Optimisation de l'intégration opérationnelle des clones somatiques dans la filière de bouturage de l'épinette blanche (*Picea glauca*) au Québec

Mohammed S. Lamhamedi – Josianne DeBlois – Mario Renaud – Jean Beaulieu

NDLR : À la demande du ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs du Québec, Direction de la recherche forestière et Direction générale de la production de semences et de plants forestiers, et avec l'accord des auteurs, nous publions une version corrigée de cet article, paru dans le numéro 2-2017 de la Revue forestière française.

novembre 2019

Optimisation de l'intégration opérationnelle des clones somatiques dans la filière de bouturage de l'épinette blanche (*Picea glauca*) au Québec

Mohammed S. Lamhamedi – Josianne DeBlois – Mario Renaud – Jean Beaulieu

L'Épinette blanche (*Picea glauca* [Moench.] Voss) est une espèce largement distribuée en Amérique du Nord, dont l'aire de répartition couvre l'ensemble du Canada et le nord des États-Unis (Nienstaedt et Zasada, 1990). Cette essence est reconnue pour sa croissance relativement rapide et sa densité de bois élevée (Corriveau et Beaulieu, 1987 ; Zhang *et al.*, 2004 ; Beaulieu *et al.*, 2006), ainsi que pour la grande variabilité génétique (Khalil, 1985 ; Li *et al.*, 1997) de ses caractéristiques morphologiques et physiologiques (Li *et al.*, 1993 ; Lamhamedi *et al.*, 2000).

Au Québec, pendant la période 2001-2012, la moyenne annuelle de production par les 19 pépinières forestières (13 privées et 6 gouvernementales) était de 130 millions de plants dont près de 23 millions (18 %) sont des plants d'Épinette blanche (Richard, 2015). Ces plants pouvaient être issus de semences ou de boutures. Ainsi, en 2015, plus de 5,3 millions de plants issus de boutures ont été produits dont plus de 4 millions d'Épinette blanche (Richard, 2015). Ces boutures sont issues de croisements dirigés, c'est-à-dire des familles biparentales dont les parents (mère et père) sont connus et rigoureusement sélectionnés pour leur haute productivité et leur gain génétique supérieur à celui des semences issues de vergers à graines (Beaulieu *et al.*, 2009).

Depuis 1989, les boutures échantillonnées et produites par les pieds mères des différents croisements dirigés d'Épinette blanche sont intégrées dans le bouturage de masse. Ce dernier consiste à mélanger les semences de différentes familles biparentales, souvent dans des proportions variables, pour la production des pieds mères dont sont issus des plants de fortes dimensions (Lamhamedi *et al.*, 2005 ; Rioux *et al.*, 2007). Les boutures sont utilisées selon deux scénarios, soit une production à partir de boutures à un état turgescent ou dormant. Les boutures turgescentes sont récoltées lors de la deuxième saison de croissance après débourrement et élongation des branches latérales alors que les boutures dormantes sont prélevées en automne, soit à la fin de la deuxième saison de croissance après endurcissement et formation des bourgeons.

Le scénario actuel de production repose sur la réduction de la durée d'utilisation des pieds mères de manière à diminuer les coûts de production et à optimiser le taux d'enracinement des boutures de l'Épinette blanche. En effet, la réduction de vigueur et le vieillissement physiologique des pieds mères ont pour effet une diminution significative du taux d'enracinement des boutures (Tousignant et Rioux, 2002). Ainsi, dans le cas de l'Épinette blanche au Québec, un seul prélèvement de boutures est réalisé par pied mère avant que celui-ci soit envoyé au reboisement (Rioux *et al.*, 2007). Cette approche requiert l'utilisation d'un plus grand nombre de graines et les pieds mères ainsi produits doivent avoir une meilleure aptitude au bouturage. Il ressort donc que le recours au bouturage de masse de l'Épinette blanche, dont le gain génétique correspond à celui de la moyenne familiale uniquement, limite le développement de la foresterie clonale à cause

du faible rendement du nombre de boutures par pied mère (clone) obtenu y compris dans le cas du bouturage standard en cascades du même pied mère (Lamhamedi, 2010 ; van de Sype et Roman-Amat, 1998). À cela s'ajoute, par exemple, l'absence du contrôle de l'uniformité de l'architecture des parties aériennes (degré de branchaison, etc.) qui pourrait nuire à l'optimisation de la qualité des produits extraits du bois. De plus, l'enracinement des boutures de l'Épinette blanche est sous contrôle génétique et se distingue par une variabilité très prononcée aussi bien familiale qu'individuelle (Gravel-Grenier, 2009 ; Gravel-Grenier *et al.*, 2011).

Pour pallier les difficultés en matière du maintien de la juvénilité du même génotype à long terme, d'uniformité de l'architecture des parties aériennes (moins de branches, branches courtes et de faible diamètre à un âge avancé, etc.), du rendement de boutures par pied mère et de l'enracinement des boutures, l'embryogenèse somatique (ES) est la seule voie qui permette de multiplier le même génotype à l'infini de façon rapide tout en conservant ses caractéristiques juvéniles et phénotypiques grâce à la cryoconservation dans l'azote (– 198 °C) (Gupta *et al.*, 2005). Une fois l'évaluation des clones complétée dans les tests de clones, selon les traits désirés, et lorsque les clones ne posent aucun problème quant à leur multiplication par ES, il est alors possible de reproduire en nombre voulu les meilleurs clones à partir des tissus cryoconservés (Gupta *et al.*, 2005) en vue d'une production massive ou, par exemple, pour la production de pieds mères somatiques destinés à la filière de bouturage.

Avec les avancées tangibles spécifiques à l'intégration de l'embryogenèse somatique dans la filière de reboisement de l'Épinette blanche au Québec, c'est-à-dire de la semence à la plantation (Tremblay et Lamhamedi, 2006 ; Tremblay *et al.*, 2008 ; Rainville *et al.*, 2011*),* il s'avère nécessaire de quantifier les paramètres génétiques de pieds mères somatiques dans la filière de bouturage dont l'objectif est d'optimiser davantage l'utilisation des clones somatiques pour contribuer à augmenter la productivité forestière et la qualité du bois selon les superficies reboisées. Ainsi, la combinaison des techniques de l'embryogenèse somatique et du bouturage de façon complémentaire pourrait permettre le développement de la foresterie multiclonale, notamment dans les pépinières qui possèdent déjà les installations nécessaires et qui ont une grande expérience à l'échelle opérationnelle en bouturage (Rioux *et al.*, 2007 ; Tousignant *et al.*, 2007, 2008) et en ES (Tremblay et Lamhamedi, 2006 ; Tremblay *et al.*, 2008). Au Québec, cette combinaison de méthodes est mise en pratique depuis 2013 et le premier million de plants issus de boutures prélevées sur des pieds mères produits par embryogenèse somatique seront livrés en 2018 pour des fins de reboisement opérationnel. En effet, l'intégration de l'ES dans la filière de bouturage de l'Épinette blanche fait suite à nos travaux qui englobent notamment l'optimisation des techniques d'acclimatation sans recourir à la brumisation pour améliorer de façon significative le taux de survie (› 95 %) des clones somatiques de l'Épinette blanche lors de leur transfert en sol (Lamhamedi *et al.*, 2003), l'évaluation de la variabilité clonale, de la qualité morphophysiologique et de la performance des clones de l'Épinette blanche en pépinière (Lamhamedi *et al.*, 2000 ; Wahid *et al.*, 2012a) et en plantation (Rainville *et al.*, 2011 ; Wahid *et al.*, 2012b). D'autres travaux ont mis l'accent sur la détermination des paramètres génétiques, de la stabilité de la performance des clones et des corrélations génotypiques âge-âge « pépinière-plantation » (Wahid *et al.*, 2013), ainsi que sur l'évaluation de la qualité des semences produites par des clones somatiques (Colas et Lamhamedi, 2010, 2014). Certains travaux ont également porté sur l'utilisation des clones somatiques de l'Épinette de Norvège (*Picea abies* Karst.) comme pieds mères et ont démontré la présence d'une variabilité clonale très prononcée du nombre de boutures produites par pied mère somatique, du taux d'enracinement des boutures, du nombre d'apex racinaires et de la masse des racines des boutures (Lamhamedi et Tousignant, 2008).

Cependant, à notre connaissance, aucune étude n'a quantifié les paramètres génétiques de clones somatiques de l'Épinette blanche comme pieds mères pour la production de boutures à une échelle opérationnelle. De plus, peu de publications scientifiques (Lamhamedi et Tousignant, 2008) ont évalué l'effet potentiel des techniques d'ES sur l'enracinement des boutures prélevées sur des pieds mères somatiques d'Épinette blanche, ainsi que sur leur comportement en pépinière.

Ainsi, les objectifs de ce travail consistaient à :

— déterminer le degré de la variabilité des pieds mères somatiques de l'Épinette blanche en matière de croissance, de production de boutures et de leur enracinement ;

— évaluer les paramètres génétiques clonaux, notamment les variances et l'héritabilité des variables de croissance et de bouturage ;

— discuter les perspectives d'avenir quant à l'intégration optimale et graduelle des clones somatiques dans la filière de bouturage et ce, selon l'état d'avancement des connaissances scientifiques.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Matériel végétal

L'Épinette blanche est l'espèce dont le programme d'amélioration génétique est le plus avancé au Québec (Beaulieu *et al.*, 2009). Les clones somatiques de cette essence proviennent de 71 familles biparentales recommandées. L'approche retenue a consisté à produire 25 clones par famille pour les 50 meilleures d'entre elles et 15 pour les 21 autres. Pour évaluer l'intégration de l'ES à la filière de bouturage, 28 clones somatiques d'Épinette blanche ont été choisis aléatoirement dans le catalogue des clones parmi les 1 517 clones somatiques d'Épinette blanche en cours d'évaluation dans les tests clonaux (Rainville *et al.*, 2011 ; Wahid *et al.*, 2012b), un nombre de 1 445 a déjà été caractérisé en pépinière (Lamhamedi et Gravel-Grenier, 2012 ; Wahid *et al.*, 2012a). Ce catalogue contient des photos de tous les clones et des variables de croissance en pépinière (Lamhamedi et Gravel-Grenier, 2012).

Les plants somatiques utilisés dans cette étude ont été produits dans le laboratoire de l'ES et les installations de bouturage à la pépinière Saint-Modeste (Québec, Canada) où les premiers essais de production des plants somatiques remontent à 2001.

L'induction du tissu embryogène a été réalisée en utilisant des graines immatures (Hakman *et al.*, 1985) ou, pour 3 des 28 clones, des graines matures échantillonnées sur des cônes issus de différents croisements biparentaux dont la collecte a été effectuée vers la mi-juillet (par exemple embryon zygotique de 70 à 80 % de maturité). Cette étape a été suivie par d'autres phases, notamment la maintenance et la maturation du tissu embryogène, et la germination des embryons somatiques matures comparable à la germination de la graine (Tremblay et Tremblay, 1995a, 1995b ; Tremblay *et al.*, 2005). Cette dernière est caractérisée par l'initiation et le développement du système racinaire (Jain et Gupta, 2005 ; Tremblay *et al.*, 2005 ; Tremblay et Lamhamedi, 2006). La germination des embryons somatiques matures a été réalisée en vrac dans des pots en plastique contenant le milieu gélosé de germination modifié de Campbell et Durzan (1975), où notamment la dose de saccharose a été diminuée de moitié et sans ajout de régulateurs de croissance.

Après 12 semaines en milieu de germination, les plantules somatiques ont été acclimatées dans leurs pots d'origine pendant au moins cinq jours sans recourir à la brumisation, et ce en les adaptant progressivement aux conditions environnementales extérieures à l'aide de la création d'ouvertures jusqu'à l'enlèvement des couvercles des pots (Lamhamedi *et al.*, 2003). Cette étape favorise le développement sur les aiguilles d'une couche cireuse épicuticulaire qui assure une protection accrue des plants contre la dessiccation (Lamhamedi *et al.*, 2003).

Par la suite, dans une deuxième phase, les plantules ont été transférées en sol dans des conditions *ex vitro*, c'est-à-dire dans des cavités du conteneur modèle 15-320 (*IPL*, Saint-Damien, Québec, Canada ; 15 cavités, 320 cm^3 par cavité) remplies d'un substrat humecté à base de tourbe et de vermiculite (volume/volume ; tourbe : 80 %, vermiculite : 20 %) sous des conditions environnementales optimales en serre pour favoriser leur croissance ultérieure. Chaque conteneur

était identifié à l'aide de deux étiquettes : une étiquette collée au conteneur et une étiquette externe enfoncée dans une des cavités du conteneur, sur lesquelles le numéro du clone est bien indiqué.

Pendant la première semaine, une double ombrière a été utilisée, combinée aux passages fréquents d'une rampe d'arrosage mobile (Aquaboom, Industries Harnois, Saint-Thomas-de-Joliette, Québec, Canada) à raison d'environ un passage par heure, ce dernier étant ajusté selon les changements des variables environnementales (température, déficit de pression de vapeur, humidité relative, etc.). Le coefficient d'uniformité de cette rampe varie généralement entre 95 et 98 %, ce qui permet l'homogénéité de l'irrigation et réduit l'effet de la variabilité spatiale des teneurs en eau du substrat sur la croissance des plants (Lamhamedi *et al.*, 2006b). Les températures diurnes et nocturnes étaient maintenues respectivement à 25 ± 2 °C et 18 ± 2 °C. La photopériode a été fixée à 18 heures grâce à l'utilisation d'un éclairage d'appoint fourni par des lampes au sodium à haute pression de 400 W (Lumiponic inc., Montréal, Canada). Après acclimatation, le taux de survie des plants de tous les clones avoisinait 100 %.

Après un mois et demi en serre (mi-mars à fin avril 2010), les clones somatiques ont été transférés sous tunnel à l'extérieur, en pépinière forestière, pour continuer leur croissance en été et leur endurcissement en automne. À la fin de la saison automnale, les récipients ont été mis au sol et ont hiverné à l'extérieur, leur protection contre le gel hivernal étant assurée par la neige naturelle suivant la procédure de production de plants forestiers en place au Québec.

Croissance des pieds mères somatiques et évaluation du rendement en boutures

Après la fonte de la neige et le drainage du sol, les conteneurs ont été soulevés de terre et les plants ont été gérés selon les techniques normalisées de production (irrigation, fertilisation, traitements phytosanitaires, etc.) (Wahid *et al.*, 2012a). Pour les 28 clones, près de 24 500 plants ont été produits selon la méthode décrite ci-dessus à raison de 345 à 1 830 plants/clone et ce, selon le nombre d'embryons germés et produits par unité de tissu embryogène par clone. Dès le début du printemps 2011, les conteneurs des différents clones ont été aléatoirement installés sous un tunnel (mi-avril à mi-juin) couvert d'une toile de polyéthylène claire, afin de provoquer une augmentation de la température et du rayonnement photosynthétique actif (Lamhamedi *et al.*, 2011a), permettant ainsi un débourrement rapide des bourgeons et l'élongation des branches (boutures). Le dispositif expérimental utilisé correspond donc à un plan complètement aléatoire dans lequel chacun des conteneurs constitue une unité expérimentale.

Pour caractériser chacun des 28 clones somatiques comme pieds mères, cinq plants ou ramets par clone ont été aléatoirement sélectionnés dans cinq conteneurs à raison d'un plant par conteneur. Ensuite, trois variables ont été mesurées, soit la hauteur (cm), le nombre de branches (longueur ≥ 1 cm) et le nombre de boutures pouvant être prélevées (longueur : 5 à 7 cm). Le choix du nombre de 5 plants ou ramets par clone a été basé sur les résultats de plusieurs travaux (Isik *et al.*, 2005 ; Muranty *et al.*, 1996 ; Russell et Libby, 1986) qui ont montré que ce nombre de ramets par clone est suffisant pour caractériser de façon fiable la performance des clones. De plus, les plants de chaque clone d'Épinette blanche ont montré une bonne homogénéité (architecture de la partie aérienne, hauteur, etc.).

Enracinement des boutures issues de clones somatiques

Pour tous les conteneurs (15-320) de chacun des 28 clones, les boutures, d'une longueur de 5 à 7 cm, ont été prélevées vers la mi-juin sur les branches latérales de l'ensemble des pieds mères somatiques produits. Les boutures du même clone, mais provenant de pieds mères différents, ont toutes été regroupées, mélangées et distribuées aléatoirement dans les conteneurs pour l'enracinement.

Les boutures récoltées ont été insérées dans les cavités des conteneurs *IPL* 45-110 (45 cavités ; 110 cm^3 par cavité ; *IPL*®, Saint-Damien, Québec, Canada) à raison de trois boutures par cavité dans un substrat à base de tourbe et de perlite (50 % tourbe, 50 % perlite ; volume / volume). Chaque récipient était identifié à l'aide de deux étiquettes : une étiquette collée au récipient et une étiquette externe enfoncée dans une des cavités du récipient sur lesquelles le numéro du clone était bien indiqué. Selon le clone, le nombre de conteneurs était soit 8, 16 ou 24. À l'échelle opérationnelle, les boutures turgescentes échantillonnées doivent atteindre un degré de lignification suffisant pour favoriser leur enracinement. Cette lignification est évaluée à l'aide du ratio de matière sèche sur matière fraîche (RMSF). En effet, les RMSF des boutures turgescentes (par exemple bouturage herbacé) des différents clones respectaient les ratios ciblés à l'échelle opérationnelle pour le bouturage de l'Épinette blanche au Québec, soit 65 % ≤ RMSF ≤ 75 %.

L'enracinement des boutures turgescentes d'Épinette blanche, durant les 15 à 16 premières semaines (mi-juin à fin septembre), a été effectué à l'intérieur d'un tunnel doté d'une double enceinte permettant un excellent contrôle des conditions de lumière, de température, d'humidité relative de l'air et du déficit de pression de vapeur (Rioux *et al.*, 2007). Les conteneurs ont été distribués aléatoirement dans le tunnel. Les parois de ces doubles enceintes sont constituées d'une toile de polyéthylène blanc de 0,1016 mm d'épaisseur, transmettant de 50 à 55 % de la lumière incidente (Ginegar Plastic Products Ltd, Multi-layer greenhouse cover film, type UVA / White 45 %).

Une fois la période d'enracinement terminée, un échantillonnage aléatoire des boutures a été effectué dans chacun des conteneurs échantillonnés, à raison de huit cavités par conteneur, soit un total de 24 boutures par conteneur (huit cavités x trois boutures par cavité). Le nombre total de boutures par clone ayant servi au calcul du taux d'enracinement variait donc de 192 à 576. Le taux d'enracinement des boutures pour chaque conteneur de chacun des clones a été calculé comme suit : nombre de boutures enracinées divisé par 24, soit le nombre total de boutures échantillonnées dans le conteneur. Une bouture était considérée comme enracinée lorsqu'elle possédait au moins une racine très apparente.

Analyses statistiques

Une analyse de la variance a été effectuée à l'aide de la procédure MIXED de SAS (version 9.2) (Littell *et al.*, 2006) sur chaque variable mesurée afin de comparer les différents clones, notamment la hauteur, le nombre de branches (≥ 1 cm), le nombre de boutures (5 à 7 cm), la densité de branches (nombre par centimètre) et le taux d'enracinement.

Le modèle utilisé comprenait un seul facteur à effets fixes, soit les clones somatiques :

$$y_{ij} = \mu + \alpha_i + e_{ij} \qquad (1)$$

où

y_{ij} = Valeur obtenue pour le plant ou le récipient j du clone i,

μ = Moyenne générale,

α_i = Effet fixe du clone i (i = 1 à 28)

e_{ij} = Erreur aléatoire associée à la valeur du plant ou du récipient j du clone i (j = 1 à 5, 8, 16 ou 24 selon la variable ; $e_{ij} \sim N(0, \sigma_e^2)$)

Lorsque des différences entre les clones étaient détectées au seuil de 5 %, le test de Scott-Knott (Scott et Knott, 1974), basé sur des techniques de regroupement, a été effectué à l'aide du package « *ScottKnott* » du logiciel R (version 2.13.0) pour déterminer où se situaient les différences.

Ce test a été privilégié d'une part en raison du nombre élevé de comparaisons des clones deux à deux et d'autre part, pour son aptitude à ne jamais produire de chevauchements entre les groupes de moyennes formées, contrairement à d'autres méthodes de comparaisons multiples de moyennes.

L'hypothèse de normalité des résidus a été testée à l'aide de la statistique de Shapiro-Wilk, alors que l'homogénéité des variances a été vérifiée de façon graphique. Lorsque l'hypothèse de normalité n'était pas respectée, une analyse de la variance non paramétrique (effectuée sur les rangs) a permis de valider les conclusions obtenues avec la méthode paramétrique sur les données brutes. Dans le cas du taux d'enracinement, la transformation arcsinus de la racine carrée du pourcentage a été utilisée afin de permettre de valider les hypothèses de normalité et d'homogénéité.

L'héritabilité clonale au sens large (H_c^2, Dean, 2008) a été calculée pour chacune des variables en utilisant le même modèle que celui présenté à l'équation 1, en considérant cette fois les clones comme un facteur à effets aléatoires pour permettre d'obtenir une estimation de σ_c^2, la variance associée aux clones :

$$H_c^2 = \frac{\sigma_c^2}{\sigma_c^2 + \sigma_e^2} \qquad (2)$$

et σ_e^2 correspond à la variance associée à l'erreur résiduelle *e*. L'erreur type associée à cette héritabilité a été calculée à l'aide de la méthode du delta, basée sur les séries de Taylor (Lynch et Walsh, 1998). H_c^2 correspond à un paramètre de répétabilité indiquant à quel point la supériorité d'un clone somatique est répétable (Dean, 2008).

RÉSULTATS

Variabilité clonale, croissance, production et enracinement des boutures

Après débourrement et élongation des nouvelles pousses sous les conditions environnementales opérationnelles en pépinière forestière, les plants du même clone se distinguaient par l'uniformité de l'architecture des parties aériennes. Les statistiques descriptives sur les variables de croissance, de production et d'enracinement des boutures des clones d'Épinette blanche sont indiquées dans le tableau I (ci-dessous).

Tableau I **Statistiques descriptives sur les variables de croissance, de production et d'enracinement des boutures des clones d'Épinette blanche**

Variable	n	Moyenne	Écart type	Minimum	Maximum
Hauteur (cm)	140	21,63	3,94	12,6	30,0
Nombre de branches (≥ 1 cm)	140	15,25	3,19	8	25
Nombre de boutures (5 à 7 cm)	140	10,21	5,23	0	23
Densité de branches (nombre par cm)	140	0,72	0,16	0,42	1,27
Densité des boutures (nombre par cm)	140	0,45	0,21	0	1,18
Taux d'enracinement	456	0,85	0,16	0,167	1

Figure 1
VARIABILITÉ GÉNÉTIQUE ET DÉTERMINATION DES GROUPES DE CLONES HOMOGÈNES POUR :

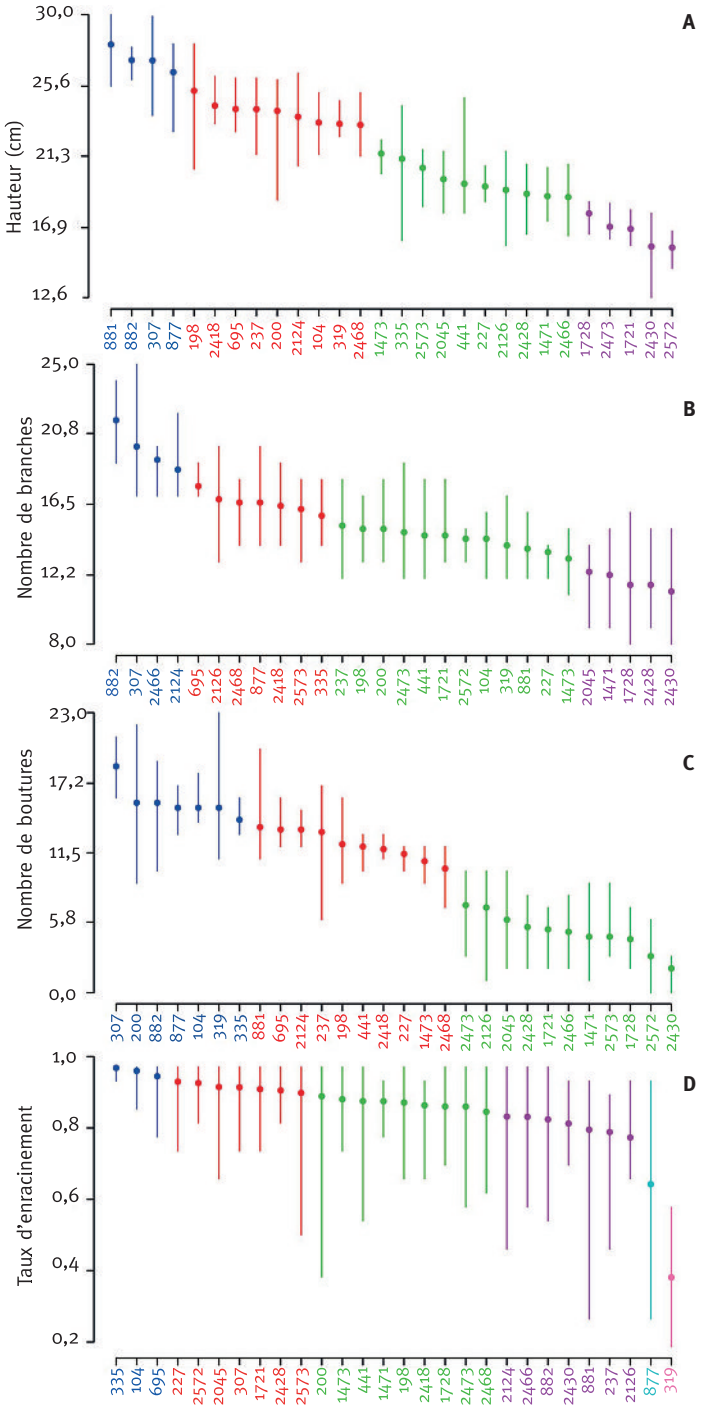
A) LA CROISSANCE EN HAUTEUR

B) LE NOMBRE DE BRANCHES (longueur ≥ 1 cm)

C) LE NOMBRE DE BOUTURES (longueur = 5 à 7 cm)

D) LE TAUX D'ENRACINEMENT DES BOUTURES

Pour chacune des variables, chaque barre relie la valeur maximale, minimale et la moyenne (point) de chaque clone. Les barres des différents clones de la même couleur appartiennent au même groupe. Des couleurs différentes indiquent que les groupes de clones sont significativement différents selon le test de Scott-Knott au seuil de signification de 5 %.



L'analyse de la variance a montré que l'effet clonal est hautement significatif pour la croissance en hauteur ($p < 0{,}0001$), la production du nombre de branches ($p < 0{,}0001$), la production de boutures ($p < 0{,}0001$), la densité de branches et de boutures ($p < 0{,}0001$) et le taux d'enracinement de ces dernières ($p < 0{,}0001$) (tableau II, ci-dessous). Les boutures de l'Épinette blanche se sont enracinées normalement après 16 semaines en tunnel. Malgré le jeune âge des plants des différents clones issus d'embryogenèse somatique, c'est-à-dire dès le début de la deuxième saison de croissance, et l'uniformité des conditions de croissance (substrat, irrigation, fertilisation, variables environnementales, etc.), la variabilité entre les clones était très prononcée pour les différentes variables de croissance et du rendement en boutures, notamment la hauteur (moyennes entre 15,7 cm et 28,2 cm), le nombre moyen de branches dont la longueur est supérieure à 1 cm (moyennes entre 11,2 et 21,6) et le nombre moyen de boutures dont la longueur varie entre 5 et 7 cm (moyennes entre 2 et 18,6 boutures par pied mère somatique). Cette variabilité était également observée entre les boutures issues des pieds mères somatiques concernant le taux d'enracinement (moyennes entre 38,1 % et 96,8 %).

Tableau II **Analyse de la variance de l'effet fixe clonal sur les variables de croissance et de production de boutures de pieds-mères somatiques d'Épinette blanche et d'enracinement des boutures récoltées sur ceux-ci**

Variable	DLn*	DLd**	Valeur de Fisher (F)	Probabilité > F
Hauteur (cm)	27	112	18,37	< 0,0001
Nombre de branches (≥ 1 cm)	27	112	6,96	< 0,0001
Nombre de boutures (5 à 7 cm)	27	112	15,44	< 0,0001
Densité de branches (nombre par cm)	27	112	5,28	< 0,0001
Densité des boutures (nombre par cm)	27	112	8,43	< 0,0001
Taux d'enracinement	27	428	14,61	< 0,0001

* DLn : degrés de liberté du numérateur.
** DLd : degrés de liberté du dénominateur.

L'analyse de regroupement faite à l'aide du test de Scott-Knott a permis de déterminer des groupes homogènes de clones significativement différents les uns des autres en matière de croissance en hauteur, du nombre de branches et de boutures produites par pied mère somatique, et du taux d'enracinement (figure 1, p. 127).

Héritabilités clonales et corrélations des moyennes clonales

Les différentes héritabilités clonales au sens large (H_c^2) estimées pour les variables de croissance des pieds mères somatiques et d'enracinement des boutures prélevées sur ces derniers sont élevées pour la croissance en hauteur (0,7765 ± 0,0556) et le nombre de boutures (0,7428 ± 0,0619), et modérées pour le nombre de branches latérales (0,5439 ± 0,0878), la densité de boutures (0,5977 ± 0,0827) et de branches (0,4612 ± 0,0929) et le taux d'enracinement (TE) des boutures (0,5031 ± 0,0745 dans l'échelle originale et 0,4476 ± 0,0751 dans l'échelle transformée arcsin $\sqrt{TE}$) (tableau III, p. 129). Les phénotypes des copies de chaque clone ont montré une bonne uniformité et une variabilité intraclonale relativement réduite (annexe I, p. 142).

Tableau III **Variances clonale et résiduelle, héritabilité clonale au sens large, erreurs types (entre parenthèses) obtenues pour chacune des variables**

Variable	σ_c^2	σ_e^2	H_c^2
Hauteur (cm)	12,35 (3,56)	3,56 (0,48)	0,7765 (0,0556)
Nombre de branches (≥ 1 cm)	5,63 (1,79)	4,72 (0,63)	0,5439 (0,0878)
Nombre de boutures (5 à 7 cm)	20,78 (6,05)	7,20 (0,96)	0,7428 (0,0619)
Densité de branches (nombre par cm)	0,0116 (0,0039)	0,0135 (0,0018)	0,4612 (0,0929)
Densité de boutures (nombre par cm)	0,0258 (0,0080)	0,0173 (0,0023)	0,5977 (0,0827)
Taux d'enracinement			
– échelle originale	0,0127 (0,0037)	0,0125 (0,0009)	0,5031 (0,0745)
– échelle transformée	0,0244 (0,0072)	0,0301 (0,0021)	0,4476 (0,0751)

Figure 2 **RELATIONS LINÉAIRES ENTRE LES MOYENNES CLONALES DU NOMBRE DE BOUTURES (A) ET DE BRANCHES (B) EN FONCTION DE LA HAUTEUR DU PIED MÈRE SOMATIQUE**

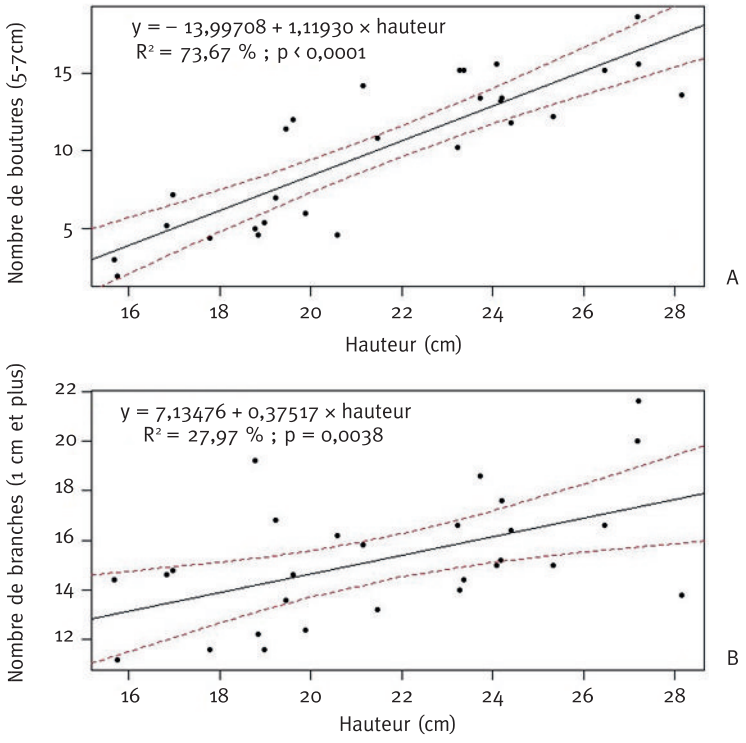
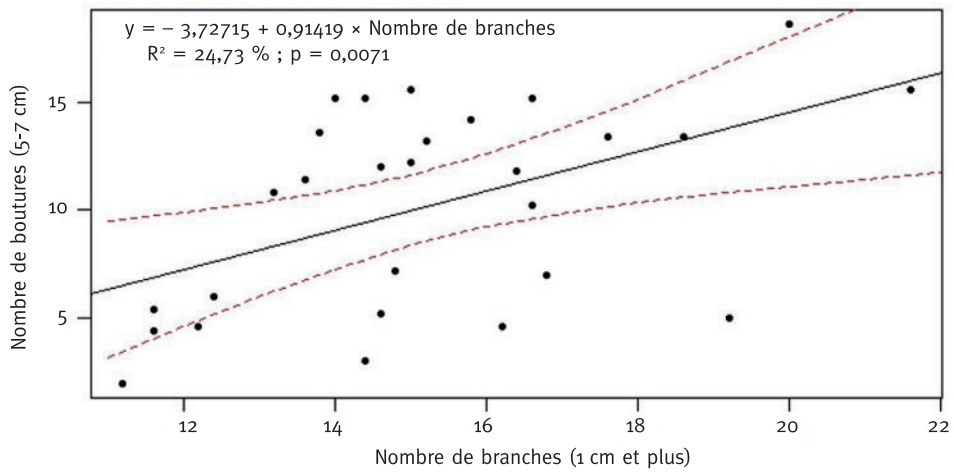


Tableau IV **Coefficients de corrélation de Pearson (au-dessus de la diagonale) et de Spearman (en dessous de la diagonale) entre les différentes variables en considérant les moyennes clonales**

	Hauteur (cm)	Nb de branches (≥ 1 cm)	Nb de boutures (5 à 7 cm)	TE (%)
Hauteur (cm)	–	**0,5289 (0,0038)***	**0,8583 (< 0,0001)**	– 0,2407 (0,2174)
Nombre de branches (≥ 1 cm)	**0,4965 (0,0072)**	–	**0,4973 (0,0071)**	– 0,0411 (0,8356)
Nombre de boutures (5 à 7 cm)	**0,8372 (< 0,0001)**	**0,4683 (0,0120)**	–	– 0,2076 (0,2892)
TE (%)	– 0,1974 (0,3141)	– 0,1798 (0,3599)	– 0,0848 (0,6679)	–

* La probabilité de signification est entre parenthèses et les valeurs en gras sont considérées comme significatives.

Figure 3 **RELATIONS LINÉAIRES ENTRE LES MOYENNES CLONALES DU NOMBRE DE BOUTURES EN FONCTION DU NOMBRE DE BRANCHES DU PIED MÈRE SOMATIQUE**



Les coefficients de corrélations des moyennes clonales (Pearson et Spearman) montrent que les moyennes clonales des nombres de boutures et de branches sont significativement et positivement liés à la hauteur du clone somatique (tableau IV, ci-dessus, figure 2, p. 129). Par contre, il n'y a aucune corrélation significative entre le taux d'enracinement et la hauteur ou le nombre de branches ou le nombre de boutures (tableau IV, ci-dessus). Les moyennes clonales du nombre de boutures sont également corrélées positivement et significativement au nombre de branches (figure 3, ci-dessus).

DISCUSSION

Nos résultats ont démontré, à notre connaissance, pour la première fois, que les traits reliés au bouturage des clones somatiques de l'Épinette blanche (*Picea glauca*) sont sous contrôle génétique modéré à élevé. Les boutures issues de pieds mères somatiques ont initié des racines de façon similaire à celles observées chez les boutures issues de plants zygotiques de cette essence (Gravel-Grenier *et al.*, 2011) et de pieds mères somatiques de l'Épinette de Norvège (Lamhamedi et Tousignant, 2008), et ce dans un contexte de régies de culture standards (irrigation, fertilisation, etc.) utilisées à une échelle opérationnelle (Rioux *et al.*, 2007 ; Tousignant et Rioux, 2002 ; Tousignant *et al.*, 2007). Ceci démontre que les différentes phases d'embryogenèse somatique (induction, maturation, germination, etc.) n'ont pas eu d'impact négatif sur l'enracinement des boutures prélevées sur des clones somatiques.

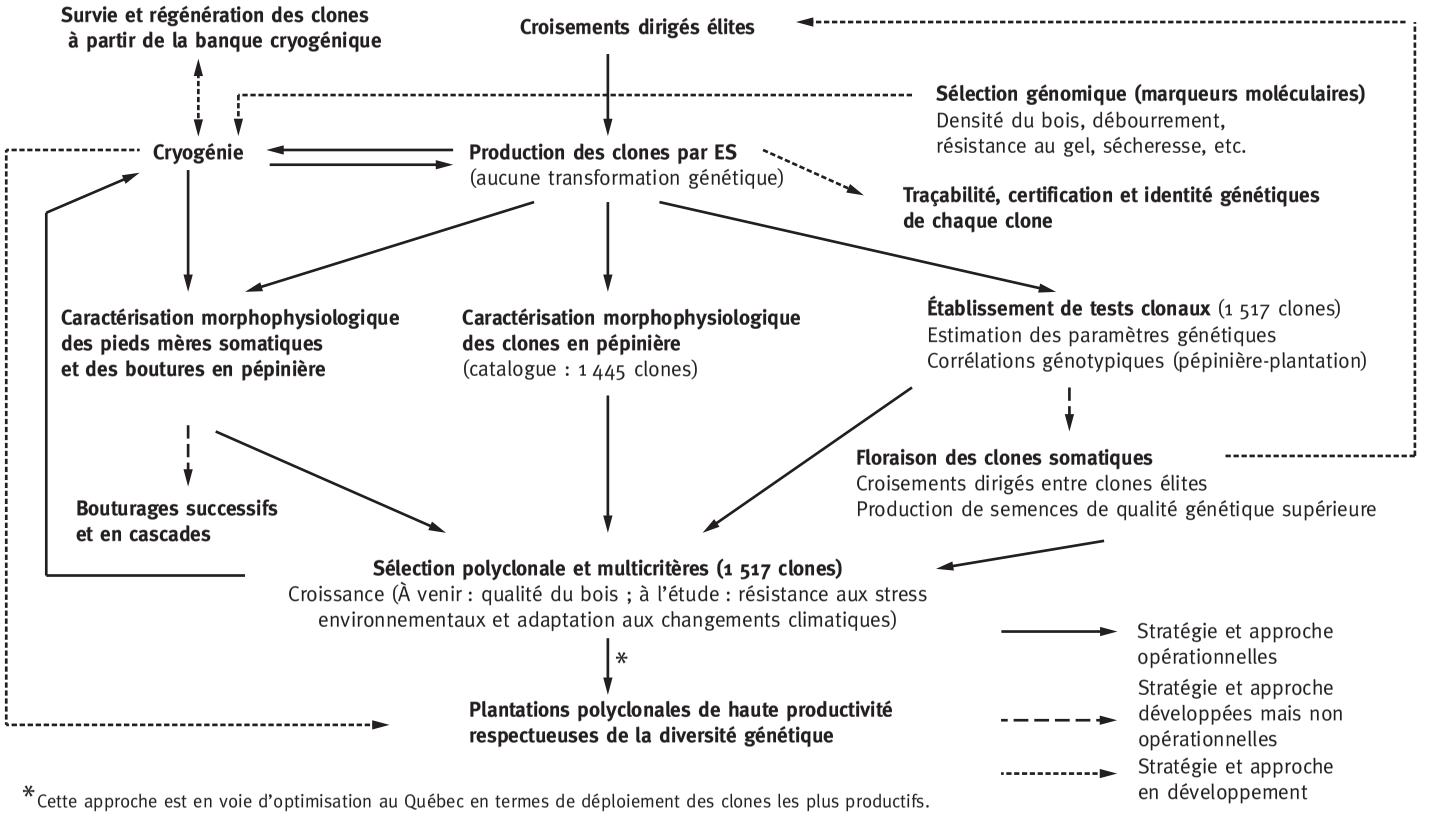
Bien que les pieds mères somatiques proviennent de familles biparentales sélectionnées pour leurs caractéristiques supérieures, ils ont montré une variabilité très prononcée. De même, des groupes de clones ont été trouvés significativement différents pour les différents traits de croissance évalués, d'architecture des parties aériennes (nombre de branches et de boutures, densité de boutures et branches) et du taux d'enracinement des boutures prélevées sur ceux-ci (annexe I, p. 142 ; figure 1, p. 127). De plus, les héritabilités clonales relativement élevées démontrent que ces traits (hauteur, nombre et densité de boutures, enracinement des boutures) sont sous un contrôle génétique élevé. Ceci laisse présager que des possibilités existent quant à la sélection et l'optimisation de l'intégration de clones somatiques "élites", notamment ceux issus de croisements dirigés entre les meilleurs clones somatiques sélectionnés (figure 4, p. 132) dans la filière de bouturage de l'Épinette blanche. La corrélation positive et significative entre le nombre de boutures et la hauteur du pied mère laisse présager qu'il serait possible d'utiliser ce modèle linéaire (figure 2A, p. 129) pour prédire le rendement de boutures pour chaque pied mère somatique. Une relation similaire a été observée dans le cas du bouturage chez 21 familles du sapin Douglas (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb) Franco var *menziesii*) (Schermann *et al.*, 1996). Par contre, l'absence de corrélations significatives entre le taux d'enracinement et les autres variables (hauteur, nombre de branches ou de boutures) (tableau IV, p. 130) et l'héritabilité modérée observée pour le taux d'enracinement laissent présager que la variabilité clonale observée provient essentiellement des gènes impliqués directement dans l'enracinement puisque toutes les règles de culture (irrigation, fertilisation, substrat, etc.) et les variables environnementales de culture étaient similaires et optimales.

Les héritabilités observées sont relativement similaires à celles obtenues pour la hauteur ($H_c^2 = 0,88$) des boutures de 2 ans de croissance du Pin à encens (*Pinus taeda* L.) (Baltunis *et al.*, 2007), la hauteur des boutures pendant la première (h_f^2 = 0,76 ± 0,01) et la deuxième saison (h_f^2 = 0,79 ± 0,17) de croissance des boutures d'Épinette blanche issues de 75 familles d'Épinette blanche (Gravel-Grenier *et al.*, 2011) et la hauteur de 139 clones somatiques d'Épinette blanche pendant la première (H_c^2 = 0,603 ± 0,083) et la deuxième (H_c^2 = 0,602 ± 0,084) saison de croissance en pépinière (Wahid *et al.*, 2012a). Par contre, la valeur observée de l'héritabilité clonale du taux d'enracinement des clones dans cette étude est supérieure (H_c^2 = 0,5031 ± 0,0745 et 0,4476 ± 0,0751) dans l'échelle transformée arcsin à celle obtenue par Gravel-Grenier *et al.* (2011) dans le cas des boutures issues de 75 familles d'Épinette blanche (h_f^2 = 0,36 ± 0,18).

À l'inverse des sites de plantation, les conditions de culture en pépinière sont très homogènes (substrat, variables environnementales, espace vital conféré par la volumétrie du conteneur, irrigation, fertilisation, etc.), ce qui fait que la performance de chaque clone est intimement liée à l'expression de son plein potentiel génétique.

Figure 4

STRATÉGIES SIMPLIFIÉES D'INTÉGRATION OPÉRATIONNELLE DE L'EMBRYOGENÈSE SOMATIQUE DANS LE PROGRAMME D'AMÉLIORATION GÉNÉTIQUE DE L'ÉPINETTE BLANCHE ET DE LA FILIÈRE DE BOUTURAGE AU QUÉBEC



*Cette approche est en voie d'optimisation au Québec en termes de déploiement des clones les plus productifs.

Bien que l'Épinette blanche se caractérise par une variabilité clonale très prononcée pour la majorité des variables morphophysiologiques (croissance, nutrition minérale, échanges gazeux, etc.), d'architecture de la partie aérienne et de la distribution des tanins comme moyen de résistance aux attaques d'insectes et fongiques (Lamhamedi *et al.*, 2000 ; Wahid *et al.*, 2012a), la performance des clones somatiques apparaît être stable aussi bien en pépinière qu'en site de plantation. En effet, par exemple, les variétés performantes ou les variétés branchues en pépinière ont maintenu leur supériorité ou leur degré de branchaison après quelques années en site de plantation (Lamhamedi *et al.*, 2011b ; Wahid *et al.*, 2013). Ainsi, nos résultats ont révélé que certains clones produisent un nombre élevé de branches courtes, mais peu de boutures (2 à 5 boutures par pied mère somatique) (par exemple, clones 2430 et 2466). Par contre, d'autres clones, au même stade phénologique, produisent plus de branches longues et plus de boutures, soit 15 à 19 boutures par pied mère somatique (par exemple clones 319 et 307).

Plusieurs variables de croissance (hauteur, masse des racines, nombre de branches, etc.) des clones somatiques et de bouturage de familles d'Épinette blanche en pépinière sont sous contrôle génétique (Gravel-Grenier *et al.*, 2011 ; Wahid *et al.*, 2012a). Les corrélations génétiques entre différentes variables, et à divers âges (pépinière-plantation) des clones somatiques d'Épinette blanche, sont généralement significatives, ce qui démontre que les possibilités sont réelles quant à l'intégration de la sélection précoce des meilleurs clones comme pieds mères somatiques dès le stade pépinière. Cette sélection précoce sur la base de la caractérisation morphophysiologique des clones somatiques en pépinière (Lamhamedi, 2010 ; Lamhamedi et Gravel-Grenier, 2012) et celle reliée au bouturage pourrait donc permettre d'éliminer à l'avance les clones qui ne possèdent pas les caractéristiques recherchées et qui ne performeront pas en plantation tout en diminuant les coûts et le nombre de clones évalués. En utilisant 69 familles uniparentales d'Épinette blanche, Rweyongeza *et al.* (2004) ont montré que la sélection pour la hauteur à 18 mois en serre est cinq fois plus efficace que celle effectuée à 11 ans en site de plantation. En utilisant 285 familles uniparentales issues de 57 provenances d'Épinette blanche, Li *et al.* (1993) ont mis en évidence des corrélations génétiques élevées entre les mesures de hauteur prises à 8 ans dans les sites de plantation et celles prises en pépinière. Williams *et al.* (1987) ont montré la présence de fortes corrélations entre la croissance initiale en serre, à l'âge de 6 mois, des plants d'Épinette noire (*Picea mariana* [Mill] BSP) issus de familles biparentales et celle en site de plantation à l'âge de 7 à 13 ans. Ces auteurs suggèrent que l'élimination des familles biparentales à faible croissance peut se faire à l'âge minimum de 6 mois au lieu d'une évaluation au champ d'une durée de 13 ans.

L'embryogenèse somatique (ES) associée au bouturage est certainement, dans le cas du Québec, l'approche la plus viable et prometteuse à court et à long terme pour mettre en place une véritable foresterie polyclonale. En effet, lorsque les installations de bouturage existent déjà et que les différentes phases à la fois d'embryogenèse somatique et de bouturage sont largement maîtrisées, ce qui est le cas pour l'Épinette blanche au Québec, l'intégration de l'ES à la filière de bouturage permet l'utilisation de clones somatiques déjà sélectionnés selon une approche multicritère et qui englobe leur performance à différentes phases (figure 4, p. 132). Ainsi, les clones somatiques pourront donc être sélectionnés comme pieds mères en se basant sur leur performance pendant les étapes d'embryogenèse somatique (induction, nombre d'embryons germés et de plants produits par unité de masse du tissu embryogène, etc.) (Lamhamedi *et al.*, 2005), en pépinière (croissance et architecture des parties aériennes, écophysiologie, longueur des aiguilles, production de tanins, tolérance au gel, etc.) (Lamhamedi *et al.*, 2000, 2011 ; Wahid *et al.*, 2012a), en bouturage (Lamhamedi et Tousignant, 2008), en site de plantation (croissance, degré de branchaison, nutrition minérale, etc.) (Beaulieu et Bernier-Cardou, 2006 ; Wahid *et al.*, 2012b) et en fonction de la stabilité de leur performance en pépinière et en site de plantation (Lamhamedi *et al.*, 2011 ; Wahid *et al.*, 2013).

L'utilisation de pieds mères somatiques produisant un plus grand nombre de branches longues (plus de boutures par pied mère) aurait pour conséquence d'augmenter la fréquence de leur génotype dans les plantations et pourrait réduire leur valeur à long terme dans le cas de plantations destinées à la filière sciage parce qu'ils produiraient du bois avec plus de nœuds par comparaison aux pieds mères somatiques moins branchus ; la qualité des sciages varie en effet en fonction de la grosseur et du diamètre des nœuds (Bowyer *et al.*, 2005). Pour conserver une distribution relativement identique entre les pieds mères somatiques et les boutures (génotypes, moyenne de la croissance en hauteur, etc.), on pourrait prélever sur tous les pieds mères un nombre à peu près égal de boutures ou à la limite ne sélectionner que les clones somatiques qui possèdent un faible nombre de branches relativement courtes, qui sont bien espacées au niveau des verticilles et de faible diamètre. Dans le cas de l'Épinette blanche, nos évaluations dans d'autres travaux quant à l'optimisation du nombre maximal de boutures à prélever sont de 10 boutures par pied mère issu de familles ou de clones somatiques. Les clones extrêmement branchus dotés d'une bonne biomasse foliaire pourraient quant à eux être destinés à la filière de la production des huiles essentielles (Turgeon, 2001), ce qui permettrait de valoriser davantage la filière clonale et pourrait garantir la stabilité en matière de rendement, de composition et de concentration des différents extraits. Cependant, il reste à poursuivre cette évaluation à long terme dans les tests clonaux quant à l'abondance et l'architecture des branches de chaque clone qui serait voué à une telle filière.

La caractérisation des traits morphophysiologiques lors des phases d'embryogenèse somatique, en pépinière, en bouturage (architecture des parties aériennes, taux d'enracinement des boutures, etc.) et en plantation de chaque clone somatique, sur une base multicritère, permet au pépiniériste d'optimiser et de mieux planifier les différentes étapes de production de pieds mères (par exemple quantité de tissu embryogène / clone nécessaire pour produire un nombre donné de pieds mères et de boutures, etc.). Cette approche est en voie d'optimisation au Québec en termes de sélection et de déploiement des clones les plus productifs, permettant de garantir une uniformité et une amélioration de la qualité du bois tout en garantissant une diversité génétique adéquate, à condition d'utiliser un nombre de clones non apparentés suffisant (Roberds et Bishir, 1997). Bonga (2015), par exemple, recommande de 18 à 40 clones, tandis que Foster (1993) préconise, pour une seule zone d'amélioration, 7 à 30 clones. Pour diminuer davantage les coûts, optimiser l'utilisation des pieds mères et éviter de régénérer à chaque fois les pieds mères à partir du tissu embryogène, l'utilisation du même pied mère somatique de l'Épinette blanche pendant 3 à 5 bouturages successifs s'avère optimale tout en permettant de limiter les problèmes liés au vieillissement et à la perte de vigueur (Tousignant et Rioux, 2002 ; Park *et al.*, 2016). De plus, le recours au bouturage en cascades (figure 4, p. 132) pourrait être envisagé puisque le bouturage en cascades de 19 clones somatiques d'Épinette blanche a donné d'excellents résultats en matière d'enracinement et de croissance de boutures dormantes (Lamhamedi, 2010).

Actuellement, la mise en œuvre à l'échelle industrielle de l'ES des résineux est à un stade précoce dans la majorité des pays et les quantités de plants produites par ES restent très limitées. À cet effet, il s'avère difficile d'estimer un coût réel par plant qui reflète l'intégration de l'ES à l'échelle opérationnelle afin de faire une comparaison judicieuse avec les coûts des autres techniques (semences, bouturage, etc.).

Dans l'est du Canada, Park *et al.* (2016) ont estimé que le coût de production de plants par ES est 1,5 fois supérieur au coût standard de la production de plants produits à partir de semences. Ces mêmes auteurs suggèrent que, pour être profitable, le coût de production des plants par ES, compte tenu des gains génétiques attendus, ne devrait pas dépasser 1,3 fois le coût de production de plants issus de semences dans les pépinières de la compagnie privée (J. D. Irving Limited) (Adam *et al.*, 2016). À titre d'indication, le coût de production de plants de fortes dimensions

(hauteur : 35 cm, conteneur : 25 cavités, 310 cm^3 par cavité) à partir de semences dans une pépinière forestière québécoise est de 575 $/1 000 plants en 2017-2018 (source : Direction générale de la production de semences et de plants forestiers – MFFP).

Dans une analyse économique spécifique à la foresterie clonale à l'échelle mondiale, South (2009) indiquait que le coût variait selon l'espèce et l'échelle de production. Par exemple, pour une production de 300 000 plants somatiques en conteneur, le coût était estimé à 0,31 € par plant. En Nouvelle-Zélande, ce coût était de 0,34 € par plant.

Au Canada, l'évaluation des retombées économiques du recours à l'embryogenèse somatique a montré une réduction de la durée de rotation de 45 à 35 ans, la réalisation des économies de valeur (coûts) de 40 millions de dollars au cours de la prochaine rotation et un indice de rentabilité de 3,8 % durant la période 2008-2082 (Wang *et al.*, 2012).

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Malgré les avancées récentes réalisées en embryogenèse somatique (ES) (Bonga, 2016 ; Find, 2016 ; Lelu-Walter *et al.*, 2013 ; Park *et al.*, 2016 ; Trontin *et al.*, 2016), nos résultats montrent pour la première fois, sur la base des paramètres génétiques obtenus, que l'intégration de l'ES dans la filière opérationnelle de bouturage de l'Épinette blanche est très prometteuse dans un contexte de foresterie polyclonale. En effet, le remplacement du bouturage de masse, où une population d'individus mélangés issus de familles biparentales est multipliée par le bouturage, par une approche où l'identité et la productivité de l'individu bouturé sont rigoureusement suivies jusqu'en plantation, contribuera à rehausser davantage la productivité et la qualité du bois des plantations polyclonales selon les superficies reboisées. De plus, à l'inverse du bouturage de masse, l'ES offre des avantages indéniables, notamment la production d'un nombre infini de pieds mères somatiques par clone ciblé, le maintien de la juvénilité et de l'uniformité à long terme des pieds mères somatiques, leur sélection selon les traits morphophysiologiques désirés et leur stockage dans un espace très réduit, grâce à la cryoconservation, sous forme de tissus embryogènes. Faisant suite à nos succès obtenus concernant l'Épinette de Norvège et l'Épinette blanche et à nos activités de transfert de connaissances, d'expertise et de savoir-faire (Lamhamedi, 2010 ; Lamhamedi et Tousignant, 2008 ; Tremblay *et al.*, 2008 ; Lamhamedi *et al.*, 2011b), la première phase d'optimisation et d'utilisation des pieds mères somatiques est avancée quant à leur intégration dans la filière opérationnelle de bouturage au Québec et à la livraison des plants produits au reboisement. Au Québec, l'objectif pour l'année 2018 est de livrer au reboisement 1 million de plants issus de boutures prélevées sur 100 000 pieds mères produits par embryogenèse somatique et représentant 35 clones issus de 11 familles. Dans le cas de la province du Nouveau-Brunswick (Canada), la compagnie privée J.D. Irving Limited a pour objectif de produire 500 000 plants somatiques en 2018 et 5 millions en 2020, et ce sans recourir au bouturage (Marc Poirier, 2017, comm. pers.).

L'utilisation des meilleurs clones issus d'embryogenèse somatique d'Épinette blanche pourrait assurer un gain en volume de 20 à 50 % par rapport au rendement des vergers à graines d'Épinette blanche et une réduction de la durée de rotation de 45 à 35 ans (Wang *et al.*, 2012). Dans le cas de *Pinus taeda* L. aux États-Unis, l'utilisation des clones assure un gain génétique en volume largement supérieur et qui pourrait atteindre, par exemple, dans le cas des meilleurs clones, 60 à 70 % par rapport au volume de bois produit par la forêt naturelle (Whetten et Kellison, 2010).

Le développement récent de la génomique forestière, en particulier pour l'Épinette blanche, (MacKay *et al.*, 2012) permet maintenant d'utiliser le profil génomique des individus pour prédire

leur valeur génétique quant à la qualité du bois, la croissance et l'adaptation de l'Épinette blanche (Beaulieu *et al.*, 2014). Un projet de recherche (*FastTRAC* : Tests rapides pour l'évaluation et l'amélioration des conifères) appuyé financièrement par Génome Canada et Génome Québec est d'ailleurs en cours de réalisation de manière à pouvoir prédire la valeur génétique des quelque 3 500 lignées embryogènes produites et cryoconservées par le ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs du gouvernement du Québec pour ses divers traits d'intérêt et sélectionner les meilleurs clones pour leur intégration dans la filière de bouturage. Le processus d'embryogenèse somatique pourra ainsi être optimisé, car seuls les clones les plus performants pour un ensemble de traits d'intérêt seront produits pour fournir les pieds mères somatiques nécessaires à leur postmultiplication par bouturage. Ceci permettra aussi de raccourcir davantage le cycle de sélection des clones somatiques, ainsi que le coût associé au programme d'amélioration génétique de l'Épinette blanche (Harfouche *et al.,* 2012). La combinaison de l'utilisation des différents marqueurs (génétiques, morphologiques, biochimiques, moléculaires) et des résultats de la sélection génomique multicritère (hauteur, densité, tolérance aux stress biotiques et abiotiques, etc.) contribuera à définir des critères de sélection précoce en vue de l'implantation de la foresterie polyclonale hautement productive à l'échelle opérationnelle.

Il serait également souhaitable d'associer l'identité génétique de chaque clone à un code-barres afin de faciliter l'identification rapide et d'en assurer la traçabilité tout au long de la filière clonale c'est-à-dire du tissu embryogène jusqu'au site de plantation (Lamhamedi, 2010). À cet effet, un système de traçabilité génétique pour les clones d'Épinette blanche a récemment été développé en utilisant des marqueurs génétiques afin d'être en mesure d'authentifier l'identité des plants associés à chaque clone dans la filière de production des plants somatiques (cryogénie, étapes d'ES, pépinière, plantations, etc.) (Godbout *et al.*, 2017). Pour diminuer les coûts,



Photo 1 Exemple de variabilité de débourrement entre les clones somatiques (âge : 7 ans) de l'Épinette blanche (*Picea glauca*) dans le même microsite de plantation. Remarquez le débourrement hâtif du premier ramet à gauche comparativement à ceux qui le suivent. (Cliché : Mohammed Lamhamedi)

l'évaluation des possibilités de mécanisation automatique de certaines étapes d'ES (transfert en sol, repiquage, etc.) s'avère nécessaire. En matière de mécanisation, lors du repiquage des boutures, le problème majeur réside actuellement dans la différenciation entre les boutures enracinées de celles qui ne sont pas dotées de racines. L'optimisation et l'intégration progressives des bioréacteurs lors de la production massive des embryons, associées au transfert robotisé de ces derniers pour les faire germer, contribueraient à diminuer les coûts des manipulations et la production des plants somatiques. Le défi consiste actuellement à optimiser les conditions environnementales et la composition physicochimique des milieux de croissance en temps réel, à l'aide de capteurs insérés dans les bioréacteurs, lors des différentes phases spécifiques à la germination des embryons.

Afin de rentabiliser l'intégration des clones somatiques hautement productifs dans le cadre de l'intensification de la production de bois par la sylviculture et le reboisement, l'acquisition de nouvelles connaissances devra être priorisée quant au choix de la qualité des sites (fertilité, humidité, etc.), à la réalisation des travaux sylvicoles au moment opportun et à une bonne assignation, par exemple, entre le microenvironnement du site (fréquence des gels hâtif et tardif) et la cinétique du débourrement du clone (tardiveté ou précocité) (photo 1, p. 136), et ce dans un contexte de changement climatique.

Finalement, pour mieux évaluer la rentabilité de l'intégration de l'ES dans le cadre de la foresterie polyclonale, en plus des études partielles réalisées à ce jour, une étude économique approfondie des différentes phases et des avantages de la filière de l'ES (laboratoire, production de plants, plantation, récolte, rendement et qualité du bois produit, durée de la rotation, etc.) s'avère nécessaire.

Mohammed S. LAMHAMEDI
Chercheur émérite et professeur associé
Direction de la recherche forestière
MINISTÈRE DES FORÊTS, DE LA FAUNE ET DES PARCS
2700, rue Einstein
QUÉBEC, CANADA G1P 3W8
(mohammed.lamhamedi@mffp.gouv.qc.ca)

Josianne DEBLOIS
Statisticienne
Direction de la recherche forestière
MINISTÈRE DES FORÊTS, DE LA FAUNE ET DES PARCS
2700, rue Einstein
QUÉBEC, CANADA G1P 3W8
(Josianne.DeBlois@mffp.gouv.qc.ca)

Mario RENAUD
Technicien spécialiste
Direction de la recherche forestière
MINISTÈRE DES FORÊTS, DE LA FAUNE ET DES PARCS
2700, rue Einstein
QUÉBEC, CANADA G1P 3W8
(mariorenaud@hotmail.com)

Jean BEAULIEU
Chercheur émérite et professeur invité
Centre d'Étude de la Forêt
Faculté de foresterie, de géographie
et de géomatique
UNIVERSITÉ LAVAL
Pavillon Abitibi Price
QUÉBEC, QC, CANADA, G1V 0A6
(jean.beaulieu@canada.ca)

Remerciements

Nous tenons à remercier le personnel du ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs du Québec, soit Julie Gravel-Grenier, Michel Rioux et Julie Gingras, de la pépinière de Saint-Modeste, et Laurence Tremblay (DGPSPF) pour leur aide en matière de production de plants somatiques, ainsi que celle du personnel de Saint-Modeste lors de la caractérisation des variables morphologiques et Maripierre Jalbert de la Direction de la recherche forestière (DRF) pour l'harmonisation de la qualité des photos et le montage des planches.

Nous remercions également le rédacteur en chef, les réviseurs et le secrétariat d'édition pour leurs suggestions et commentaires judicieux et constructifs ayant permis de bonifier le contenu de cet article.

Le financement de ce projet de recherche a été assuré par la DRF avec un appui financier accordé au Dr. Mohammed S. Lamhamedi (projet : 142332116. Caractérisation morpho-physiologique et sélection hâtive en pépinière forestière des clones somatiques d'Épinette blanche et leur intégration dans la filière de bouturage au Québec).
http://mffp.gouv.qc.ca/publications/enligne/forets/activites-recherche/projets/description.asp?numero=455

BIBLIOGRAPHIE

ADAMS G.W., KUNZE H.A., MCCARTNEY A., MILLICAN S., PARK Y.S., 2016. An industrial perspective on the use of advanced reforestation stock technologies. pp. 323-334. *In: Vegetative Propagation of Forest Trees* / Y.S. Park, J.M. Bonga, H.K. Moon (eds.). Séoul, Corée : National Institute of Forest Science.

BALTUNIS B.S., HUBER D.A., WHITE T.L., GOLDFARB B., STELZER H.E., 2007. Genetic gain from selection for rooting ability and early growth in vegetative propagated clones of loblolly pine. *Tree Genetics & Genomes*, n° 3, 2007, pp. 227-238.

BEAULIEU J., BERNIER-CARDOU M., 2006. Comparison of early height growth between white spruce seedlings and rooted cuttings. *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 36, pp. 3246-3250.

BEAULIEU J., ZHANG S.Y, YU Q., RAINVILLE A., 2006. Comparison between genetic and environmental influence on lumber bending properties in young white spruce. *Wood Fibre Science*, vol. 38, n° 3, pp. 553-564.

BEAULIEU J., DAOUST G., DESHAIES A., LAMHAMEDI M.S., RAINVILLE A., TOURIGNY M., 2009. Amélioration génétique des arbres, gestion des vergers à graines et de semences, et production de plants forestiers. pp. 1093-1146. *In: Manuel de foresterie*, 2e édition / Ordre des ingénieurs forestiers du Québec. Québec : Éditions Multimondes.

BEAULIEU J., DOERKSEN T.K., MACKAY J., RAINVILLE A., BOUSQUET J., 2014. Genomic selection accuracies within and between environments and small breeding groups in white spruce. *BMC Genomics,* vol. 15, p. 1048.

BONGA J.M., 2015. A comparative evaluation of the application of somatic embryogenesis, rooting of cuttings, and organogenesis of conifers. *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 45, pp. 379-383.

BONGA J.M., 2016. Conifer clonal propagation in tree improvement programs. pp. 3-31. *In: Vegetative Propagation of Forest Trees* / Y.S. Park, J.M. Bonga, H.K. Moon (eds.). Séoul, Corée : National Institute of Forest Science.

BOWYER J.L., SHMULSKY R., HAYGREEN J.G., 2005. *Le bois et ses usages*. 4e édition. Iowa State University Press. 528 p.

CAMPBELL R.A., DURZAN D.J., 1975. Induction of multiple buds and needles in tissue cultures of *Picea glauca*. *Canadian Journal of Botany*, vol. 53, pp. 1652-1657.

COLAS F., LAMHAMEDI M.S., 2010. Floraison précoce et production de graines par des clones somatiques d'Épinette noire (*Picea mariana*) : intégration potentielle dans le programme d'amélioration génétique et l'aménagement des vergers à graines. *Revue canadienne de recherche forestière*, vol. 40, n° 7, pp. 1421-1433.

COLAS F., LAMHAMEDI M.S., 2014. Production of new generation of seeds through the use of somatic clones in controlled crosses of black spruce (*Picea mariana*). *New Forests*, vol. 45, pp. 1-15.

CORRIVEAU A., BEAULIEU J., 1987. Wood density of natural white spruce populations in Quebec. *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 17, pp. 675-682.

DEAN C.A., 2008. Genetics parameters of somatic clones of coastal Douglas-fir at 5 ½-years across Washington and Oregon, USA. *Silvae Genetica*, vol. 57, pp. 4-5.

FIND J.I., 2016. Towards industrial production of tree varieties through somatic embryogenesis and other vegetative propagation technologies: Nordmanns fir (*Abies nordmanniana* (Steven) Spach) - From research laboratory to production. pp. 528-537. *In: Vegetative Propagation of Forest Trees* / Y.S. Park, J.M. Bonga, H.K. Moon (eds.). Séoul, Corée : National Institute of Forest Science.

FOSTER G.S., 1993. Selection and breeding for extreme genotypes. pp. 50-67. *In: Clonal Forestry I, Genetics and biotechnology* / M.R. Ahuja, W.J. Libby (eds.). Berlin, Heidelberg : Springer Verlag.

GODBOUT J., TREMBLAY L., LEVASSEUR C., LAVIGNE P., RAINVILLE A., MACKAY J., BOUSQUET J., ISABEL N., 2017. Development of a Traceability System Based on a SNP Array for Large-Scale Production of High-Value White Spruce (*Picea glauca*). *Frontiers in Plant Science,* vol. 8, p. 1264.

GRAVEL-GRENIER J., 2009. *Utilisation de la variabilité génétique familiale de l'Épinette blanche pour améliorer l'enracinement et l'architecture du système racinaire des plants de boutures*. Québec, Canada : Université Laval. 130 p. (Mémoire de maîtrise).

GRAVEL-GRENIER J., LAMHAMEDI M.S., BEAULIEU J., CARLES S., MARGOLIS H.A., RIOUX M., STOWE D.C., LAPOINTE L., 2011. Utilization of family genetic variability to improve the rooting ability of white spruce (*Picea glauca* [Moench] Voss) cuttings. *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 41, pp. 1308-1318.

GUPTA P.K., TIMIS R., HOLMSTROM D., 2005. Cryopreservation of embryo cells. pp. 567-572. *In: Protocol for somatic embryogenesis in woody plants* / M.S. Jain, P.K. Gupta (eds.). Dordrecht, New York : Springer (Forestry).

HAKMAN I., FOWKE L.C., VON ARNOLD S., ERIKSSON T., 1985. The development of somatic embryos in tissue cultures initiated from immature embryos of *Picea abies* (Norway spruce). *Plant Science*, 38, pp. 53-59.

HARFOUCHE A., MEILAN R., KIRST M., MORGANTE M., BOERJAN W., SABATTI M., MUGNOZZA G.S., 2012. Accelerating the domestication of forest trees in a changing world. *Trends in Plant Science*, 17, pp. 64-72.

ISIK F., GOLDFARB B., LEBUDE A., LI B., MCKEAND S., 2005. Predicted genetic gains and testing efficiency from two loblolly pine clonal trials. *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 35, pp. 1754-1766.

JAIN S.M., GUPTA P.K., 2005. *Protocol for somatic embryogenesis in woody plants*. Dordrecht, Netherlands : Springer, 590 p.

KHALIL M.A.K., 1985. Genetic variation in eastern white spruce (*Picea glauca* (Moench) Voss) populations. *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 15, pp. 444-452.

LAMHAMEDI M.S., 2010. Sélection hâtive multi-critères des variétés somatiques d'épinette blanche destinées au reboisement de très haute productivité. *In: Recueil des conférences - Journée d'information et de transfert de connaissances sur l'embryogenèse somatique à l'intention de la région du Bas-Saint-Laurent et des organismes de gestion en commun des MRC de Témiscouata, Kamouraska, Rivière-du-Loup et des Basques* / M.S. Lamhamedi, L. Tremblay, J. Gingras, J. Gravel-Grenier, M. Rioux (eds.). Saint-Modeste, Québec. 32 p. [cd-rom]. ISBN 978-2-550-60558-4.

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

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

LAMHAMEDI M.S., COLAS F., TOUSIGNANT D., 2005. Vers une nouvelle optimisation de l'utilisation des croisements dirigés pour la production des pieds-mères en bouturage. *Des plants et des hommes*, vol. 8, n° 1, pp. 21-26.

LAMHAMEDI M.S., COLAS F., TOUSIGNANT D., 2006a. Characterization and multi-criteria selection of stock plants for the mass cutting propagation of white spruce (*Picea glauca*) in Québec. Affiche et résumé présentés au IUFRO Tree Seed Symposium, Frédéricton, Canada, 18-21 juillet 2006. 1 p.

LAMHAMEDI M.S., GRAVEL-GRENIER J., 2012. La Sélection précoce des variétés somatiques hautement productives : élément clef de l'amélioration de la chaîne de valeur du bois au Québec. *Avis de recherche*, n° 41, 2 p.

LAMHAMEDI M.S., LABBÉ L., MARGOLIS H.A., STOWE D.C., BLAIS L., RENAUD M., 2006b. Spatial variability of substrate water content and growth of white spruce seedlings. *Soil Science Society of America Journal*, vol. 70, pp. 108-120.

LAMHAMEDI M.S., TOUSIGNANT D., 2008. Clonal variations in *Picea abies* stock plants produced by somatic embryogenesis and their use in cutting propagation programs. Abstract and poster presented at the Tree Seed Working Group. p. 198. *In: IUFRO-CTIA 2008 Joint conference - Adaptation, breeding and conservation in the era of forest tree genomics and climate. Québec (Québec), 25 août 2008.*

LAMHAMEDI M.S., RENAUD M., DESJARDINS P., VEILLEUX L., 2011a. L'Utilisation des toiles claires peut-elle augmenter la croissance des racines des plants d'épinette blanche (1+0) en pépinière forestière ? pp. 87-95. *In: Production de plants forestiers au Québec : la culture de l'innovation. Colloque de transfert de connaissances et de savoir-faire*. Carrefour Forêt Innovations, 4-6 octobre 2011, Québec (Canada) / F. Colas, M.S. Lamhamedi (eds.).

LAMHAMEDI M.S., RAINVILLE A., COLAS F., WAHID N., PRÉGENT G., GRAVEL-GRENIER J., 2011b. *Les variétés somatiques à haut rendement : un outil précieux d'intensification de la production*. Stand présenté au Carrefour Forêt Innovations : Inspiration, Motivation et Réussite. 4 au 6 octobre 2011, Centre des Congrès, Québec, Canada. 6 p.

LELU-WALTER M.A., THOMPSON D., HARVENGT L., SANCHEZ L., TORIBIO M., PÂQUES L.E., 2013. Somatic embryogenesis in forestry with a focus on Europe: state-of-the-art, benefits, challenges and future direction. *Tree Genetics & Genomes*, n° 9, pp. 883-899.

LI P., BEAULIEU J., BOUSQUET J., 1997. Genetic structure and patterns of genetic variation among populations in eastern white spruce (*Picea glauca*). *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 27, pp. 189-198.

LI P., BEAULIEU J., CORRIVEAU A., BOUSQUET J., 1993. Genetic variation in juvenile growth and phenology in a white spruce provenance-progeny test. *Silvae Genetica*, vol. 42, pp. 52-60.

LITTELL R.C., MILLIKEN G.A., STROUP W.W., WOLFINGER R.D., SCHABENBERGER O., 2006. *SAS for Mixed Models*. Second Edition. Cary, N.C., USA : SAS Institute Inc. 814 p.

LYNCH M., WALSH B., 1998. *Genetics and Analysis of Quantitative Traits*. Sinauer Associates Inc. 980 p. [En ligne] : http://www.mffp.gouv.qc.ca/publications/enligne/forets/activites-recherche/projets/description.asp?numero=458.

MACKAY J., DEAN J.F.D., PLOMION C., PETERSON D.G., CÁNOVAS F.M., PAVY N., 2012. Towards decoding the conifer giga-genome. *Plant Molecular Biology*, vol. 80, pp. 555-569.

MURANTY H., SANTI F., PÂQUES L., DUFOUR J., 1996. Nombre optimal de ramets par clone dans deux tests clonaux. *Annals of Forest Science*, vol. 53, pp. 123-136.

NIENSTAEDT H., ZASADA J.C., 1990. *Picea glauca* (Moench) Voss White spruce. pp. 204-226. *In: Silvics of North America. vol. 1. Conifers* / R.M. Burns, B.H. Honkala eds. US Department of Agriculture (Agriculture handbook no. 654).

PARK Y.S., BEAULIEU J., BOUSQUET J., 2016. Multi-varietal forestry integrating genomic selection and somatic embryogenesis. pp 302-322. *In: Vegetative Propagation of Forest Trees* / Y.S. Park, J.M. Bonga, H.K. Moon (eds.). Séoul, Corée : National Institute of Forest Science.

RAINVILLE A., WAHID N., LAMHAMEDI M.S., PRÉGENT G., BEAULIEU J., 2011. Les plants issus de l'embryogenèse somatique : un énorme potentiel à notre portée pour augmenter la productivité forestière ! pp. 119-124. *In: Production de plants forestiers au Québec : la culture de l'innovation. Colloque de transfert de connaissances et de savoir-faire*. Carrefour Forêt Innovations, Québec (Canada) / F. Colas, M.S. Lamhamedi eds.

RICHARD D., 2015. Où en sommes-nous au Québec ? : Portrait des plantations récentes (1980 à 2014). Volet reboisement. Colloque, les défis forestiers du 21e siècle : Les plantations ont-elles un rôle à jouer ? 18-19 mars 2015. Présentation. 16 p.

RIOUX M., TOUSIGNANT D., LAMHAMEDI M.S., COLAS F., 2007. Cutting propagation of forests conifer trees in Quebec. *Combined Proceedings of the International Plant Propagators' Society*, vol. 57, pp. 26-33.

ROBERDS J.H., BISHIR J.W., 1997. Risk analysis in clonal forestry. *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 27, pp. 425-432.

RUSSELL J.H., LIBBY W.J., 1986. Clonal testing efficiency: the trade-offs between clones tested and ramets per clone. *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 16, pp. 925-930.

RWEYONGEZA D.M., YEH F.C., DHIR N.K., 2004. Genetic parameters for seasonal height growth curves of white spruce seedlings and their implications to early selection. *Forest Ecology and Management*, vol. 187, pp. 159-172.

SCHERMANN N., VERGER M., BASTIEN J.C., 1996. Sélection de familles de sapin Douglas (*Pseudotsuga menziesii*) pour leur aptitude au bouturage : conséquences pour la diffusion de variétés améliorées. *Annales des Sciences forestières*, vol. 53, pp. 1113-1126.

SCOTT R.J., KNOTT M., 1974. A cluster analysis method for grouping means in the analysis of variance. *Biometrics*, vol. 30, pp. 507-512.

SOUTH D.B., 2009. Economics of clonal forestry. *In*: *Vegetative propagation and deployment of varieties (a.k.a. clonal forestry) - the scope for Europe*. Liverpool, England, April 21st to 23rd, 2009. 92 p. [En ligne] : https://www.forestry.gov.uk/pdf/VegProp_0409_pres_South_D.pdf/$FILE/VegProp_0409_pres_South_D.pdf

TOUSIGNANT D., RIOUX M., 2002. Le bouturage des résineux à la pépinière de Saint-Modeste (Québec, Canada) : 10 ans de recherche, de développement et d'innovations. pp. 65-86. *In: Multiplication végétative des ligneux forestiers, fruitiers et ornementaux*. Actes [CD-Rom]. Troisième rencontre du groupe Sainte-Catherine, 22-24 novembre 2000 / M. Verger. Orléans et Montpellier, France : CIRAD-INRA.

TOUSIGNANT D., COLAS F., LAMHAMEDI M.S., TREMBLAY L., GIRARD D., 2007. Les acquis et retombées de la recherche pour le programme de reboisement de l'Épinette blanche au Québec. *In: Des plants aux plantations : Techniques, technologies et performances*. Carrefour de la recherche forestière. 19-20 septembre 2007, Québec, Canada. pp. 1-5.

TOUSIGNANT D., LAMHAMEDI M.S., RIOUX M., 2008. Using the conifer cutting propagation pathway to increase forest productivity in Quebec. p. 4. *In: Adaptation, Breeding and Conservation in the era of forest tree genomics and environmental change*. IUFRO-CTIA Joint conference. 25-28 août 2008. Québec, Canada.

TREMBLAY F-M., IRAQI D., EL MESKAOUI A., 2005. Protocol of somatic embryogenesis: Black spruce (*Picea mariana* (Mill.) B.S.P.). pp. 59-68. *In: Protocol for Somatic Embryogenesis in Woody Plants* / S.M. Jain, P.K. Gupta eds. Dordrecht (Netherlands) : Springer (Forestry Sciences ; vol. 77).

TREMBLAY L., LAMHAMEDI M.S., 2006. Embryogenèse somatique au ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec : Du laboratoire au site de plantation. *Des plants et des Hommes*, vol. 9, n° 3, pp. 6-11.

TREMBLAY L., TREMBLAY F.M., 1995a. III. Somatic embryogenesis in black spruce [*Picea mariana* (Mill.) V.S.P.] and red spruce (*P. rubens* Sarg.). pp. 431-445. *In: Somatic embryogenesis and synthetic seed I* / Y.P.S. Bajaj (ed.). Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag (Biotechnology in agriculture and forestry ; vol. 30).

TREMBLAY L., TREMBLAY F.M., 1995b. Maturation of black spruce somatic embryos: sucrose hydrolysis and resulting osmotic pressure of the medium. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 42, pp. 39-46.

TREMBLAY L., LAMHAMEDI M.S., COLAS F., 2008. An integrated approach to preserve and multiply improved material of white spruce by somatic embryogenesis. p. 52. *In: Adaptation, Breeding and Conservation in the Era of Forest Tree Genomics and Environmental Change*. IUFRO-CTIA 2008 Joint Conference CTIA Tree Seed Working Group Workshop, Québec (Canada), 25-28 août 2008.

TRONTIN J.F., TEYSSIER C., MOREL A. HARVENGT L., LELU-WALTER M.A., 2016. Prospects for new variety deployment through somatic embryogenesis in maritime pine. pp. 572-606. *In: Vegetative Propagation of Forest Trees* / Y.S. Park, J.M. Bonga, H.K. Moon (eds.). Séoul, Corée : National Institute of Forest Science.

TURGEON M., 2001. *Profil des produits forestiers. Première transformation : huiles essentielles*. Ministère des Ressources naturelles, Gouvernement du Québec. 16 p.

VAN DE SYPE H., ROMAN-AMAT B., 1989. Analyse au stade juvénile d'un test multilocal de clones d'Épicéa commun (*Picea abies* (L.) Karst.). Variabilité génétique. *Annales des sciences forestières*, vol. 46, pp. 15-29.

WAHID N., LAMHAMEDI M.S., BEAULIEU J., MARGOLIS H.A., DEBLOIS J., 2012a. Genetic parameters and clonal variation in growth and nutritional traits in containerized white spruce somatic seedlings. *Botanica Gallica*, vol. 159, n° 3, pp. 373-384.

WAHID N., RAINVILLE A., LAMHAMEDI M.S., MARGOLIS H.A., BEAULIEU J., DEBLOIS J., 2012b. Genetic parameters and performance stability of white spruce somatic seedlings in clonal tests. *Forest Ecology and Management*, vol. 270, pp. 45-53.

WAHID N., LAMHAMEDI M.S., RAINVILLE A., BEAULIEU J., MARGOLIS H.A., 2013. Genetic control and nursery-plantation genotypic correlations for growth characteristics of white spruce somatic clones. *Journal of Sustainable Forestry*, 32, pp. 576-593.

WANG S., BLURTON S., MACAFEE K., SMITH G., 2012. *An impact assessment of four Research projects of the Canadian fibre centre. Summary report*. Natural Resources Canada. 15 p.

WHETTEN R.W., KELLISON R., 2010. Research gap analysis for application of biotechnology to sustainable US forests. *Journal of Forestry*, vol. 108, pp. 193-201.

WILLIAMS D.J., DANCIK B.P., PHARIS R.P., 1987. Early progeny testing and evaluation of controlled crosses of black spruce. *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 17, pp. 1442-1450.

ZHANG S.Y., QIBIN Y., BEAULIEU J., 2004. Genetic variation in veneer quality and its correlation to growth in white spruce. *Canadian Journal of Forest Research*, 34, pp. 1311-1318.

Annexe 1 VARIABILITÉ INTERCLONALE ET UNIFORMITÉ INTRACLONALE DES TRAITS D'ARCHITECTURE ET DE CROISSANCE DES PARTIES AÉRIENNES ET DU TAUX D'ENRACINEMENT (TE) DES CLONES SOMATIQUES UTILISÉS COMME PIEDS MÈRES POUR LE BOUTURAGE DE L'ÉPINETTE BLANCHE

	Hauteur (cm)	Nombre de branches (≥ 1 cm)	Nombre de boutures (5 à 7 cm)	TE
	19,9 ± 0,84 c**	12,4 ± 0,97 d	6,0 ± 2,0 c	0,912 ± 0,040 b
	24,4 ± 0,84 b	16,4 ± 0,97 b	11,8 ± 1,20 b	0,875 ± 0,028 c
	19,0 ± 0,84 c	11,6 ± 0,97 d	5,4 ± 1,20 c	0,906 ± 0,040 b
	15,7 ± 0,84 d	11,2 ± 0,97 d	2,0 ± 1,20 c	0,823 ± 0,040 d
	19,4 ± 0,84 c	13,6 ± 0,97 c	11,4 ± 1,20 b	0,937 ± 0,023 a
	18,8 ± 0,84 c	12,2 ± 0,97 d	4,6 ± 1,20 c	0,891 ± 0,040 b
	21,5 ± 0,84 c	13,2 ± 0,97 c	10,8 ± 1,20 b	0,892 ± 0,023 b

	Hauteur (cm)	Nombre de branches (≥ 1 cm)	Nombre de boutures (5 à 7 cm)	TE
	16,8 ± 0,84 d	14,6 ± 0,97 c	5,2 ± 1,20 c	0,911 ± 0,028 b
	17,8 ± 0,84 d	11,6 ± 0,97 d	4,4 ± 1,20 c	0,859 ± 0,040 c
	24,2 ± 0,84 b	15,2 ± 0,97 c	13,2 ± 1,20 b	0,797 ± 0,028 d
	23,3 ± 0,84 b	14,0 ± 0,97 c	15,2 ± 1,20 a	0,380 ± 0,028 f
	26,5 ± 0,84 a	16,6 ± 0,97 b	15,2 ± 1,20 a	0,637 ± 0,023 e
	28,2 ± 0,84 a	13,8 ± 0,97 c	13,6 ± 1,20 b	0,795 ± 0,023 d
	27,2 ± 0,84 a	21,6 ± 0,97 a	15,6 ± 1,20 a	0,820 ± 0,028 d

	Hauteur (cm)	Nombre de branches (≥ 1 cm)	Nombre de boutures (5 à 7 cm)	TE
	23,7 ± 0,84 B	18,6 ± 0,97 a	13,4 ± 1,20 b	0,818 ± 0,040 d
	19,2 ± 0,84 c	16,8 ± 0,97 b	7,0 ± 1,20 c	0,781 ± 0,040 d
	18,8 ± 0,84 c	19,2 ± 0,97 a	5,0 ± 1,20 c	0,831 ± 0,028 b
	23,2 ± 0,84 b	16,6 ± 0,97 b	10,2 ± 1,20 b	0,842 ± 0,023 c
	17,0 ± 0,84 d	14,8 ± 0,97 c	7,2 ± 1,20 c	0,866 ± 0,023 c
	24,2 ± 0,84 b	17,6 ± 0,97 b	13,4 ± 1,20 b	0,948 ± 0,023 a
	23,4 ± 0,84 b	14,4 ± 0,97 c	15,2 ± 1,20 a	0,974 ± 0,023 a

	Hauteur (cm)	Nombre de branches (≥ 1 cm)	Nombre de boutures (5 à 7 cm)	TE
	25,3 ± 0,84 b	15,0 ± 0,97 c	12,2 ± 1,20 b	0,875 ± 0,028 c
	24,1 ± 0,84 b	15,0 ± 0,97 c	15,6 ± 1,20 a	0,875 ± 0,023 c
	27,2 ± 0,84 a	20,0 ± 0,97 a	18,6 ± 1,20 a	0,915 ± 0,023 b
	21,1 ± 0,84 c	15,8 ± 0,97 b	14,2 ± 1,20 a	0,990 ± 0,040 a
	19,6 ± 0,84 c	14,6 ± 0,97 c	12,0 ± 1,20 b	0,862 ± 0,028 c

* Chaque clone est représenté par un conteneur et trois plants du même clone. La famille biparentale (croisement) est indiquée pour chaque clone.

** Dans la même colonne, les moyennes (± erreur type) suivies de lettres distinctes présentent des groupes de clones significativement différents au seuil de 5 % selon le test de Scott-Knott. Les erreurs types sont associées au test de Scott-Knott.

OPTIMISATION DE L'INTÉGRATION OPÉRATIONNELLE DES CLONES SOMATIQUES DANS LA FILIÈRE DE BOUTURAGE DE L'ÉPINETTE BLANCHE (*PICEA GLAUCA*) AU QUÉBEC (Résumé)

Pour pallier la problématique du maintien de la juvénilité du même génotype à long terme, d'uniformité de l'architecture des parties aériennes, du rendement de boutures par pied mère et de l'enracinement des boutures, l'intégration de l'embryogenèse somatique (ES) dans la filière de bouturage est la seule voie qui permette de multiplier le même génotype "élite" à l'infini de façon rapide tout en conservant ses caractéristiques juvéniles et phénotypiques. Vingt-huit clones somatiques d'Épinette blanche (*Picea glauca* [Moench.]Voss) ont été utilisés comme pieds mères somatiques pour évaluer leurs traits reliés au bouturage dès le début de leur deuxième saison de croissance en pépinière. Les pieds mères somatiques ont montré une variabilité clonale très prononcée, ainsi que des groupes de clones significativement différents pour différents traits de croissance, d'architecture des parties aériennes et du taux d'enracinement des boutures. La stabilité et le contrôle génétique de plusieurs traits ouvrent de nouvelles perspectives très prometteuses quant à l'intégration des clones somatiques "élites" dans la filière de bouturage à une échelle opérationnelle, tout en maintenant le niveau minimal de diversité génétique souhaité.

OPTIMISING OPERATIONAL INTEGRATION OF SOMATIC CLONES IN PROCESSES FOR PROPAGATING WHITE SPRUCE (*PICEA GLAUCA*) BY CUTTINGS IN QUÉBEC (Abstract)

To overcome the problem of maintaining the juvenility of a genotype in the long term, the uniformity of the architecture of the aerial parts, the cuttings yield per stockplant and the rooting of cuttings, the only way of multiplying the same Elite genotype indefinitely and quickly while maintaining its juvenility and phenotype is to integrate somatic embryogenesis (SE) into the propagation processes. 28 somatic clones of white spruce (*Picea glauca* [Moench.] Voss) were used as somatic stockplants to assess their traits relative to cuttings at the beginning of their second growth season in a nursery. The somatic stockplants exhibited a high degree of clonal variability, together with significantly different clone groups for different traits, e.g. growth, aerial parts architecture and rooting rates of the cuttings. The stability and genetic control of several traits opens up new promising perspectives for the operational integration of Elite somatic clones in the cuttings sector while maintaining the required minimal level of genetic diversity.