la plus élevée. Ces différences dans le développement des systèmes racinaires laissent présager un taux variable d'insuffisance racinaire selon les lots. À cela s'ajoute le fait que les plants de la classe 1, peu importe le lot, ont un système racinaire moins développé que ceux de la classe 2 (Figure 11).

### 2.3.2 Hétérogénéité de l'architecture des parties aériennes

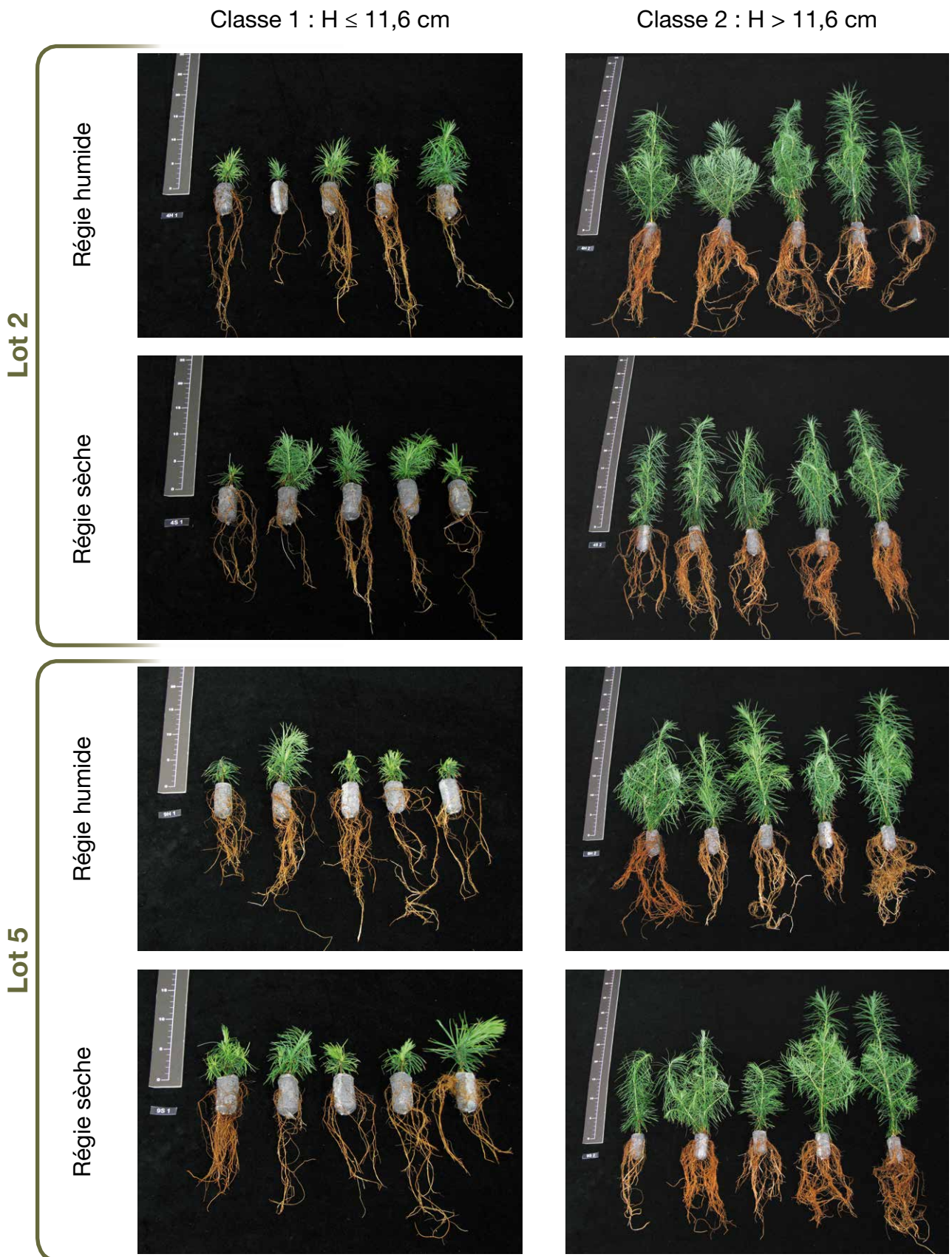
L'architecture des parties aériennes des plants a été évaluée, notamment, par le nombre de branches latérales de plus de 1 cm. En utilisant uniquement les observations de la dernière date

**Tableau 3.** Analyse de la variance sur la masse sèche des parties aériennes, des racines et totale des plants à la fin de la saison de croissance, pour les 6 lots de MEH.

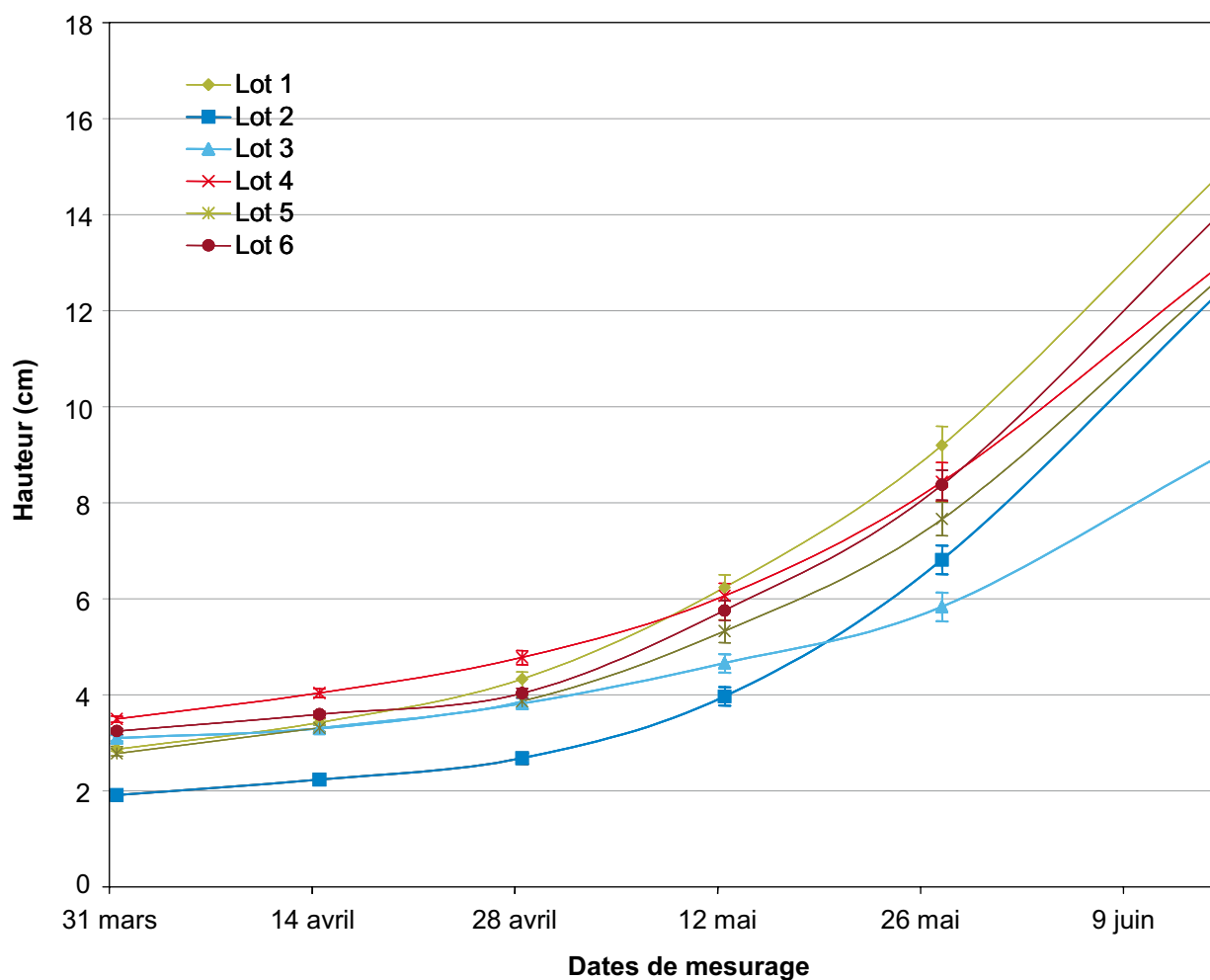
Source de variation	Masse sèche des parties aériennes (mg)			Masse sèche des racines (mg)			Masse sèche totale du plant (mg)		
	dln*	dld†	$p$	dln	dld	$p$	dln	dld	$p$
Lot	5	12,14	<b>0,0192</b>	5	24,09	<b>0,0021</b>	5	24,24	<b>0,0056</b>
Régie	1	12,17	0,2869	1	24,13	0,3459	1	24,26	0,2498
Lot x Régie	5	12,15	0,9109	5	24,09	0,8159	5	24,24	0,9250

\* Degrés de liberté au numérateur.

† Degrés de liberté au dénominateur selon Satterthwaite.



**Figure 11.** Gabarit des plants de MEH des lots 2 et 5 lors du mesurage final, selon leur classe de hauteur (H; classe 1 :  $H \leq 11,6$  cm et classe 2 :  $H > 11,6$  cm) et la régie d'irrigation. Notez la présence de la pastille Jiffy<sup>MD</sup>, substrat initial lors de la germination.



**Figure 12.** Évolution de la hauteur moyenne des plants de MEH au cours de la saison de croissance pour les 6 lots de l'essai. Les barres d'erreur correspondent à l'erreur type ( $n = 648$ ).

d'échantillonnage, on ne peut mettre en évidence d'effet du lot ( $p = 0,0683$ ), ni de la régie d'irrigation ( $p = 0,0978$ ), ni de leur interaction ( $p = 0,6553$ , tableau 4).

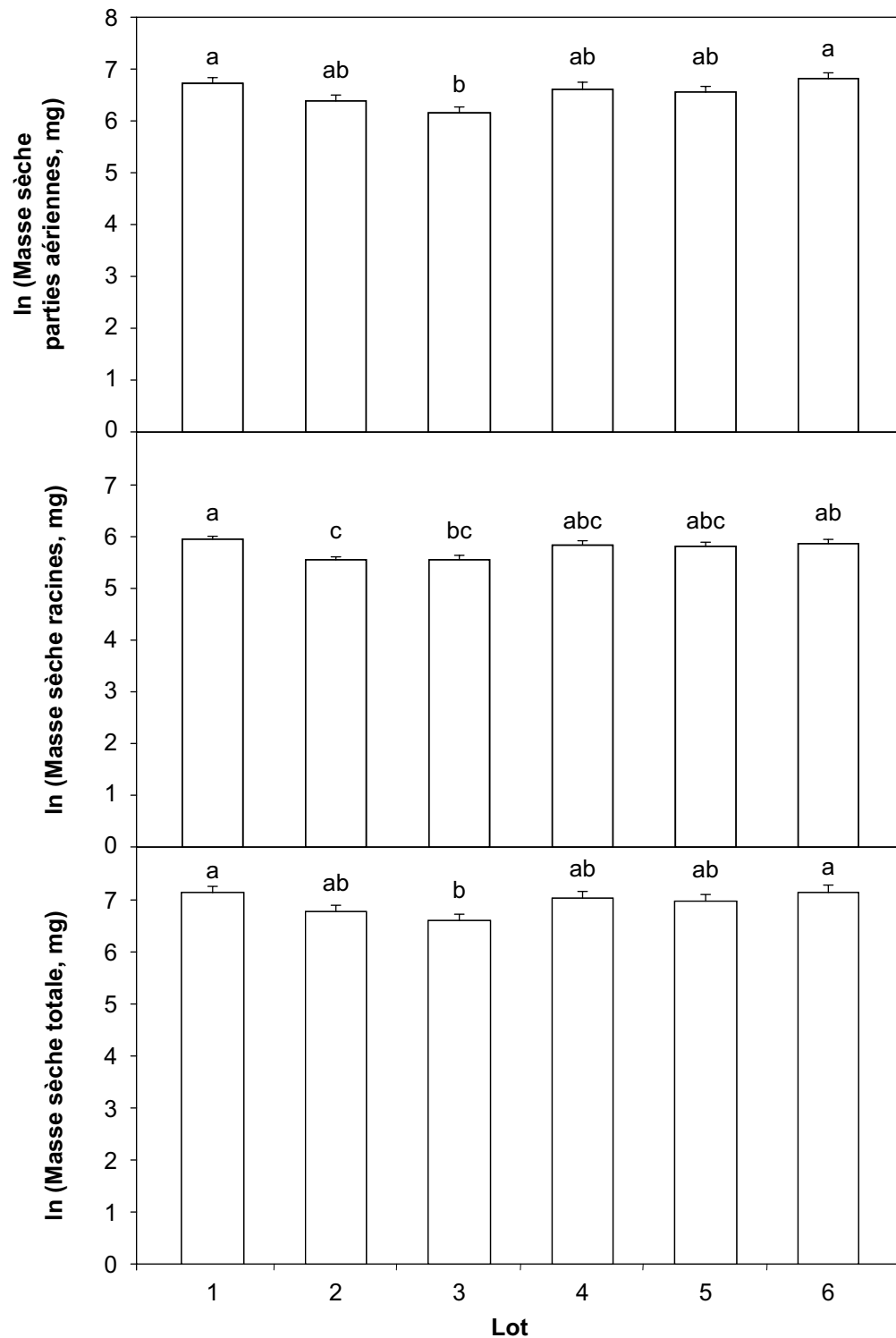
Cependant, l'analyse de la variance globale, qui considère les différentes dates d'échantillonnage, montre que la formation des branches latérales est influencée de façon significative par le lot et la date ( $p < 0,0001$ ) et par l'interaction Lot x Date ( $p = 0,0006$ , tableau 4), mais pas par la régie ( $p = 0,3102$ ) ni par les autres interactions possibles. Les comparaisons des moyennes des lots quant à la formation des branches latérales confirment, d'une part, la présence d'une variabilité entre les lots, et d'autre part, que cette capacité de formation des branches n'est pas la même entre les lots ni d'une date à l'autre (Annexe 5).

**Tableau 4.** Analyse de la variance sur le nombre de branches latérales de plus de 1 cm, pour les 6 lots de MEH et pour les différentes dates de mesure au cours de la saison de croissance.

Source de variation	Dernière date			Toutes les dates		
	dln*	dld†	$p$	dln	dld	$p$
Lot	5	9,80	0,0683	5	34,21	< <b>0,0001</b>
Régie	1	14,49	0,0978	1	53,33	0,3102
Lot x Régie	5	11,75	0,6553	5	34,23	0,9601
Date				4	248,6	< <b>0,0001</b>
Lot x Date				20	122,4	<b>0,0006</b>
Régie x Date				4	248,6	0,9466
Lot x Régie x Date				20	122,4	0,9336

\* Degrés de liberté au numérateur.

† Degrés de liberté au dénominateur selon Satterthwaite.



**Figure 13.** Logarithme des masses sèches totales, des racines et des parties aériennes des plants de 6 lots de MEH, après 22 semaines de culture en serre. Les barres d'erreur correspondent à l'erreur type ( $n = 648$ ). Des lettres distinctes identifient les différences significatives au seuil  $\alpha = 5\%$ .

L'hétérogénéité dans l'architecture des parties aériennes entre les lots s'est accentuée à partir du 12 mai. Tout au long de la saison de croissance, le lot 2 s'est caractérisé par un nombre plus faible de branches latérales. Les autres lots ont eu un comportement similaire (Annexe 5). Cependant, d'une cavité à l'autre, pour un même lot de semences et pour la même régie d'irrigation, le nombre de branches latérales pouvait être très variable (Figure 9).

Un autre point à considérer lorsqu'on analyse l'architecture des parties aériennes des plants est la présence, ou non, d'une dominance apicale. Celle-ci n'a pas été analysée statistiquement. En effet, à l'exception d'une date, tous les plants des lots 1 et 2 présentaient une dominance apicale, peu importe la régie (Annexe 6). Pour les autres lots, la proportion de plants ayant une dominance apicale a été variable, avec un minimum de 88 % pour le lot 3, dans la régie sèche, lors du mesurage du 31 mars. Cependant, à la fin de la saison de croissance, la proportion de plants ayant une dominance apicale, pour tous les lots, variait de 94 à 100 %.

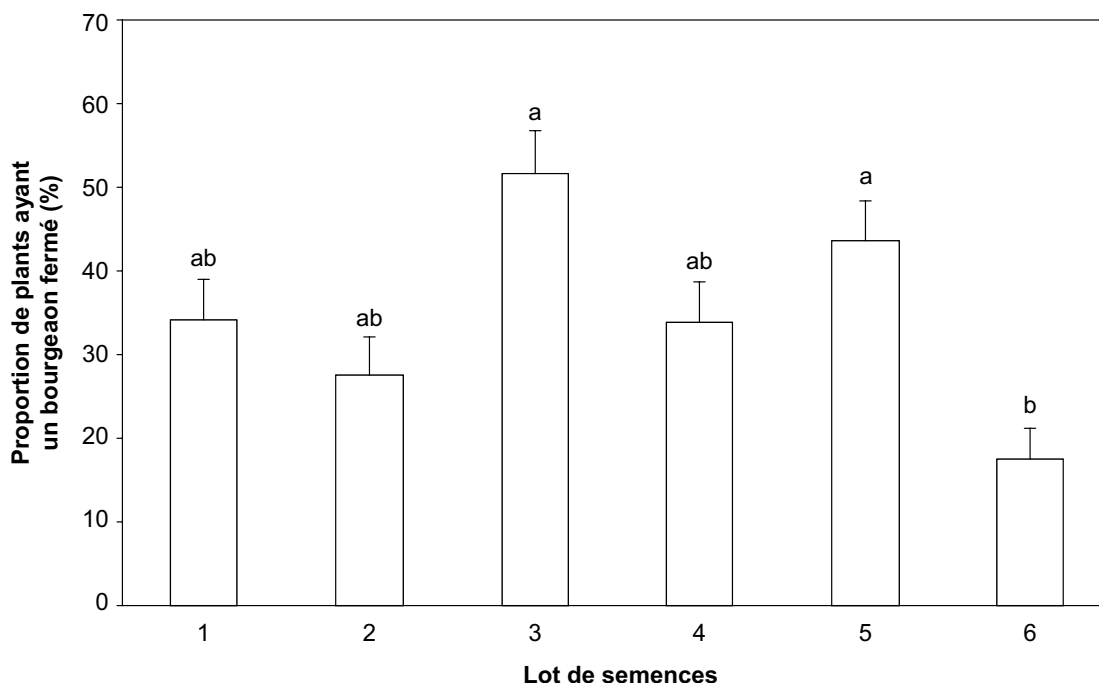
### 2.3.3 Formation des bourgeons terminaux de la tige principale des plants

Différents comportements ont été observés quant à la formation du bourgeon terminal chez les plants d'un même lot. Pour des plants de la classe 1 (les plus petits), le bourgeon terminal s'est formé

très rapidement (3 semaines après le repiquage), et aucune reprise de croissance n'a été observée. Pour certains plants de cette classe, un bourgeon terminal s'est rapidement formé, puis on a pu observer une légère reprise de croissance, ou bien, au cours des mesures, une alternance de présence et d'absence de bourgeon, mais pas de croissance importante. Dans la classe 2, aucun des plants n'avait de bourgeon terminal au dernier mesurage. Pour certains plants, on a pu observer la formation d'un bourgeon lors du premier ou du deuxième mesurage, mais celle-ci a été suivie d'une reprise de la croissance à un bon rythme jusqu'à la fin de la saison.

La dernière évaluation de la formation des bourgeons a été faite le 27 mai 2011. L'analyse de la variance a montré un effet significatif du lot sur la proportion de plants ayant un bourgeon terminal ( $p = 0,0066$ , tableau 5). Par contre, la régie d'irrigation n'a pas eu d'effet significatif sur cette proportion ( $p = 0,4999$ , tableau 5). Les comparaisons multiples des moyennes ont montré que la proportion de plants des lots 3 et 5 ayant un bourgeon fermé est significativement supérieure à celle des plants du lot 6 (Figure 14).

En tenant compte de toutes les dates d'échantillonnage, l'interaction Lot x Date s'est avérée significative ( $p = 0,0003$ , tableau 5). Les comparaisons des moyennes de chacun des lots à chaque date



**Figure 14.** Proportion (%) de plants ayant un bourgeon fermé à la dernière date d'échantillonnage pour les 6 lots de MEH. Les barres d'erreur correspondent à l'erreur type ( $n = 648$ ). Des lettres distinctes identifient les différences significatives au seuil  $\alpha = 5\%$ .

ont montré, par exemple, que les moyennes des 3 premières dates (31 mars, 14 et 28 avril) étaient semblables en ce qui a trait à la proportion de plants ayant un bourgeon fermé. Par contre, pour les 2 dernières dates (12 et 27 mai), la proportion de plants du lot 3 ayant un bourgeon fermé était supérieure à celle du lot 6 (Annexe 5). En effet, lors du dernier échantillonnage, 51 % des plants du lot 3

avaient un bourgeon, comparativement à seulement 17 % pour les plants du lot 6 (Figure 14). Pour tous les lots, on observe une grande variation de la proportion de plants ayant un bourgeon fermé, tout au long de la saison de croissance. Les tendances de ces variations sont similaires pour les différents lots (Annexe 5).

### 2.3.4 Nutrition minérale

Les plants de MEH issus des différents lots de graines et produits sous les 2 régies d'irrigation (humide et sèche) n'ont montré aucun symptôme de carence au cours de la saison de croissance. Ainsi, par exemple, à la fin de la saison de croissance, les concentrations en N des parties aériennes des différents lots variaient de 2,19 % à 2,90 % selon les régies d'irrigation (données non présentées).

Pour les concentrations des parties aériennes, le lot a eu un effet significatif sur les concentrations de P ( $p < 0,0001$ ), de K ( $p = 0,0029$ ) et de Mg ( $p = 0,0009$ ) (Tableau 6). La régie d'irrigation n'a eu d'effet que sur la concentration de N ( $p = 0,0088$ , tableau 6).

**Tableau 5.** Analyse de la variance sur la proportion de plants ayant un bourgeon fermé, pour les 6 lots de MEH et pour les différentes dates de mesure au cours de la saison de croissance.

Source de variation	Dernière date			Toutes les dates		
	dln*	dld†	p	dln	dld	p
Lot	5	12,22	<b>0,0066</b>	5	10,95	0,1205
Régie	1	13,11	0,4999	1	14,22	0,8649
Lot x Régie	5	12	0,5235	5	13,81	0,9160
Date				4	2358	<b>&lt; 0,0001</b>
Lot x Date				20	2342	<b>0,0003</b>
Régie x Date				4	2359	0,8728
Lot x Régie x Date				20	2342	0,2001

\* Degrés de liberté au numérateur.

† Degrés de liberté au dénominateur selon Satterthwaite.

**Tableau 6.** Analyse de la variance des résultats des analyses minérales pour la concentration, en %, des différents éléments (N, P, K, Ca, Mg) dans les parties aériennes et les racines des plants de MEH.

Source de variation	dln*	N (%)		P (%)		K (%)		Ca (%)		Mg (%)	
		dld†	p	dld	p	dld	p	dld	p	dld	p
<b>Parties aériennes</b>											
Lot	5	10,1	0,6048	22,0	<b>&lt; 0,0001</b>	45,1	<b>0,0029</b>	9,8	0,9881	24,3	<b>0,0009</b>
Régie	1	35,3	<b>0,0088</b>	22,1	0,1639	45,1	0,6926	11,2	0,0573	24,3	0,7280
Lot x Régie	5	35,3	<b>0,0405</b>	22,0	0,3626	45,1	0,5853	11,2	0,9501	24,3	0,5791
Classe hauteur	1	35,3	<b>&lt; 0,0001</b>	24,0	<b>&lt; 0,0001</b>	45,1	<b>&lt; 0,0001</b>	23,5	<b>&lt; 0,0001</b>	24,0	<b>&lt; 0,0001</b>
Lot x Classe hauteur	5	35,3	0,1935	24,0	0,0924	45,1	0,0556	23,5	0,1664	23,9	0,0780
Régie x Classe hauteur	1	35,3	0,7178	24,0	0,0610	45,1	<b>0,0070</b>	23,5	<b>0,0414</b>	24,0	0,6169
Lot x Régie x Classe hauteur	5	35,3	0,5884	24,0	0,1748	45,1	0,7668	23,5	0,6220	23,9	0,3231
<b>Racines</b>											
Lot	5	15,7	0,6266	9,3	0,4352	17,4	0,3338	37,0	0,1263	9,5	0,2877
Régie	1	35,4	0,1004	34,2	0,4357	34,8	0,6724	34,9	0,6712	34,6	<b>&lt; 0,0001</b>
Lot x Régie	5	35,4	0,1510	34,2	0,5487	34,8	0,6915	34,9	0,9905	34,6	0,8022
Classe hauteur	1	35,4	<b>&lt; 0,0001</b>	34,2	<b>&lt; 0,0001</b>	34,8	<b>&lt; 0,0001</b>	34,9	<b>&lt; 0,0001</b>	34,6	0,2014
Lot x Classe hauteur	5	35,4	0,3940	34,2	0,0706	34,8	0,3518	34,9	0,1310	34,6	0,1715
Régie x Classe hauteur	1	35,4	0,8543	34,2	0,1524	34,8	0,3635	34,9	0,9916	34,6	0,3694
Lot x Régie x Classe hauteur	5	35,4	0,6943	34,2	0,7650	34,8	0,4584	34,9	0,9811	34,6	0,8241

\* Degrés de liberté au numérateur.

† Degrés de liberté au dénominateur selon Satterthwaite.

Les plants appartenant à la classe de hauteur 2 («grands plants») avaient une concentration plus faible de N, P et Mg dans les parties aériennes ( $p < 0,0001$ ) que ceux de la classe de hauteur 1 («petits plants»). Pour les concentrations de K et de Ca dans les parties aériennes, l'interaction entre la régie et la classe de hauteur est significative ( $p = 0,007$  et  $p = 0,0414$ ; tableau 6).

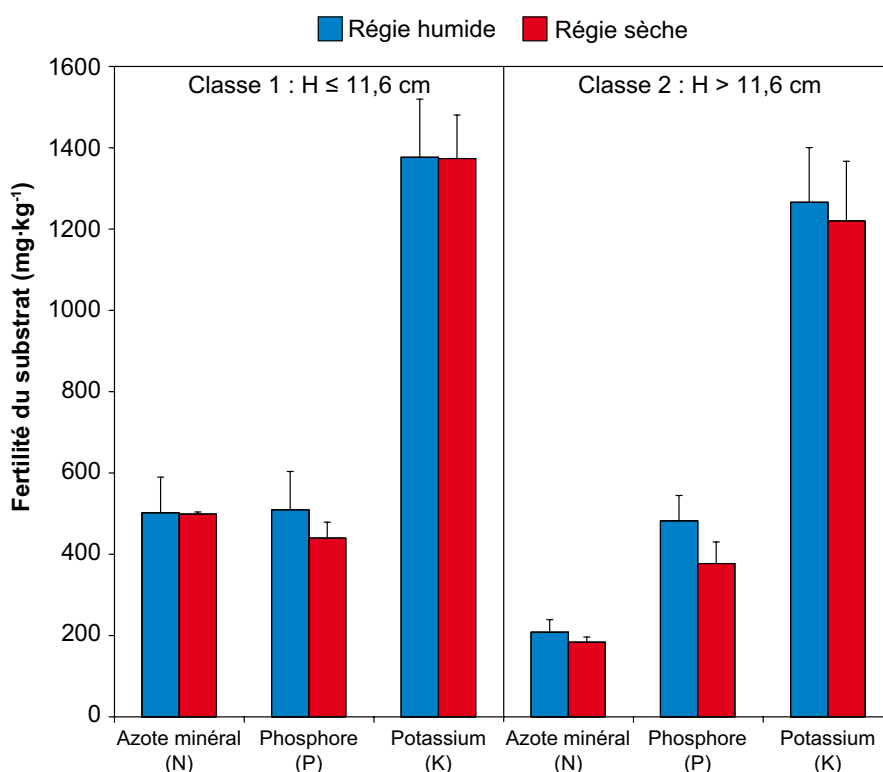
Dans le cas de la concentration moyenne en N des parties aériennes, l'interaction Lot x Régie est également significative ( $p = 0,0405$ ), tout comme l'effet de la régie ( $p = 0,0088$ , tableau 6). Même si la différence reste relativement faible, les concentrations de N mesurées pour la régie sèche ( $2,64 \pm 0,038$  %) sont supérieures à celles pour la régie humide ( $2,56 \pm 0,038$  %).

En ce qui a trait aux concentrations des éléments minéraux des racines, l'analyse de la variance a montré que la régie d'irrigation a un effet significatif sur la concentration en Mg ( $p < 0,0001$ ). Par ailleurs,

la classe de hauteur influence également de façon significative les concentrations en N, P, K et Ca ( $p < 0,0001$ , tableau 6).

Quant à l'efficacité d'utilisation des éléments minéraux, les plants de la classe de hauteur 2 ont une efficacité de l'utilisation de N et de P significativement supérieure à celle des plants de la classe 1 (NUE :  $44,1 \pm 0,639$  pour la classe 2,  $33,5 \pm 0,415$  pour la classe 1; PUE :  $177 \pm 5,3$  pour la classe 2,  $141 \pm 5,3$  pour la classe 1).

Lors de l'échantillonnage final destructif, la fertilité du substrat a été déterminée pour les deux régies et les deux classes de plants (Figure 15). Pour les trois éléments présentés, les concentrations dans les substrats de chaque classe de plants sont similaires pour les deux régies. Ceci montre que la régie d'irrigation n'a eu aucun impact sur la fertilité du substrat. On peut également observer une concentration plus importante des éléments dans le substrat des plants de la classe 1.



**Figure 15.** Fertilité des substrats selon la classe de hauteur (H) des plants de MEH à la fin de la saison de croissance, pour les deux régies (humide et sèche).

# Chapitre trois

## Discussion

Les résultats de cette étude ont clairement montré que la présence d'une hétérogénéité très prononcée de la croissance en hauteur et de l'architecture aérienne de plants de MEH cultivés en serre, notamment la présence de plants chétifs, est fortement reliée au lot de semences. Cependant, cette hétérogénéité n'est pas influencée par la régie d'irrigation. Le phénomène n'apparaît que deux à trois semaines après le repiquage des semis, et n'est donc pas détectable lors de la germination.

Le stress hydrique a un impact négatif sur la croissance de plants de mélèze de l'ouest (*Larix occidentalis* Nutt., MEO [VANCE et RUNNING 1985]). Pour maximiser la croissance des plants et retarder la formation du bourgeon terminal, les pépiniéristes vont maintenir une teneur en eau du substrat élevée (LAMHAMEDI *et al.* 2003). Or, des irrigations trop fréquentes peuvent entraîner d'importantes pertes d'éléments nutritifs par lessivage, d'où un risque élevé de pollution de la nappe phréatique (LAMHAMEDI *et al.* 2003; GIRARD *et al.* 2011). De plus, les variations de teneurs en eau du substrat ont un effet direct sur la disponibilité de l'oxygène, l'allocation de carbone entre les différentes parties du plant, le statut nutritionnel des plants ainsi que les échanges gazeux (LAMHAMEDI et BERNIER 1994; HEISKANEN 1995). Des travaux antérieurs sur l'épinette blanche ont montré que des régies d'irrigation maintenant la teneur en eau du substrat entre 25 et 45 % n'avaient pas d'effet négatif sur la croissance et la physiologie des semis de cette essence (LAMHAMEDI *et al.* 2000b). D'ailleurs, les teneurs en eau à maintenir dans le substrat pour la durée de l'essai ont été choisies dans cet intervalle, soit 25-30 % v/v (régie sèche) et 40-45 % v/v (régie humide). Précisons également que le traitement de régie sèche permettait d'assurer la croissance et les fonctions physiologiques des plants, et ne visait pas à leur appliquer un stress hydrique sévère.

Tout au long de la saison de croissance, grâce à la précision de la méthode de fertilisation effectuée cavité par cavité, les plants ont tous reçu les mêmes quantités d'éléments minéraux, sans toutefois qu'il y ait eu de lessivage lors des nombreux arrosages et fertilisations. Ceci montre que la régie de culture (fertilisation et irrigation) ne peut être identifiée comme la cause principale à l'origine de la forte

proportion des plants chétifs. De plus, à la fin de la saison de croissance, la concentration tissulaire en N des parties aériennes des plants pour tous les lots ( $2,6 \pm 0,03$  %) était bien supérieure à la valeur cible de 1,8 % retenue dans les normes de qualification des plants au Québec (VEILLEUX *et al.* 2012). Les plants de cet essai avaient donc un statut nutritionnel optimal, qui permettait la croissance et le déroulement des processus physiologiques dans les meilleures conditions. Rappelons que le feuillage des mélèzes a une utilisation très efficace de l'azote (GOWER *et al.* 1995).

Différents facteurs peuvent être à l'origine de l'hétérogénéité dans le gabarit des plants de MEH. Le lot de semences vient en premier lieu. Son effet englobe à la fois l'origine génétique et le calibre des semences, ainsi que leurs effets sur la cinétique de germination et les caractéristiques des plants (hauteur, branchaison, présence de têtes multiples, etc.).

Le genre *Larix* est reconnu comme un faible producteur de graines pleines, qui germent d'ailleurs avec des taux très variables selon les espèces (HÅKANSSON 1960; OWENS 1992; SHIN et KARNOSKY 1995; SLOBODNIK et GUTTENBERGER 2003; OWENS et KITTIRAT 2004). Lors de l'extraction des graines au CSFB, une attention particulière est prêtée à l'élimination des graines vides. Le tri des graines est validé à l'aide de l'analyse d'un cliché aux rayons X de sous-échantillons de chacun des lots. Pour les lots utilisés ici, le pourcentage de graines pleines, déterminé à partir de cette analyse, variait de 83 à 100 % (Tableau 1). Rappelons que les lots utilisés ont été produits entre 2001 et 2009 et que depuis 2007, la méthode de tri a été améliorée. Il se peut donc que dans certains lots aient persisté des graines n'ayant pas un développement complet. Or, comme ces graines n'ont pas pu germer, elles ne peuvent être à l'origine de plants de plus faible gabarit. De surcroît, les plants ont été repiqués après la germination suite à une sélection, ce qui a permis d'éliminer les plants ayant un développement incomplet.

La présence de plants chétifs pourrait être le résultat d'autofécondations (voir DIECKERT 1964, cité par PÂQUES 1989). Cependant, bien que le risque de production de graines autofécondées ne puisse

être totalement exclu, la méthode de pollinisation utilisée pour la production des semences de MEH au Québec a été conçue de façon à éliminer ce risque : émasculature des arbres utilisés pour les pollinisations, récolte de pollen sélective par espèce, culture des greffes sous abri afin de devancer le développement phénologique des semenciers et éviter les contaminations polliniques extérieures (COLAS *et al.* 2008). Si des autofécondations avaient eu lieu, ce serait dans des proportions extrêmement faibles n'ayant rien à voir avec celles des plants chétifs observées pour les différents lots. De plus, leur présence serait répartie inégalement entre les différentes régions de culture, alors que les proportions observées sont identiques dans les deux régions. La possibilité d'expliquer la présence de plants chétifs par des autofécondations est donc à éliminer.

Les dimensions des graines sont sous un contrôle génétique maternel important et elles peuvent grandement influencer le gabarit des plants, au moins durant la première saison de croissance (FARMER 1997; CASTRO 1999). Dans cet essai, on observe un effet du lot sur la hauteur des plants à la date finale d'échantillonnage. Des différences de plus de 20 % dans les dimensions des graines existent entre le lot ayant les graines les plus grosses (lot 1) et celui ayant les plus petites (lot 4, voir tableau 1). Cependant, le classement de la hauteur moyenne des plants n'est pas le même que celui de la grosseur des graines (données non présentées).

De nombreux travaux de recherche ont été consacrés à l'étude des MEH avec différentes espèces mères, notamment pour l'effet sur la croissance (voir PÂQUES 1989). Cependant, en raison de la difficulté à réaliser des plans de croisements complets chez les mélèzes, il est difficile d'évaluer avec précision le contrôle génétique pour les différents traits étudiés (PÂQUES *et al.* 2013). Chez les mélèzes, la croissance en hauteur totale des plants est un caractère sous contrôle génétique faible à modéré (voir PERRON 2010). Toutefois, chez le MEE, une forte héritabilité a été mise en évidence pour la hauteur des arbres (KOWALCZYK 2002). Chez l'épinette blanche, on retrouve un contrôle génétique pour la hauteur, qui a d'ailleurs été mis à profit dans le programme d'amélioration génétique de l'espèce (RAINVILLE et BEAULIEU 2007). Cette variabilité pour la hauteur est aussi corrélée à la branchaison (WAHID *et al.* 2012).

Au cours de l'expérience, un arrêt prématuré de croissance a été observé pour certains plants, indépendamment du lot. La reprise de croissance ne s'est pas accompagnée d'une perte de

dominance apicale (les plants deviennent alors buissonnants) comme cela peut être le cas lors d'une reprise de croissance en cours de saison (CLINE et HARRINGTON 2007).

La formation précoce du bourgeon terminal sans reprise de croissance, variable selon les hybrides, a été observée chez différents hybrides de mélèze formés entre le MEO et le mélèze de Lyall (*Larix lyallii* Parl.) (CARLSON 1994). Cette variabilité peut être une réponse de l'espèce à la température et à la lumière durant l'expérience (CARLSON 1994).

L'effet de la température est également significatif lors du débourrement chez le MEH, selon l'origine génétique des plants (GAUCHAT et PÂQUES 2011). Est-ce que l'arrêt observé durant la saison de croissance de certains lots de semences peut avoir été causé par une sensibilité de certains génotypes à des températures élevées? Le taux de photosynthèse chez les plantes ligneuses atteint un maximum entre 15 et 25 °C. L'effet de la température sur la photosynthèse peut être modifié par l'intensité lumineuse, la disponibilité en CO<sub>2</sub> et en eau et, éventuellement, les effets d'un préconditionnement à des facteurs environnementaux (KRAMER et KOZLOWSKI 1979). La température moyenne mesurée dans la serre s'est maintenue entre 20 et 25 °C durant toute l'expérience (Figure 6), permettant une photosynthèse optimale. Certes, des pics au-delà de 30 °C ont été enregistrés ponctuellement, mais ceci ne peut avoir induit d'arrêt de croissance, à moins que des génotypes ne soient particulièrement sensibles à la température. À la pépinière de Saint-Modeste, sur la base de cette hypothèse de l'arrêt de la croissance des plants en raison de températures trop élevées, le scénario de production de pieds-mères de MEH a été revu, et la culture se déroule maintenant dans une serre mieux ventilée. Sans que la température y soit contrôlée précisément, la fréquence des pics de températures très élevées (> 30 °C) a significativement diminué. Avec les lots utilisés (différents de ceux de l'essai), l'occurrence des plants chétifs a aussi fortement diminué. Il faudra cependant mener des essais complémentaires avant de conclure sur l'effet de la température.

Selon nous, la formation précoce du bourgeon terminal sans reprise de croissance ne peut être attribuée à un stress hydrique engendré par le choc de transplantation et une mauvaise conductivité hydraulique à l'interface sol-racine, pour les raisons suivantes (LAMHAMED *et al.* 1992) :

- Les racines des plants sont déjà dans une pastille Jiffy<sup>MD</sup> humide dotée d'une bonne capacité de rétention en eau.

- La quantité d'eau contenue dans la pastille Jiffy<sup>MD</sup> est largement suffisante pour satisfaire les besoins en eau d'un jeune plant après le repiquage. D'ailleurs, avant le repiquage, les besoins en eau de chaque plant ont été comblés grâce à une irrigation par brumisation toutes les heures.
- Le substrat de la pastille Jiffy<sup>MD</sup> est essentiellement constitué de tourbe. Le substrat d'empotage est également tourbeux, préhumecté, et son irrigation était bien contrôlée. Comme il s'agissait presque du même substrat, la conductivité hydraulique ne pouvait pas être un problème majeur à cette interface.
- Au moment du repiquage, les plants étaient de dimensions uniformes, ne montraient aucun signe de stress hydrique (flétrissement, etc.) et présentaient déjà une bonne croissance des racines (Figure 2a et 2b).

La forte hétérogénéité dans les gabarits des plants a conduit à des analyses selon deux classes de hauteur. Malgré les différences pour la concentration des principaux éléments minéraux dans les deux classes de plants, les concentrations en éléments au sein d'une même classe étaient adéquates pour une croissance optimale des plants.

L'hétérogénéité dans le gabarit des plants, peu importe les lots, se traduit également par une hétérogénéité dans le volume du système racinaire. À la fin de la saison de croissance, la concentration des principaux éléments minéraux (N, P, K) dans le substrat était plus élevée pour les plants de classe 1 que pour ceux de la classe 2 (Figure 15), peu importe la régie. Ceci est surtout flagrant pour l'azote minéral. En ayant moins colonisé les carottes de substrat, les racines des plants de la classe 1 ont moins absorbé d'éléments minéraux. Ainsi, il en reste davantage dans le substrat à la fin de la saison de croissance. Ceci montre que le développement différent des plants n'est pas dû à une différence de disponibilité des éléments minéraux dans le substrat. Le faible développement de certains systèmes racinaires, principalement les plants de la classe 1, laisse présager un taux élevé d'insuffisance racinaire qui pourrait entraîner le déclassement de ces plants pour le reboisement. En effet, la qualité du système racinaire est l'un des critères les plus importants lors de l'étape de qualification avant livraison (VEILLEUX *et al.* 2012). Cela dit, il n'y a pas eu de qualification des plants produits, puisque le récipient utilisé pour cette production a une cavité de 1 300 cm<sup>3</sup>. Or il n'existe pas de norme pour ce volume de cavité puisque les plants produits en pépinière pour le reboisement ont un volume maximal de cavité de 350 cm<sup>3</sup>.

Au Québec, plusieurs études ont porté sur l'insuffisance racinaire des plants forestiers, notamment chez l'épinette blanche, qui présente une variabilité clonale et familiale marquée notamment pour la croissance des racines (LAMHAMEDI 2006; LAMHAMEDI *et al.* 2006; 2009; CARLES *et al.* 2012). Pour cette essence, un dessèchement important du substrat de culture, lié à une mauvaise uniformité de l'irrigation, entraîne un fort ralentissement de la croissance des racines, et ultimement, une insuffisance racinaire chez les plants (LAMHAMEDI *et al.* 2006). Dans le cas présent du MEH, l'hypothèse d'un manque d'uniformité de l'irrigation ne peut être retenue, puisque la teneur en eau du substrat a été maintenue de façon rigoureuse pour les deux régies testées. Ainsi, les différences observées entre les différents lots quant à la qualité du système racinaire ne pourraient être attribuées qu'à un effet génétique, bien que les parents impliqués dans les croisements, notamment les pères (pollen), ne sont pas connus avec certitude.

L'expression de l'effet de vigueur hybride (ou d'hétérosis) observé dans les descendances de MEH varie selon les parents impliqués dans le croisement, les conditions environnementales où se développent les plants et les traits phénologiques considérés (PÂQUES 2002). Dans une étude sur la croissance comparée du MEE, du MEJ et de leurs hybrides, PÂQUES (2009) a mis en évidence une grande variabilité de hauteur chez des plants de 2 ans, selon leur verger à graines d'origine. Cette variabilité a été attribuée aux différentes origines génétiques des parents, au nombre de clones qui ont effectivement participé au pool de fécondation et au niveau d'amélioration génétique des parents.

Toutes les espèces de mélèzes sont héliophiles. Pour le MEO, il existe une relation directe entre la masse des racines et l'intensité lumineuse. De plus, cette espèce peut utiliser la lumière pour sa croissance même si le bourgeon terminal est visible, tant que l'eau est disponible (VANCE et RUNNING 1985). Chez le mélèze laricin (*Larix laricina* [Du Roi] K. Koch), l'intensité de la lumière a une influence positive sur la croissance en hauteur des plants (LOGAN 1966). Chez des plants de MEJ de 3 ans, la réponse photosynthétique à une augmentation de lumière atteint un plateau lorsque mesurée à température constante de 20 °C, pour ensuite diminuer après 25 °C (CRANE *et al.* 1983). PELLICER *et al.* (1998) ont montré qu'un éclairage supplémentaire durant la saison de croissance des pieds-mères de MEH permet d'augmenter la hauteur finale des plants.

La lumière reçue par les plants dans la serre a été mesurée durant la saison de croissance. Pendant un peu moins de la moitié de la saison, les plants ont reçu suffisamment de lumière pour atteindre une activité photosynthétique optimale (soit  $600 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ), et ce, malgré l'observation fréquente d'ombre projetée par les rampes d'arrosage et les lampes d'appoint sur la sonde de mesure, qui a artificiellement réduit les valeurs mesurées. Une carence en lumière ne peut donc être à l'origine de la présence de plants chétifs dans la production.

Ces variations d'architecture des parties aériennes (hauteur, nombre et longueur de branches latérales, présence ou absence de dominance apicale, présence ou absence de plants chétifs) ont une influence significative sur le nombre de tiges potentielles à récolter pour le bouturage. Une forte proportion de plants chétifs ne facilite pas l'atteinte des objectifs du nombre de plants produits par pied-mère et nuit à la rentabilité de l'opération de bouturage du MEH.

La variabilité de la hauteur des plants de MEH est un défi pour le pépiniériste qui cherche à prévoir avec précision le nombre de tiges qui pourront être prélevées, en vue d'atteindre les objectifs fixés pour la production de boutures. Un problème d'hétérogénéité dans le gabarit de futurs pieds-mères a déjà été observé, au Québec, chez l'épinette blanche. À la différence du MEH, les graines d'épinette blanche sont produites à partir de croisements biparentaux entre individus sélectionnés et recommandés par le programme d'amélioration génétique (RAINVILLE et BEAULIEU 2007); on connaît donc à la fois la mère (arbre qui porte les cônes) et le père (origine du pollen). Pour faciliter

l'ensemencement en pépinière, et selon les objectifs de production et la destination des plants pour le reboisement, plusieurs descendances sont mélangées dans des proportions connues. La caractérisation spécifique de plusieurs descendances a conduit à recommander le tri des graines par grosseur avant leur ensemencement. Puisque les graines de plus petites dimensions donnaient des plants plus petits, le mélange des descendances a été maintenu. Cette étude a souligné l'importance de réaliser une caractérisation exhaustive des croisements dirigés avant de les intégrer dans la filière de bouturage de l'épinette blanche (LAMHAMEDI *et al.* 2005), afin de bien connaître les performances en pépinière des différentes descendances recommandées et faciliter la gestion des cultures. Dans le contexte actuel du programme de production de plants du MEH, une telle caractérisation n'est pas envisageable, puisqu'il est impossible de connaître avec exactitude les parents composant le mélange de pollen utilisé pour la production des graines.

Un second volet de l'étude sur la présence de plants chétifs dans les productions opérationnelles de MEH est en cours de réalisation. Des descendances uniparentales ont été utilisées (mère connue pollinisée avec un mélange de pollen). Les premiers résultats montrent des différences quant au développement des plants (hauteur, présence de plants chétifs) et celui du système racinaire selon le génotype maternel. Un inventaire exhaustif de tiges sera effectué pour chacun des lots afin de déterminer si certains se démarquent par leur production par rapport à la moyenne. Ceci permettrait d'affiner les recommandations sur les génotypes à privilégier ou à éliminer dans la population actuelle des vergers sous abri.

## Conclusion et recommandations opérationnelles

Actuellement, pour des raisons de disponibilité de semences, tous les plants de MEH au Québec sont produits par bouturage. La production de pieds-mères de MEH se heurte à un problème d'hétérogénéité importante dans le gabarit des plants, notamment en raison de la présence de plants chétifs sur lesquels il est impossible de prélever des tigelles à bouturer. Une telle hétérogénéité pose un défi important dans la gestion des cultures afin d'atteindre les objectifs de production de tigelles.

Différentes causes peuvent être à l'origine de ce problème. Cette première étude a permis de montrer que l'hétérogénéité observée ne tire pas son origine de la régie d'irrigation, mais qu'elle est plutôt reliée au lot de semences. En effet, bien que tous les plants aient été soumis aux mêmes conditions optimales de lumière et de température dans la serre durant l'essai, la proportion de plants chétifs variait significativement entre les lots.

Avec la stratégie actuelle de production de semences de MEH (mélange de pollen dont la composition est variable selon les années, impossibilité de connaître avec exactitude quel pollen est à l'origine des graines, proportions différentes des clones dans le mélange de pollen, mélange des cônes avant l'extraction des graines, etc.), il se peut que la proportion de plants chétifs soit variable selon les années. Par exemple, cette proportion pourra être importante pendant une année semencière donnée, mais faible pendant une autre. Tout dépendra de la présence, ou pas, de combinaisons

génétiques défavorables dans les descendances. Ceci a d'ailleurs été observé dans le cas de l'apparition de plants à têtes multiples chez l'épinette noire (*Picea mariana* Mill. B.S.P., COLAS *et al.* 2004).

Plusieurs hypothèses peuvent être émises pour expliquer la présence de plants chétifs :

- **Effet de combinaisons génétiques défavorables** : L'hybridation interspécifique est toujours un défi puisque l'on met en présence des génotypes qui, naturellement, ne seraient pas en contact. Même si l'on constate un effet bénéfique de telles combinaisons par la vigueur hybride, l'hybridation peut accroître la fréquence d'expression de gènes défavorables. La caractérisation de croisements biparentaux permettrait d'identifier ceux qui sont générateurs de plants chétifs.
- **Effet de la température** : Le fait que la proportion de plants chétifs soit plus faible dans la population opérationnelle de 2012, qui est différente de celle produite en 2011, nous laisse croire qu'une meilleure ventilation de la serre (donc des écarts de températures moins importants) lors de la croissance des plants pourrait limiter l'arrêt de croissance qui entraîne l'apparition des plants chétifs. Toutefois, il faudra vérifier cette hypothèse en cultivant les mêmes lots que ceux utilisés dans la présente étude.

Le tableau 7 résume nos recommandations pour limiter l'occurrence de plants chétifs.

**Tableau 7.** Recommandations de modifications de pratiques afin de limiter et mieux comprendre l'occurrence de la présence de plants chétifs parmi les populations de MEH.

Approches opérationnelles actuelles	Approches recommandées
<b>POLLINISATION</b>	
Pollinisation de masse, mélange de pollen variable au cours de la même année, non équilibré (proportions variables des différents clones).	<ol style="list-style-type: none"> <li>1- Pollinisation de masse, mélange de pollen uniforme pour une même année, composition équilibrée.</li> <li>2- Caractérisation des croisements : pollinisation par croisements dirigés entre les différents génotypes de la population 20-20.</li> </ol>
<b>RÉCOLTE DES CÔNES ET EXTRACTION DES GRAINES</b>	
Récolte par arbre mère. Entreposage séparé. Extraction après regroupement par espèce mère en fonction de l'âge des greffes (= niveau d'amélioration).	<ol style="list-style-type: none"> <li>1- Récolte par arbre mère. Entreposage séparé. Extraction séparée par arbre mère.</li> <li>2- Caractérisation des croisements : récolte et extraction séparée par croisement.</li> </ol>
<b>ENSEMENCEMENT</b>	
Ensemencement séparé par lot (espèce et âge des greffes).	<ol style="list-style-type: none"> <li>1- Ensemencement séparé par arbre mère.</li> <li>2- Caractérisation des croisements : ensemencement séparé par croisement.</li> </ol>

Afin d'identifier des combinaisons génétiques défavorables, des croisements dirigés entre différents clones de la population opérationnelle du CSFB seraient à privilégier. La récolte des cônes et les extractions des graines seraient effectuées séparément par croisement, tout comme l'ensemencement des plants. Certes, ceci représente un travail très important, mais ce serait la seule façon fiable de détecter des combinaisons génétiques défavorables afin d'éliminer les génotypes générateurs de plants chétifs.

Des études complémentaires sont en cours et à venir, afin de mieux comprendre le phénomène de la

production de plants chétifs dans les descendance de MEH. Elles pourraient conduire à la recommandation de cultiver les pieds-mères séparément, par famille uniparentale. Ainsi, le pépiniériste pourra gérer plus facilement des populations, certes de petite taille, mais uniformes.

Une meilleure connaissance du phénomène d'apparition des plants chétifs est d'autant plus indispensable qu'il est prévu que d'ici quelques années, les plants de MEH soient produits uniquement à partir de graines, en raison de l'expansion du verger hors sol dédié à la production de graines de MEH.

## Références bibliographiques

- ÅGREN, G.I., 1985. *Theory for growth of plants derived from the nitrogen productivity concept*. *Physiol. Plant.* 64: 17-28.
- BALDET, P. et J. CONCHE, 2007. *Larch seed extraction improvement, a finalized project from preliminary studies to operational transfer in French forest seed industry*. Dans : *Integrated research activities for supply of improved larch to tree planting: tree improvement, floral biology and nursery production*. Actes de LARIX 2007 Symposium international du groupe de travail de l'IUFRO – S2.02.07 (Larch breeding and genetic resources). 16 au 21 septembre, 2007. Saint-Michel-des-Saints et Québec, Québec. p. 57. [<ftp://ftp.mrnf.gouv.qc.ca/Public/Bibliointer/Mono/2011/12/0971348.pdf>].
- BOLGHARI, H.A. et V. BERTRAND, 1984. *Tables préliminaires de production des principales essences résineuses plantées dans la partie centrale du sud du Québec*. Gouvernement du Québec, Ministère de l'Énergie et des Ressources, Service de la recherche (Terres et Forêts). Mémoire de recherche forestière n° 79. 392 p. [[www.mrn.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Divers/Memoire79.pdf](http://www.mrn.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Divers/Memoire79.pdf)].
- BONNET-MASIMBERT, M., P. BALDET, L.E. PÂQUES et G. PHILIPPE, 1998. *From flowering to artificial pollination in larch for breeding and seed orchard production*. *For. Chron.* 74(2): 195-202.
- CALAMA, R. et G. MONTERO, 2005. *Multilevel linear mixed model for tree diameter increment in stone pine (Pinus pinea): a calibrating approach*. *Silvæ Fenn.* 39(1): 37-54.
- CARLES, S., M. LAMHAMED, J. BEAULIEU, D. STOWE et H. MARGOLIS, 2012. *Genetic parameters of morphological and physiological characteristics of containerized white spruce (Picea glauca [Moench.] Voss) seedlings*. *Tree Genet. Genomes* 8(1): 39-51.
- CARLSON, C.E., 1994. *Germination and growth of western larch (Larix occidentalis), alpine larch (Larix lyallii), and their reciprocal hybrids*. *Can. J. For. Res.* 24(5): 911-916.
- CASTRO, J., 1999. *Seed mass versus seedlings performance in Scots pine: a maternally dependent trait*. *New Phytol.* 144(1): 153-161.
- 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.
- COLAS, F., M.S. LAMHAMED et A. RAINVILLE, 2004. *Dossier Production de plants issus de boutures à Saint-Modeste. Commentaires et éléments de réflexion*. Direction de la recherche forestière. Document interne. 18 p.
- COLAS, F., M. PERRON, D. TOUSIGNANT, C. PARENT, M. PELLETIER et P. LEMAY, 2008. *A novel approach for the operational production of hybrid larch seeds under northern climatic conditions*. *For. Chron.* 84(1): 95-104.
- CÔTÉ, P., R. TITTLER, C. MESSIER, D.D. KNEESHAW, A. FALL et M.-J. FORTIN, 2010. *Comparing different forest zoning options for landscape-scale management of the boreal forest: Possible benefits of the TRIAD*. *For. Ecol. Manage.* 259(3): 418-427.
- CRANE, J.L.J., D.I. DICKMANN et J.A. FLORE, 1983. *Photosynthesis and transpiration by young Larix kaempferi trees: C<sub>3</sub> responses to light and temperature*. *Physiol. Plant.* 59: 635-640.
- CZABATOR, F.J., 1962. *Germination value: an index combining speed and completeness of pine seed germination*. *For. Sci.* 8(4): 386-396.
- FARMER, R.E., Jr., 1997. *Seed ecophysiology of temperate and boreal zone forest trees*. St. Lucie Press, Delray Beach, FL (États-Unis). 253 p.
- GAGNON, J., 2011. *Évaluation de l'efficacité de la fertilisation foliaire d'urée sur la concentration foliaire en azote des plants d'épinette noire en récipients 2+0*. Dans : COLAS, F. et M.S. LAMHAMED (éds). *Production de plants forestiers au Québec : la culture de l'innovation*. Colloque de transfert de connaissances et de savoir-faire. 5 octobre 2011. Québec, Québec. Gouvernement du Québec, Ministère des Ressources naturelles et de la Faune. p. 97-106. [[www.mrn.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Gagnon-Jean/Recueil-resume-evaluation-carrefour2011.pdf](http://www.mrn.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Gagnon-Jean/Recueil-resume-evaluation-carrefour2011.pdf)].
- GAUCHAT, M.E. et L.E. PÂQUES, 2011. *Indirect prediction of bud flushing from ex situ observation in hybrid Larch (Larix decidua x L. kaempferi) and their parents*. *Environ. Exp. Bot.* 70(2-3): 121-130.

- GIRARD, D., J. GAGNON et C.-G. LANGLOIS, 2001. *Plantec : un logiciel pour gérer la fertilisation des plants dans les pépinières forestières*. Gouvernement du Québec, Ministère des Ressources naturelles, Direction de la recherche forestière. Note de recherche forestière n° 111. 8 p. [[www.mrn.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Gagnon-Jean/Note111.pdf](http://www.mrn.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Gagnon-Jean/Note111.pdf)].
- GIRARD, D., J. GAGNON et M.S. LAMHAMEDI, 2011. *IRREC : un système informatisé de calcul des besoins en irrigation pour les plants produits en récipients dans les pépinières forestières du Québec*. Gouvernement du Québec, Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Direction de la recherche forestière. Mémoire de recherche forestière n° 162. 54 p. [[www.mrn.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Gagnon-Jean/Memoire162.pdf](http://www.mrn.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Gagnon-Jean/Memoire162.pdf)].
- GOWER, S.T., B.D. KLOEPEL et P.B. REICH, 1995. *Carbon, nitrogen, and water use by larches and co-occurring evergreen conifers*. Dans : OGDEN, U.T. (éd.). *Symposium on ecology and management of Larix forests: a look ahead*. 5-9 octobre 1992, Whitefish, MT (États-Unis). U.S.D.A., Forest Service, Intermountain Research Station. General technical report INT-GTR-319. p. 110-117.
- GROS-LOUIS, M.-C., J. BOUSQUET, L.E. PÂQUES et N. ISABEL, 2005. *Species-diagnostic markers in Larix spp. based on RAPDs and nuclear, cpDNA, and mtDNA gene sequences, and their phylogenetic implications*. *Tree Genet. Genomes* 1(2): 50-63.
- HÅKANSSON, A., 1960. *Seed development in Larix*. *Bot. Not.* 113(1): 29-40.
- HEISKANEN, J., 1995. *Irrigation regime affects water and aeration conditions in peat growth medium and the growth of containerized Scots pine seedlings*. *New For.* 9: 181-195.
- ISIK, F., B. LI, J. FRAMPTON et B. GOLDFARB, 2004. *Efficiency of seedlings and rooted cuttings for testing and selection in Pinus taeda*. *For. Sci.* 50: 44-53.
- ISTA, 2009. *Règles Internationales pour les Essais de Semences 2009*. Édité par l'Association Internationale d'Essais de Semences. Bassersdorf (Suisse).
- KLOEPEL, B.D., S.T. GOWER, I.W. TREICHEL et S. KHARUK, 1998. *Foliar carbon isotope discrimination in Larix species and sympatric evergreen conifers: a global comparison*. *Oecologia* 114(2): 153-159.
- KOUBAA, A. et T. ZHANG, 2009. *Chapitre 9. Mélèzes exotiques. Larix decidua Mill. et Larix kaempferi (Lamb.) Carrière*. Dans : KOUBAA, A. et T. ZHANG (éds). *Les résineux de l'Est du Canada : écologie forestière, caractéristiques, transformation et usages*. FPInnovations, Québec, Québec. Publication spéciale SP-526F.
- KOWALCZYK, J., 2002. *Analysis of accuracy of phenotypic selections on european larch half-sib progeny test results*. Dans : PÂQUES, L.E. (éd.). *Amélioration du mélèze (Larix sp.) pour une meilleure croissance, architecture et qualité du bois*. 16-21 septembre 2002. Gap (Hautes-Alpes, France). INRA. p. 95-103.
- KRAMER, P.J. et T.T. KOZLOWSKI, 1979. *Physiology of woody plants*. Academic Press, New York, NY (États-Unis). 811 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 : 4<sup>e</sup> *Atelier sur la production de plants forestiers au Québec. Facteurs et techniques culturales influençant le développement racinaire des plants en pépinière forestière*. 15-16 mars 2006, Sainte-Foy, Québec. Ministère des Ressources naturelles et de la Faune. 2 p. [[www.mrn.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Lamhamedi-Mohammed/4e-atelier-principaux-facteurs.pdf](http://www.mrn.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. Forest.* 51: 529-551.
- LAMHAMEDI, M.S., P.Y. BERNIER et J.A. FORTIN, 1992. *Hydraulic conductance and soil water potential at the soil-root interface of Pinus pinaster seedlings inoculated with different dikaryons of Pisolithus sp.* *Tree Physiol.* 10(3): 231-244. [<http://treephys.oxfordjournals.org/content/10/3/231.full.pdf+html>].
- LAMHAMEDI, M.S., H. CHAMBERLAND, P.Y. BERNIER et F.M. TREMBLAY, 2000a. *Clonal variation in morphology, growth, physiology, anatomy and ultrastructure of container-grown white spruce somatic plants*. *Tree Physiol.* 20: 869-880. [<http://treephys.oxfordjournals.org/content/10/3/231.full.pdf+html>].

- LAMHAMEDI, M.S., G. LAMBANY, M. RENAUD, L. VEILLEUX et S. PLAMONDON, 2000b. *Gestion de l'irrigation en pépinière et évaluation des semis d'épinette blanche produits dans les récipients à parois ajourées*. Gouvernement du Québec, Ministère de Ressources naturelles, Direction de la recherche forestière. Mémoire de recherche forestière n° 138. 36 p. [[www.mrn.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Lamhamed-Mohammed/Memoire138.pdf](http://www.mrn.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Lamhamed-Mohammed/Memoire138.pdf)].
- LAMHAMEDI, M.S., H.A. MARGOLIS, M. RENAUD, L. VEILLEUX et I. AUGER, 2003. *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., F. COLAS et D. TOUSIGNANT, 2005. *Caractérisation de la croissance des pieds-mères d'épinette blanche issus de croisements dirigés : 1- Approche méthodologique*. Gouvernement du Québec, Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Direction de la recherche forestière. Avis technique. 10 p. [[www.mrn.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Lamhamed-Mohammed/Avis-techn-caracterisation.pdf](http://www.mrn.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Lamhamed-Mohammed/Avis-techn-caracterisation.pdf)].
- 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.
- LAMHAMEDI, M.S., M. RENAUD, P. DESJARDINS et L. VEILLEUX, 2009. *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*. Gouvernement du Québec, Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Direction de la recherche forestière. Mémoire de recherche forestière n° 154. 28 p. [[www.mrn.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Lamhamed-Mohammed/Memoire154.pdf](http://www.mrn.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Lamhamed-Mohammed/Memoire154.pdf)].
- LAROPPE, E., C. MULLER et L.E. PÂQUES, 2002. *Quality improvement of European larch seedlots by water soaking*. Dans : PÂQUES, L.E. (éd.). *Amélioration du mélèze (Larix sp.) pour une meilleure croissance, architecture et qualité du bois*. Symposium International. 16-21 septembre 2002. Gap (Hautes-Alpes, France). INRA. p. 244-249.
- LEE, S., 2003. *Breeding hybrid larch in Britain*. Forestry Commission, Edinburgh (Royaume-Uni). Information Note FCIN52. 4 p. [[www.forestry.gov.uk/PDF/fcin52.pdf/\\$FILE/fcin52.pdf](http://www.forestry.gov.uk/PDF/fcin52.pdf/$FILE/fcin52.pdf)].
- LITTELL, R.C., W.S. STROUP et R.J. FREUND, 2002. *SAS for linear models*. 4<sup>th</sup> Edition. SAS Institute Inc., Cary, NC (États-Unis). 492 p.
- LOGAN, K.T., 1966. *Growth of tree seedlings as affected by light intensity II. Red pine, white pine, jack pine, and eastern larch*. Department of Forestry Publication. Ottawa, Ontario (Canada). 19 p.
- OWENS, J.N., 1992. *Reproductive biology of larch*. Dans : OGDEN, U.T. (éd.). *Symposium on ecology and management of Larix forests: a look ahead*. 5-9 octobre 1992, Whitefish, MT (États-Unis). U.S.D.A., Forest Service, Intermountain Research Station. General technical report INT-GTR-319. p. 97-109.
- OWENS, J.N. et T. KITTIRAT, 2004. *Is Western larch a poor seed producer in natural stands and seed orchards?* Tree Seed Working Group News Bulletin 40: 14-19. [[www.for.gov.bc.ca/ht/publications/tswg/TSWGNewsbulletin40.pdf](http://www.for.gov.bc.ca/ht/publications/tswg/TSWGNewsbulletin40.pdf)].
- PÂQUES, L.E., 1989. *A critical review of larch hybridization and its incidence on breeding strategies*. Ann. Sci. Forest. 46(2): 141-153.
- PÂQUES, L.E., 1992. *Les mélèzes*. Dans : GALLAIS, A. et H. BANNEROT (éds.). *Amélioration des espèces végétales cultivées : objectifs et critères de sélection*. Institut national de la recherche agronomique, Paris (France). p. 720-731.
- PÂQUES, L.E., 2001. *Un programme d'amélioration génétique ambitieux*. Dans : RIOU-NIVERT, P. (éd.). *Le mélèze*. IDF. Paris (France). p. 18-27.
- PÂQUES, L.E., 2002. *Heterosis in interspecific hybrids between european and japanese larch*. Dans : PÂQUES, L.E. (éd.). *Amélioration du mélèze (Larix sp.) pour une meilleure croissance, architecture et qualité du bois*. Symposium International. 16-21 septembre 2002. Gap (Hautes-Alpes, France). INRA: p. 155-163.
- PÂQUES, L.E., 2004. *Roles of European and Japanese larch in the genetic control of growth, architecture and wood quality traits in interspecific hybrids (Larix x eurolepis Henry)*. Ann. For. Sci. 61(1): 25-33.
- PÂQUES, L.E., 2009. *Growth rhythm parameters as components of hybrid vigour in young seedlings of hybrid larch (Larix decidua x L. kaempferi)*. Silvae Genet. 58(1-2): 42-53.

- PÂQUES, L.E., E. FOFFOVÁ, B. HEINZE, M.A. LELU-WALTER, M. LIESEBACH et G. PHILIPPE, 2013. *Larches* (*Larix* sp.). Dans : PÂQUES L.E. (éd.). *Forest tree breeding in Europe: Current state-of-the-art and perspectives*. Série *Managing Forest Ecosystems*, Volume 25. Springer, Dordrecht (Pays-Bas), p. 13-122. DOI 10.1007/978-94-007-6145-9\_2.
- PELLIGER, V., M. CAZET, M. VERGER et L.M. RIVIÈRE, 1998. *Effect of stock plant lighting on bulk vegetative propagation of hybrid larch* (*Larix x eurolepis* Henry). *For. Ecol. Manage.* 102: 323-332.
- PERKS, M., A. HARRISON, H. MC KAY et J. MORGAN, 2006. *An update on nursery propagation and establishment best practice for larch in Britain*. Forestry Commission. Edinburgh (Royaume-Uni). Information note FCIN080. 6 p. [[www.forestry.gov.uk/pdf/fcin080.pdf/\\$file/fcin080.pdf](http://www.forestry.gov.uk/pdf/fcin080.pdf/$file/fcin080.pdf)].
- PERRON, M., 2008. *A strategy for the second breeding cycle of Larix x marschlinii in Québec, Canada including experiments to guide interspecific tree breeding programme*. *Silvae Genet.* 57(4-5): 282-291.
- PERRON, M., 2010. *Résultats de la sélection des parents en vue de la deuxième génération d'amélioration du mélèze hybride (L. x marschlinii Coaz.) au Québec*. Gouvernement du Québec, Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Direction de la recherche forestière. Mémoire de recherche forestière n° 157. 41 p. [[www.mrn.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Perron-Martin/Memoire157.pdf](http://www.mrn.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Perron-Martin/Memoire157.pdf)].
- PHILIPPE, G. et P. BALDET, 1997. *Electrostatic dusting: an efficient technique of pollination in larch*. *Ann. Sci. For.* 54: 301-310.
- RAINVILLE, A. et J. BEAULIEU, 2007. *Tirer profit d'une espèce à haut rendement : 40 années d'efforts intégrés et continus en amélioration génétique de l'épinette blanche*. Dans : *Colloque de transfert de connaissances - Des plants aux plantations : techniques, technologies et performances*. 19 septembre 2007. Québec, Québec. Gouvernement du Québec, Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Direction de la recherche forestière et Direction générale de la production des pépinières et des stations piscicoles. p. 7-10. [<ftp://ftp.mrnf.gouv.qc.ca/Public/Bibliointer/Mono/2011/10/0950099.pdf>].
- RIOU-NIVERT, P., 2001. *Le mélèze. Les guides du sylviculteur*. IDF, Paris (France). 144 p.
- RUDOLF, P.O., 1974. *Larix Mill. Larch*. Dans : SHOPMEYER, C.S. (éd.). *Seeds of woody plants in the United States*. U.S.D.A., Forest Service. Agriculture Handbook n° 450. Washington, DC (États-Unis). p. 478-485.
- SAS INSTITUTE INC. 2009. *SAS/STAT® 9.2 User's Guide*. Second Edition. Cary, NC (États-Unis). SAS Institute Inc.
- SHEARER, R.C., 2008. *Larix P. Mill.* Dans : BONNER, F.T. et R.P. KARRFALT (éds). *The woody plant seed manual*. 3<sup>rd</sup> Edition. U.S.D.A., Forest Service. Agriculture Handbook n° 727. Washington, DC (États-Unis) p. 637-650. [[www.nsl.fs.fed.us/K&L%20genera.pdf](http://www.nsl.fs.fed.us/K&L%20genera.pdf)].
- SHIN, D. et D.F. KARNOSKY, 1995. *Factors affecting seed yield in Larix*. *Journal of Korean Forestry Society* 84(2): 507-217.
- SLOBODNIK, B. et H. GUTTENBERGER, 2000. *Ovule, megaspores, and female gametophyte formation in Larix decidua Mill* (Pinaceae). *Acta Biol. Cracov., Ser. Bot.* 42(2): 93-100.
- SLOBODNIK, B. et H. GUTTENBERGER, 2003. *Pollination mechanism of European Larch* (*Larix decidua*). *Biologia* (Bratislava) 58(1): 95-102.
- TIGABU, M. et P.C. ODÉN, 2004. *Simultaneous detection of filled, empty and insect infested seeds of three Larix species with single seed near-infrared transmittance spectroscopy*. *New For.* 27: 39-53.
- TOUSIGNANT, D., 1999. *La production de matériel amélioré génétiquement. Techniques de multiplication par la voie clonale (voie asexuée)*. Dans : Ressources Naturelles Canada, Service canadien des forêts, et Forêt Québec, Direction de la recherche forestière (éds). *L'amélioration génétique en foresterie : où en sommes-nous?* 28-30 septembre 1999. Rivière-du-Loup, Québec. p. 133-141.
- TOUSIGNANT, D. et M. RIOUX, 2002. *Le bouturage des résineux à la pépinière de Saint-Modeste (Québec, Canada) : 10 ans de recherche, de développement et d'innovations*. Dans : *Troisième rencontre du groupe de la Ste-Catherine*. 22-24 novembre 2000. Orléans (France). Cirad-INRA. p. 65-86.
- TOUSIGNANT, D. et A. STIPANICIC, 2000. *Larix marschlinii - Outline data sheet*. *Forestry Compendium Global Module* (Encyclopédie multimédia sur CD-ROM), CABI, 30 p.

VANCE, N.C. et S.W. RUNNING, 1985. *Light reduction and moisture stress: effects on growth and water relations of western larch seedlings*. Can. J. For. Res. 15(1): 72-77.

VEILLEUX, P., J.-Y. ALLARD, F. BART, M. BOULIANNE, D. LABRECQUE et F.N. PERREAULT, 2012. *Guide terrain. Inventaire de qualification des plants résineux cultivés en récipients*. Document de travail, livraison 2012. Gouvernement du Québec, Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Direction générale des pépinières et des stations piscicoles. 141 p.

WAHID, N., A. RAINVILLE, M.S. LAMHAMEDI, H.A. MARGOLIS, J. BEAULIEU et J. DEBLOIS, 2012. *Genetic parameters and performance stability of white spruce somatic seedlings in clonal tests*. For. Ecol. Manage. 270: 45-53.

WESTFALL, 1999. *Multiple comparisons and multiple tests using the SAS System*. SAS Institute Inc., Cary, NC (États-Unis). 416 p.



# Annexes

**Annexe 1.** Schéma du dispositif expérimental installé dans la serre. Chaque petit carré correspond à un récipient de 6 plants.

Bloc 1	5H11	5S11	1S11	1H11	3H11	3S11	2S11	2H11	4S11	4H11	6S11	6H11
	5H12	5S12	1S12	1H12	3H12	3S12	2S12	2H12	4S12	4H12	6S12	6H12
	5H13	5S13	1S13	1H13	3H13	3S13	2S13	2H13	4S13	4H13	6S13	6H13
	Table 1				Table 2				Table 3			
Bloc 2	1H21	1S21	3S21	3H21	5S21	5H21	6H21	6S21	2H21	2S21	4S21	4H21
	1H22	1S22	3S22	3H22	5S22	5H22	6H22	6S22	2H22	2S22	4S22	4H22
	1H23	1S23	3S23	3H23	5S23	5H23	6H23	6S23	2H23	2S23	4S23	4H23
	Table 1				Table 2				Table 3			
Bloc 3	6S31	6H31	3H31	3S31	4H31	4S31	5S31	5H31	2S31	2H31	1H31	1S31
	6S32	6H32	3H32	3S32	4H32	4S32	5S32	5H32	2S32	2H32	1H32	1S32
	6S33	6H33	3H33	3S33	4H33	4S33	5S33	5H33	2S33	2H33	1H33	1S33
	Table 1				Table 2				Table 3			

H = régie humide (45-50 % v/v, en bleu)

S = régie sèche (25-30 % v/v, en rouge)

Identification des récipients. Chaque combinaison de chiffres et de lettres correspond à : Lot Régie Bloc Répétition.

**Annexe 2.** Calcul de la quantité d'eau à ajouter pour le maintien de la teneur en eau des deux régies d'irrigation.

Pour chaque combinaison de bloc et de régie, la masse moyenne des récipients (6 cavités, 1 300 cm<sup>3</sup>/cavité) a été calculée et a servi à déterminer le volume d'eau ( $Q$ , ml) à ajouter à chacune des cavités pour obtenir la teneur en eau (% v/v) ciblée :

$$Q = \frac{(Mr - Mc)}{6}$$

où

$Mr$  est la masse moyenne des 18 récipients du bloc/régie d'irrigation (g), et

$Mc$  est la masse du récipient ciblée pour atteindre la régie d'irrigation (g), avec  $Mc = 5\,600$  g pour la régie humide (45 % v/v) et  $Mc = 4\,500$  g pour la régie sèche (30 % v/v).

Dans ces calculs, nous considérons que la masse des semis est négligeable par rapport à la masse totale du récipient.

**Annexe 3.** Dates de fertilisation, type de fertilisant utilisé et quantité d'éléments (N, P et K) reçus par plant de MEH durant la saison de croissance, pour les deux régies d'irrigation.

Dates	Fertilisant	mg N/plant	mg P/plant	mg K/plant
2011-03-17	20-20-20	5,00	2,20	4,15
2011-03-24	34-0-0	1,57	0,00	0,00
2011-03-31	20-10-20	1,90	0,40	1,57
2011-04-07	34-0-0	2,27	0,00	0,00
2011-04-14	34-0-0	2,71	0,00	0,00
2011-04-21	20-8-20	4,26	0,75	3,50
2011-04-28	8-20-30	0,56	0,61	1,74
2011-05-05	15-30-15	6,18	5,44	5,15
2011-05-12	34-0-0	6,80	0,00	0,00
2011-05-19	15-30-15	7,41	6,52	6,18
2011-05-26	34-0-0	7,98	0,00	0,00
2011-06-02	34-0-0	8,46	0,00	0,00
2011-06-09	34-0-0	8,80	0,00	0,00
Total par plant		63,90	15,92	22,29

**Annexe 4.** Statistiques descriptives pour la hauteur des plants de MEH pour chaque combinaison de régie d'irrigation (H : humide = 40-45 % v/v, S : sèche = 25-30 % v/v) et de lot, et ce, pour chacune des dates de mesurage.

Date de mesurage	Régie	Lot	Nombre de plants mesurés	Hauteur (cm)				
				Moyenne	Erreur type	Min.	Max.	Coefficient de variation (%)
2011-03-31	H	1	54	3,00	0,17	0,90	6,00	42,07
		2	54	2,05	0,13	0,70	4,30	46,17
		3	51	3,09	0,18	0,60	5,40	41,04
		4	52	3,71	0,19	0,50	6,50	37,30
		5	54	2,76	0,13	0,60	5,10	35,85
		6	54	3,16	0,16	0,80	5,70	36,16
	S	1	54	2,73	0,18	0,50	7,20	47,37
		2	53	1,78	0,10	0,50	3,50	41,11
		3	50	3,11	0,20	0,50	5,70	45,39
		4	49	3,27	0,18	1,10	6,30	37,74
		5	54	2,79	0,15	1,20	5,30	38,71
		6	54	3,33	0,19	0,60	6,20	42,13
2011-04-14	H	1	54	3,65	0,25	1,10	8,60	49,61
		2	54	2,38	0,17	0,60	7,20	52,63
		3	51	3,29	0,23	0,40	9,10	50,09
		4	51	4,24	0,23	1,60	9,70	39,00
		5	54	3,44	0,22	0,60	8,40	46,70
		6	54	3,51	0,16	1,10	5,60	34,39
	S	1	54	3,19	0,21	0,70	8,10	49,03
		2	53	2,08	0,14	0,50	5,60	47,32
		3	51	3,30	0,22	0,70	8,60	47,04
		4	49	3,83	0,29	0,50	9,90	53,18
		5	54	3,19	0,18	1,10	6,90	42,26
		6	54	3,68	0,23	0,70	9,00	45,03
2011-04-28	H	1	54	4,64	0,48	1,20	15,00	76,22
		2	54	2,93	0,29	0,60	12,30	72,58
		3	51	3,73	0,30	0,30	11,60	58,20
		4	51	4,98	0,42	1,80	15,90	60,32
		5	54	4,15	0,41	0,50	14,70	72,02
		6	54	3,95	0,24	0,70	9,50	44,63
	S	1	54	4,01	0,36	0,60	13,00	66,39
		2	53	2,42	0,24	0,70	11,50	73,15
		3	50	3,92	0,36	0,60	15,20	64,10
		4	49	4,57	0,46	1,00	15,40	70,30
		5	54	3,58	0,30	1,10	12,20	62,45
		6	54	4,13	0,31	1,10	12,50	54,58
2011-05-12	H	1	54	6,77	0,84	1,00	23,30	91,33
		2	54	4,48	0,57	0,70	17,20	93,02
		3	51	4,31	0,45	0,70	17,60	74,10
		4	51	6,46	0,74	1,50	22,70	81,27
		5	54	5,84	0,76	0,70	24,30	95,97
		6	54	5,63	0,52	1,00	19,70	68,19
	S	1	54	5,70	0,65	0,80	19,20	83,78
		2	53	3,45	0,46	1,00	18,30	96,52
		3	50	5,01	0,66	1,20	23,00	92,93
		4	50	5,66	0,77	1,00	23,20	96,41
		5	54	4,82	0,55	1,20	18,80	83,24
		6	54	5,89	0,62	1,20	21,30	76,93
2011-05-27	H	1	54	10,22	1,21	1,30	30,20	87,28
		2	54	7,24	0,96	1,00	23,70	97,44
		3	51	5,41	0,73	0,80	24,90	96,16
		4	51	9,14	1,27	1,70	42,80	98,96
		5	54	8,60	1,10	0,80	31,20	93,86
		6	54	8,07	0,84	1,10	28,30	76,73
	S	1	54	8,17	1,01	1,20	24,80	90,86
		2	53	6,39	0,81	1,20	23,90	92,33
		3	50	6,27	0,99	1,20	28,90	112,10
		4	49	7,70	1,08	1,30	28,40	98,37
		5	54	6,72	0,86	1,20	25,60	93,56
		6	54	8,67	0,91	1,70	27,60	77,49

**Annexe 5.** Moyennes ajustées, erreur type et résultats du test de comparaisons multiples pour le nombre de branches latérales de plus de 1 cm et pour la proportion de plants ayant un bourgeon fermé, pour tous les lots de MEH et sur l'ensemble de la saison de croissance, d'après les analyses de la variance. Horizontalement, les lettres distinctes identifient les différences significatives entre les lots au seuil  $\alpha = 5\%$ .

Date	Nombre de branches latérales de plus de 1 cm											
	Lot 1		Lot 2		Lot 3		Lot 4		Lot 5		Lot 6	
	Moyenne	Erreur type	Moyenne	Erreur type	Moyenne	Erreur type	Moyenne	Erreur type	Moyenne	Erreur type	Moyenne	Erreur type
2011-03-31	0,43 a	0,09	0,08 b	0,04	0,52 a	0,11	0,68 a	0,13	0,38 ab	0,08	0,77 a	0,14
2011-04-14	0,48 a	0,10	0,08 b	0,04	0,47 a	0,10	0,81 a	0,14	0,46 a	0,10	0,79 a	0,14
2011-04-28	0,46 ab	0,10	0,11 b	0,04	0,47 ab	0,10	0,82 a	0,14	0,46 ab	0,10	0,76 a	0,13
2011-05-12	0,70 ab	0,13	0,17 c	0,05	0,44 bc	0,10	1,12 a	0,18	0,71 ab	0,13	1,04 ab	0,17
2011-05-27	1,67 ab	0,24	0,93 b	0,16	1,01 ab	0,17	1,68 ab	0,25	1,50 ab	0,22	1,99 ab	0,28
Date	Proportion de plants ayant un bourgeon fermé (%)											
	Lot 1		Lot 2		Lot 3		Lot 4		Lot 5		Lot 6	
	Moyenne	Erreur type	Moyenne	Erreur type	Moyenne	Erreur type	Moyenne	Erreur type	Moyenne	Erreur type	Moyenne	Erreur type
2011-03-31	54,7 a	8	45,6 a	8	75,1 a	6	61,8 a	8	48,5 a	8	62,7 a	7
2011-04-14	72,3 a	7	66,8 a	7	87,8 a	4	82,0 a	5	74,7 a	6	76,2 a	6
2011-04-28	66,8 a	7	70,7 a	7	85,6 a	5	77,0 a	6	77,4 a	6	71,3 a	7
2011-05-12	51,0 ab	8	50,5 ab	8	79,3 a	6	69,3 ab	7	55,7 ab	8	40,2 b	8
2011-05-27	34,1 ab	7	26,8 ab	7	51,4 a	8	34,2 ab	7	42,5 ab	8	16,9 b	5

**Annexe 6.** Proportion de plants avec une dominance apicale parmi les 6 lots de plants de MEH sur l'ensemble de la saison de croissance, selon la régie d'irrigation (H : humide = 40-45 % v/v, S : sèche = 25-30 % v/v).

Proportion de plants avec dominance apicale (%)						
		Date				
Régie	Lot	2011-03-31	2011-04-14	2011-04-28	2011-05-12	2011-05-27
H	1	100	100	98	100	100
	2	100	100	100	98	100
	3	94	94	94	94	98
	4	98	96	98	96	98
	5	100	100	100	98	98
	6	96	94	96	94	94
S	1	94	93	96	96	96
	2	100	100	100	100	98
	3	88	92	92	94	98
	4	96	96	96	98	94
	5	98	96	98	98	96
	6	96	98	98	85	98





Depuis plus de 30 ans, les projets de R-D en production de semences et plants de la Direction de la recherche forestière ont pour but d'améliorer la qualité morpho-physiologique des plants utilisés dans le programme de reboisement du Québec. L'équipe réalise des activités de transfert de connaissances et fournit un appui scientifique et technique continu aux producteurs de plants. Le mélèze hybride est une essence à croissance rapide offrant d'excellents rendements en plantation. La production de mélèze hybride se heurte à un problème d'uniformité de gabarit des plants qui nuit à l'atteinte des objectifs de la filière opérationnelle de bouturage de cette espèce. Ce mémoire de recherche vise à mieux cerner les causes de l'hétérogénéité de la croissance en hauteur des pieds-mères de mélèze hybride et à émettre des recommandations opérationnelles afin de diminuer la présence de plants chétifs.

**Ressources  
naturelles**

**Québec** 