



Variation morpho-physiologique des plants d'épinette blanche de différentes sources génétiques et implications pour la migration assistée

Mémoire

Isabelle Villeneuve

Maîtrise en sciences forestières
Maître ès sciences (M. Sc.)

Québec, Canada

© Isabelle Villeneuve, 2015

Résumé

Les semences forestières génétiquement améliorées pourraient ne plus être adaptées aux sites où elles sont destinées à cause des changements climatiques. La migration assistée figure parmi les stratégies d'adaptation proposées pour maintenir la productivité forestière et diminuer la vulnérabilité des écosystèmes.

Les réponses morpho-physiologiques des plants d'épinette blanche (*Picea glauca* (Moench) Voss) issus de huit vergers à graines ont été évaluées en pépinière et sur trois sites de plantation. La modélisation des courbes de croissance a montré que la hauteur des vergers méridionaux et de deuxième génération est significativement supérieure à celle des autres vergers. Un modèle à régression multiple a montré que la hauteur finale des plants était significativement corrélée aux conditions climatiques d'origine des vergers. Le verger et le site de plantation ont affecté significativement la croissance en hauteur des plants. Les résultats de la présente étude et ceux obtenus à long terme contribueront à raffiner les règles opérationnelles de transfert des semences propres à la migration assistée.

Abstract

Due to climate change, genetically improved trees may no longer be adapted to the sites where they are intended to be planted. Assisted migration is a potential adaptation strategy for maintaining forest productivity and reducing vulnerability in the face of a changing climate.

Morpho-physiological responses of white spruce (*Picea glauca* (Moench) Voss) seedlings from eight seed orchards were evaluated in a nursery and at three planting sites. The modeling of growth curves showed that the height of both the southern orchards and second generation orchards was significantly higher than the other orchards. A multiple regression model showed that the final height of the plants was significantly correlated with climatic conditions of the orchards. The orchard and the planting site significantly affected height growth of seedlings. The results of this study and those obtained over the longer term should help to refine the operational rules of seed transfer for assisted migration.

Table des matières

<i>Résumé</i>	<i>iii</i>
<i>Abstract</i>	<i>v</i>
<i>Table des matières</i>	<i>vii</i>
<i>Liste des tableaux</i>	<i>ix</i>
<i>Liste des figures</i>	<i>xi</i>
<i>Liste des abréviations</i>	<i>xiii</i>
<i>Remerciements</i>	<i>xvii</i>
<i>Introduction générale</i>	<i>1</i>
Objectifs et hypothèses de recherche	5
Objectifs	5
Hypothèses.....	5
Références	7
Chapitre 1 - Revue de littérature	11
1.1 Les changements climatiques	11
1.1.1 L'impact des changements climatiques sur les forêts.....	15
1.1.2 Les politiques adoptées face aux changements climatiques	16
1.2 L'adaptation aux changements climatiques par la migration assistée	19
1.2.1 Une stratégie adoptée à l'échelle internationale.....	24
1.2.2 Les risques liés à la migration assistée	29
1.3 Le cas de l'épinette blanche	30
1.3.1 Diversité génétique	30
1.3.2 Programme d'amélioration génétique.....	31
1.3.3 Production de l'épinette blanche en pépinière	32
1.4 Conclusion	35
1.5 Références	37
Chapitre 2 - Caractérisation morpho-physiologique de différentes sources génétiques d'épinette blanche en pépinière et sites de reboisement dans un contexte de migration assistée au Québec	47
2.1 Résumé	47
2.2 Introduction	49
2.3 Matériel et Méthodes	53
2.3.1 Origine du matériel végétal.....	53
2.3.2 Production des différentes sources génétiques en pépinière forestière (1+0 et 2+0)	53
2.3.3 Variables de croissance et nutrition minérale 1+0 et 2+0	55
2.3.4 Échanges gazeux des différentes sources génétiques (2+0)	57
2.3.5 Primordia des bourgeons (2+0).....	57

2.3.6	Évaluation du débourrement du bourgeon apical des plants d'épinette blanche (3+0)	58
2.3.7	Données climatiques d'origine des vergers à graines de première génération	59
2.3.8	Sites de plantation: Simulation de scénarios de migration assistée	59
2.3.9	Analyses statistiques	60
2.4	Résultats	63
2.4.1	Variables de croissance des plants d'épinette blanche (1+0 et 2+0)	63
2.4.2	Nutrition minérale	66
2.4.3	Échange gazeux et efficacité de l'utilisation de l'eau	66
2.4.4	Nombre de primordia des bourgeons terminaux (2+0) et débourrement	68
2.4.5	Groupement des vergers et modélisation de la croissance en hauteur	68
2.4.6	Performance en relation avec le climat d'origine des vergers	69
2.4.7	Performance pendant la phase d'établissement en sites de plantation	72
2.5	Discussion	75
2.5.1	Groupement des vergers	75
2.5.2	Nutrition minérale et échanges gazeux	76
2.5.3	Formation des bourgeons et débourrement	76
2.5.4	Adaptation des sources génétiques au climat d'origine	77
2.5.5	Performance des sources génétiques pendant la phase d'établissement	77
2.6	Conclusion et implications pour la migration assistée	80
2.7	Remerciements	81
2.8	Références	83
Chapitre 3	Conclusion générale	89
3.1.	Sommaire des résultats	89
3.2.	Implications pour la migration assistée dans le cadre des changements climatiques	90
3.3.	Limites de l'étude	91
3.4.	Recommandations pour les recherches futures	92
3.5	Références	95
Annexe 1		97
Annexe 2		99
Annexe 3		101
Annexe 4		103
Annexe 5		105
Annexe 6		107

Liste des tableaux

Tableau 1.1 Caractéristiques et terminologie associées à la migration assistée 23

Tableau 1.2 Exemples de migration assistée à l'échelle internationale dans un contexte de changements climatiques27

Tableau 2.1 Variables morphologiques (moyenne et erreur type entre parenthèses) des plants provenant des 8 vergers à graines d'épinette blanche telles que mesurées à la fin de la deuxième saison de croissance (2+0) en pépinière et ayant servi au groupement des vergers..... 65

Liste des figures

Figure 1.1 Concentration moyenne mensuelle en CO ₂ (ppm) de 2010 à 2015. (Tirée de: Tans et Keeling 2014).....	12
Figure 1.2 Forçage radiatif (W m ²) pour chacun des 4 scénarios d'émissions (RCP 8.5, RCP 6, RCP 4.5, RCP 2.6 et l'extension de ces scénarios (ECP) (tirée de Meinshausen et al. 2011).....	13
Figure 1.3 Matrices reliant les scénarios de référence du développement socio-économique mondial (SSP : Socio-economic reference pathway) et le forçage radiatif (forcing level) qui représente les scénarios RCP afin d'évaluer les coûts liés (allant de faibles (low) à élevés (high)) aux mesures d'atténuation (mitigation costs) et à l'adaptation (adaptations costs) aux changements climatiques (Figure tirée de: van Vuuren et al. 2014).	14
Figure 1.4 Émissions canadiennes de GES en mégatonnes depuis 1990, cible canadienne des émissions pour 2020 (612 Mt) et projections des émissions avec (734 Mt) et sans mesures d'atténuation 862 Mt) (tirée de: Environnement Canada 2013).....	17
Figure 1.5 Fonctionnement du marché du carbone, selon un plafond d'unités d'émissions allouées (tirée de: www.mddelcc.gouv.qc.ca/changements/carbone/index.asp).	19
Figure 1.6 Aire de distribution de l'épinette blanche illustrée en vert (tirée de : http://aimfc.mcan.gc.ca/fr/accueil).	30
Figure 2.1 Numérotation, localisation et coordonnées géographiques des 8 vergers à graines d'épinette blanche à l'étude situés dans la province de Québec et emplacement de la pépinière de St-Modeste où les plants ont été produits durant deux saisons de croissance. Les vergers sont identifiés de 1 à 8 en ordre croissant de latitude.	54
Figure 2.2 a) Courbes de croissance en hauteur des plants d'épinette blanche provenant des 8 verges à graines (Ve1 à Ve8) lors de leur deuxième saison de croissance (2+0) en pépinière forestière et dont les mesures ont été prises à chaque 2 semaines (n=25). (b) Courbes de croissance en hauteur des 5 groupes de vergers (G17, G2, G3, G45, G68) modélisées à partir d'un modèle de croissance logistique. Les vergers ont été groupés selon trois variables de croissance mesurées à la fin de la deuxième saison de croissance (2+0). (c) Courbes de croissance en hauteur des 3 groupes de vergers (G1723, G45, G68) modélisées à partir d'un modèle de croissance logistique. Les vergers ont été regroupés à partir des 5 groupes obtenus précédemment selon les paramètres de croissance démontrant une forte similitude (voir texte).....	64

Figure 2.3 a) Taux de photosynthèse b) conductance stomatique c) et transpiration des plants d'épinette blanche provenant de 8 vergers à graines au Québec (Ve1 à Ve8) et mesurés en chambre de croissance au mois d'août de la deuxième saison de croissance (2+0) (moyenne et erreur type, n=5 plants). Pour une variable donnée, les moyennes ayant la même lettre ne sont pas significativement différentes selon le test de Tukey ($\alpha = 0.05$). 67

Figure 2.4 Nombre de primordia par bourgeon terminal des plants d'épinette blanche 2+0 provenant de 8 vergers à graines au Québec (Ve1 à Ve8) (moyenne et erreur type, n=5 plants). Les moyennes ayant la même lettre ne sont pas significativement différentes selon le test de Tukey ($\alpha = 0.05$). 69

Figure 2.5 Groupement des vergers à graines à partir de trois variables morphologiques mesurées à la fin de la seconde saison de croissance (17 octobre 2012); la masse sèche des racines, la hauteur et le contenu en N des parties aériennes. Ce groupement a été obtenu en utilisant la méthode Ward. Les vergers aux symboles semblables font partie du même groupe. 70

Figure 2.6 a) Asymptote b) point d'inflexion c) taux de croissance (moyenne et erreur type) des 3 courbes de croissance en hauteur modélisées selon un modèle logistique de croissance pour la deuxième année de croissance (2+0) en pépinière pour les 3 regroupements de vergers à graines d'épinette blanche (G1723, G45, G68). Pour une variable donnée, les moyennes ayant la même lettre ne sont pas significativement différentes selon le test de Bonferroni au seuil $\alpha = 0,017$ 71

Figure 2.7 Hauteur des plants des 8 vergers à graines d'épinette blanche confondus à la fin de la première saison de croissance en plantation pour chacun des 3 sites forestiers (moyenne et erreur type, n=2048 plants par site). Les moyennes n'ayant pas la même lettre sont significativement différentes selon le test de Tukey ($\alpha = 0,05$). 72

Figure 2.8 Hauteur des plants provenant de chacun des 8 vergers à graines d'épinette blanche (Ve1 à Ve8) pour les 3 sites de plantation à la fin de la première saison d'établissement (moyenne et erreur type, n=256 plants par verger). Les moyennes ayant la même lettre ne sont pas significativement différentes selon le test de Tukey ($\alpha = 0,05$). 73

Liste des abréviations

A:	Photosynthèse nette
CCMF :	Conseil canadien des ministres des forêts
CCNUCC:	Convention-Cadre des Nation Unies sur les Changements Climatiques
COP:	Conférence des parties
DGPSP :	Direction générale des pépinières et des stations piscicoles, Québec
DRF :	Direction de la recherche forestière, Québec
ET :	Evaporanspiration
ECP:	Extension concentration pathways
FAO :	Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture
GES:	Gaz à effet de serre
GIEC :	Groupe d'experts intergouvernementaux sur l'évolution du climat
g_{sw} :	Conductance stomatique
H:	Hauteur
MDDEFP:	Ministère du développement durable, de l'environnement, de la faune et des parcs, Québec
MFFP :	Ministère des forêts de la faune et des parcs, Québec
OMM :	Organisation météorologique mondiale
PACC:	Plan d'action sur les changements climatiques
PNUE :	Programme des Nations Unies pour l'environnement
RCP :	Representative Concentration Pathways
SFS :	Surface foliaire spécifique (cm^2/g)
SPEDE:	Système de plafonnement et d'échange de droits d'émission
SSP:	Shared socio-economic pathways
V/V:	Volume/Volume
Ve:	Verger à graines
WCI:	Western Climate Initiative
WUE:	Efficiency de l'utilisation de l'eau (Water use efficiency)

À Christiane et Claude

Remerciements

Le soutien financier de ce projet a été assuré par une subvention du Fonds de Recherche du Québec – Nature et Technologies (FRQNT) et par le Programme à la découverte du Conseil de recherche en sciences naturelles et en génie (CRSNG) accordé au Professeur Hank Margolis. Un soutien complémentaire a également été assuré par les projets du Ministère des forêts de la faune et des parcs (MFFP) accordés au Dr. Mohammed Lamhamedi.

Ce projet de maîtrise a pu être réalisé suite à la précieuse collaboration de nombreuses personnes que je souhaite remercier sincèrement.

Tout d'abord, j'aimerais remercier mon directeur de recherche, Dr. Hank Margolis, professeur titulaire de l'Université Laval, pour m'avoir permis de poursuivre mes études et ainsi de bénéficier d'un environnement académique de très grande qualité. J'ai eu la chance de travailler avec un professeur et chercheur de renom qui a su être à l'écoute et me porter conseil tout au long de ma maîtrise.

J'aimerais également remercier mon co-directeur, Dr. Mohammed S. Lamhamedi, chercheur scientifique émérite à la Direction de la recherche forestière (DRF) du MFFP et professeur associé de l'Université Laval, pour sa grande expertise, sa présence et ses encouragements constants qui m'ont permis de persévérer tout au long de mon cheminement. Un très grand merci aussi à l'équipe Mario Renaud, Linda Veilleux et Pascal Desjardins pour votre aide indispensable.

Merci à vous deux, Hank et Mohammed, pour votre confiance, votre grande disponibilité et générosité. Vous avez été pour moi, des directeurs exceptionnels.

De plus, je tiens à remercier Jean Beaulieu, chercheur émérite du Centre canadien sur la fibre de bois du Service canadien des forêts, le professeur Jean Bousquet de la Faculté de foresterie, de géographie et de géomatique, le chercheur André Rainville de la DRF, Michel Rioux, Julie Gravel-Grenier et tout le personnel de la pépinière de St-Modeste du MFFP pour leur importante collaboration à ce projet.

Je remercie tout particulièrement Josianne DeBlois de la DRF du MFFP pour son aide extrêmement précieuse en matière de statistiques et sa grande disponibilité ainsi que Denis Langlois, Carol De Blois et le personnel du Laboratoire de chimie organique et inorganique de la DRF du MFFP.

Je remercie également l'équipe de l'Université Laval, spécialement le Dr. Lahcen Benomar pour ses conseils et son aide ainsi que le Dre. Marie Coyea pour sa précieuse présence et son soutien quotidien.

Ma reconnaissance va également au professeur Steeve Pépin du Département des sols et génie agroalimentaire, Debra-Christiansen Stowe de Takuvik, François Larochelle de la Faculté de foresterie, de géographie et de géomatique et Guido Gagnon et Marie-Claude Lambert de la DRF.

J'aimerais finalement remercier mes parents pour m'avoir toujours encouragée et cru en moi ainsi qu'à Steve pour son soutien et sa présence.

Introduction générale

L'épinette blanche (*Picea glauca* (Moench) Voss) s'étend de l'est jusqu'à l'ouest de l'Amérique du Nord (Nienstaedt et Zasada 1990) et compte parmi les essences les plus reboisées au Canada. Au Québec, elle représente environ 20% des 130 millions de plants produits annuellement pour le reboisement (Claude Gagné 2014, MFFP, communication personnelle). Son bon taux de survie après plantation, son rendement élevé et ses qualités de bois supérieures lui confèrent une grande importance économique en Amérique du Nord (Beaulieu et Corriveau 1985).

Le programme d'amélioration génétique de l'épinette blanche est nettement avancé par rapport aux autres principales essences résineuses commerciales utilisées dans les programmes de reboisement au Québec (e.g., épinette noire, pin gris, etc.). En effet, pendant les années 1980, des vergers à graines de première génération ont été établis à partir d'arbres-plus sélectionnés afin de produire des semences de meilleure qualité pour la production de plants destinés au reboisement. À la fin des années 1990, les vergers clonaux de deuxième génération ont été établis procurant un rendement supérieur à ceux de première génération (Beaulieu et al 2009). On compte maintenant 21 vergers à graines de première génération et trois vergers de deuxième génération fournissant 98% des semences vouées à la production de plants d'épinette blanche au Québec (Rainville et al. 2003, Beaulieu et al. 2009, Lamhamedi et Carles 2012).

En plus de la production de semences par vergers à graines procurant un gain allant de 8 à 16% en volume marchand comparativement aux semences non-améliorées, la multiplication végétative constitue une avancée substantielle du programme d'amélioration génétique de l'épinette blanche pouvant procurer un gain en volume de plus de 35% (Rainville et al. 2011). Le bouturage, effectué sur des plants issus de familles biparentales, permet de produire un grand nombre de plants dotés d'un gain génétique élevé (Gravel-Grenier et al. 2011). L'embryogenèse somatique est une technique de multiplication végétative plus récente utilisant aussi les semences issues de croisements dirigés. Cette technique permet de multiplier à l'infini des génotypes ou clones hautement productifs. Bien qu'il existe une grande variabilité familiale et clonale, l'héritabilité clonale de certains paramètres de performance, telle que la hauteur, observée au stade juvénile et sur les sites de reboisement permet de sélectionner les clones les plus performants (Wahid et al. 2013, Wahid et al. 2012a, Wahid et al. 2012b). L'intégration des clones somatiques sélectionnés, comme pieds-mères, dans la filière du bouturage de masse à l'échelle opérationnelle est fonctionnelle; ce qui permet de contribuer grandement à l'augmentation du gain génétique par rapport aux peuplements naturels (Lamhamedi et al. 2011). À l'heure actuelle, près de 1500 clones somatiques de l'épinette blanche ont été caractérisés selon des variables morpho-physiologiques sous forme d'un catalogue des variétés clonales (Lamhamedi et Gravel-

Gernier 2012). Ces variétés sont également en cours d'évaluation dans le cadre de tests clonaux (Wahid et al. 2013, Wahid et al. 2012a, Wahid et al. 2012b).

En parallèle, plusieurs avancées ont été réalisées en termes de développement de marqueurs moléculaires depuis les années 2000. Ces marqueurs d'ADN permettent d'estimer la valeur génétique des plants dès leur jeune âge pour des caractéristiques recherchées (Beaulieu et al. 2014b). Des études réalisées sur l'épinette blanche ont permis d'associer plusieurs marqueurs liés à des caractères de qualité du bois (MacKay et al. 2012, Beaulieu et al. 2011). L'évaluation de tels critères demande entre 15 à 25 années de croissance (Beaulieu et al. 2014a). Le recours à l'intégration de la sélection génomique dans le cadre du programme d'amélioration génétique de l'épinette blanche peut permettre de réduire le cycle d'amélioration à 10 ans. Cette approche pourrait être intégrée dès les premières étapes de l'embryogenèse somatique en utilisant du tissu embryogène avant la production de plants ou l'installation de tests clonaux. Ceci permettra de raccourcir davantage le cycle de sélection, ainsi que le coût associé au programme d'amélioration génétique de l'épinette blanche.

Les populations d'épinette blanche sont localement adaptées aux conditions climatiques dans lesquelles elles se développent et les sources de semences améliorées sont déplacées selon des modalités qui assurent cette adaptation (Lamontagne 1992, Beaulieu et al. 2009). Depuis l'époque préindustrielle, la concentration en dioxyde de carbone a augmenté de 40% et selon le scénario RCP 6.0 du GIEC, la température moyenne actuelle à la surface du globe devrait dépasser 2°C d'ici la fin du 21^{ème} siècle en plus d'entraîner des changements de précipitations, de conditions climatiques extrêmes et de perturbations naturelles (GIEC 2013, Bourque et Simonet 2008). Par exemple, au Québec, d'ici 2100, les modèles prévoient une augmentation de la température moyenne de 2 à 3.5°C en été en plus d'une diminution des précipitations entraînant de sévères épisodes de stress hydrique en été, une couverture nivale tardive à l'automne et la fonte hâtive au printemps pour les régions caractérisées par la présence de la forêt boréale de la province (Bourque et Simonet 2008, Logan et al. 2011). Ces changements climatiques provoqueront le déplacement des niches écologiques vers le nord à une vitesse d'environ 5 km par année, vitesse qui est nettement supérieure à celle de la capacité naturelle de déplacement des essences forestières ayant été évaluée à moins de 0.5 km année (Iverson et al. 2004, Hamman et Wang 2006, Aitken et al. 2008, Williams et Dumroese 2013a). Les populations et les sources de semences, adaptées au climat local, pourraient ne plus être adaptées au climat futur, ce qui peut affecter à la fois la vulnérabilité aux stress biotiques et abiotiques et la productivité des plantations et des forêts naturelles (Aitken et al. 2008, St. Clair. 2008).

Les plantations sont reconnues mondialement comme un moyen d'adaptation et d'atténuation aux changements climatiques (FAO 2010). La migration assistée figure parmi les stratégies d'adaptation mise de

l'avant ayant recours aux plantations. Cette migration consiste à faire un déplacement d'espèces ou de populations afin d'assortir les sources génétiques les mieux adaptées aux conditions climatiques futures tout en étant adaptées aux conditions présentes (Aitken et al. 2008, Mueller et Hellman 2008). Le Conseil canadien des ministres des forêts (CCMF) recommande d'ailleurs de recourir à la migration assistée et de procéder à l'établissement de plantations à l'aide de provenances ou de sources génétiques adaptées aux climats futurs anticipés afin d'accélérer l'adaptation et la durabilité des forêts (Johnston 2009).

Deux objectifs peuvent être visés par l'implantation de la migration assistée soit (1) de conserver une espèce en prévenant son extinction ou encore (2) de maintenir la productivité des forêts et la santé des écosystèmes. Il existe plusieurs formes de migration assistée selon la distance et l'étendue de déplacement (Pedlar et al. 2012, Ste-Marie et al. 2011, Aitken et Whitlock 2013).

La migration assistée est adoptée à l'échelle internationale. Par exemple, au Mexique, la variation génétique de 8 populations (séparées par 100 m d'altitude selon un gradient allant de 2200 et 2900 m) de *Pinus pseudostrobus* (Lindley), une espèce commerciale utilisée dans les programmes de reforestation, a été évaluée sur les plants de 2 ans lors de leur croissance en pépinière au Mexique mais aussi en Idaho aux États-Unis correspondant ainsi à un déplacement à l'extérieur de la zone de distribution de l'espèce (Saenz-Romero et al. 2012). Au Canada, des populations venant de 16 espèces provenant de la Colombie-Britannique et des états de Washington, d'Orégon et d'Idaho ont été plantées sur 46 sites allant du nord de la Californie jusqu'au sud du Yukon visant à établir des relations entre la croissance et le climat afin de déterminer les sources génétiques les mieux adaptées au climat présent et futur (Marris, 2009). Il s'agit d'un rare projet portant sur la migration assistée effectuée sur de très longues distances vers le nord en plus d'évaluer l'effet d'un réchauffement du climat en déplaçant les provenances du nord vers le sud (Williams et Dumroese 2013a). Au Canada, la migration assistée est principalement centrée sur le mouvement des populations d'espèces commerciales à l'intérieur ou près des limites de l'aire de distribution (St-Marie et al. 2011, Pedlar et al. 2011). Par exemple, en Colombie-Britannique, la modélisation du volume marchand de 60 populations de pin lodgepole à partir de 9 variables climatiques annuelles (1961-1990) a permis de démontrer que l'habitat supportant cette espèce devrait se déplacer vers le nord de la province d'ici 2085 (O'Neill et al. 2008).

Malgré les effets positifs d'un déplacement assisté des essences, il existe certaines inquiétudes concernant l'incertitude des risques liés à la migration assistée. Il est toutefois reconnu que les risques ne sont pas les mêmes selon le type de migration assistée effectué et qu'ils augmentent avec la distance de migration (Vitt et al. 2010, Ste-Marie et al. 2011). Lors d'un déplacement effectué sur de longues distances comme dans le cas de la conservation d'une espèce exotique, les risques peuvent être liés à l'introduction de nouveaux

pathogènes ou à la présence d'un stress additionnel aux populations locales. Dans le cas du maintien de la productivité des écosystèmes forestiers, les incertitudes peuvent être liées au choix du génotype à déplacer (Aubin et al. 2011).

L'utilisation des semences à l'échelle opérationnelle dans un programme de migration assistée demande des connaissances approfondies du matériel génétique au niveau de la pépinière jusqu'à la plantation en milieu naturel (Williams et Dumroese 2013b). Jusqu'à maintenant, des modèles de transfert de semences ont été développés et sont révisés afin d'assurer le transfert des sources de semences les mieux adaptées au futur climat (Rainville et al. 2014). Cependant, aucuns travaux *in situ* n'a été réalisé afin d'évaluer l'adaptation et les réponses morpho-physiologiques des sources génétiques utilisées dans le programme de reboisement de l'épinette blanche lors d'un réel déplacement selon les domaines bioclimatiques afin d'optimiser les meilleures stratégies de migration assistée. La caractérisation des sources génétiques dès le jeune âge en pépinière jusqu'au site de plantation, permet d'acquérir des bases scientifiques solides afin d'identifier et de sélectionner le matériel génétique hautement productif et adapté aux changements climatiques tels qu'un futur déplacement de l'habitat de l'espèce vers le nord.

Le projet de recherche rapporté dans ce mémoire de maîtrise porte sur la caractérisation morpho-physiologique des différentes sources génétiques de l'épinette blanche produites en pépinière à partir de semences provenant de 8 vergers à graines de 1^{ère} (6) et de 2^{ème} génération (2) au Québec. Les variables de croissance (hauteur, diamètre, masses sèches des parties aériennes et des racines) et la nutrition minérale (N, P, K, Ca, Mg) ont été évaluées durant deux années de croissance consécutives (1+0 et 2+0) à une échelle opérationnelle, soit en conditions de pépinière forestière. Les échanges gazeux, le nombre de primordia et la cinétique du débournement ont aussi été évalués durant leur croissance au cours de cette période. Les plants de ces différentes sources génétiques ont été mis en terre dans trois sites appartenant à trois domaines bioclimatiques différents du Québec.

Le premier chapitre de ce mémoire met l'accent sur une revue de littérature traitant de l'effet des changements climatiques sur les essences forestières et la migration assistée comme moyen d'adaptation. La variabilité génétique de l'épinette blanche y est aussi traitée. Le second chapitre présente l'étude réalisée en pépinière sur la caractérisation morpho-physiologique de 8 sources génétiques de l'épinette blanche au Québec en vue d'une migration assistée. Les résultats de croissance en hauteur, le taux de survie et les dégâts reliés au gel observés sur les trois sites pendant la phase d'installation sont également présentés. Le troisième chapitre est une conclusion générale résumant les principaux résultats de l'étude et traitant de la portée et des limites de l'étude ainsi que des suggestions pour les recherches futures.

Objectifs et hypothèses de recherche

Objectifs

Caractériser les variables morpho-physiologiques (hauteur, diamètre, masses sèches des parties aériennes et des racines, nutrition minérale, échanges gazeux et nombre de primordia) des différentes sources génétiques de l'épinette blanche en pépinière forestière pendant deux saisons consécutives (1+0 et 2+0).

Caractériser la cinétique du débourrement des différentes sources génétiques de l'épinette blanche en milieu contrôlé (3+0).

Évaluer la performance des sources génétiques d'épinette blanche pendant la phase d'installation en site de plantation simulant une migration assistée sur trois sites de plantation répartis dans trois domaines bioclimatiques du Québec.

Hypothèses

Les plants d'épinette blanche issus de vergers à graines provenant des différentes régions du Québec ont des réponses morpho-physiologiques différentes sous les mêmes conditions environnementales et régies de culture en pépinière et en plantation sur différents sites de reboisement.

Les performances morpho-physiologiques en pépinière de certaines sources génétiques pourraient permettre de définir des groupes homogènes et d'établir des corrélations au climat d'origine des vergers.

Références

- Aitken, S. N., Yeaman, S., Holliday, J. A., Wang, T., et Curtis-McLane, S. 2008. Adaptation, migration or extirpation: climate change outcomes for tree populations. *Evolutional Applications* **1**: 95-111.
- Aitken, S. N., et Whitlock, M. C. 2013. Assisted gene flow to facilitate local adaptation to climate change. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* **44**: 367-388
- Aubin, I., Garbe, C. M., Colombo, S., Drever, C. R., McKenny, D. W., Messier, C., Pedlar, J., Saner, M. A., Venier, L., Wellstead, A. M., Winder, R., Witter, E., et Ste-Marie, C. 2011. Why we disagree about assisted migration: Ethical implications of a key debate regarding the future of Canada's forests. *Forestry Chronicle* **87**: 755-765.
- Beaulieu, J., et Corriveau, A. 1985. Variabilité de la densité du bois et de la production des provenances d'épinette blanche, 20 ans après plantation. *Canadian Journal of Forest Research* **15**: 833-838.
- Beaulieu, J., Daoust, G., Deshaies, A., Lamhamedi, M. S., Rainville, A., et Tourigny, M. 2009. Amélioration génétique des arbres, gestion des vergers à graines et de semences, et production de plants forestiers. *Dans Manuel de foresterie*. O.I.F.Q. Les Presses de l'Université Laval, Québec. p. 1095-1146.
- Beaulieu, J., Doerksen, T., Boyle, B., Clément, S., Deslauriers, M., Beauseigle, S., Blais, S., Poulin, P-L., Lenz, P., Caron, S., Ringaults, P., Bicho, P., Bousquet, J., et MacKay, J. 2011. Association genetics of wood physical traits in the conifer white spruce and relationships with gene expression. *Genetics* **188**: 197-214.
- Beaulieu, J., Doerksen, T., Clément, S., MacKay, J., et Bousquet, J. 2014. Accuracy of genomic selection models in a large population of open-pollinated families in white spruce. *Heredity* **113**: 343-352.
- Beaulieu, J., Doerksen, T. K., Mackay, J., Rainville, A., Bousquet, J. 2014b. Genomic selection accuracies within and between environments and small breeding groups in white spruce. *BMC Genomics* **15**: 1048.
- Bourque, A., et Simonet, G. 2008. Québec. *Dans From impacts to adaptation : Canada in a changing climate 2007. Édité par D. S. Lemmen, F. J. Warren, J. Lacroix et E. Bush*. Gouvernement du Canada. Ottawa. ON. p. 171-226.
- FAO. 2010. *Planted Forests in Sustainable Forest Management, A Statement of Principles*. Consulté en ligne: <http://www.fao.org/docrep/012/al248e/al248e00.pdf>, le 5 décembre 2014.
- FAO. 2013. *État des forêts méditerranéennes 2013*. Consulté en ligne: <http://www.fao.org/docrep/017/i3226f/i3226f.pdf>, le 19 décembre 2014.
- GIEC, 2013. Résumé à l'intention des décideurs, *Changements climatiques : Les éléments scientifiques*. Contribution du Groupe de travail I au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York, États-Unis d'Amérique. 36 p.
- Gravel-Grenier, J., Lamhamedi, M. S., Beaulieu, J., Carles, S., Margolis, H. A., Rioux, M., Stowe, D. C., et Lapointe, L. 2011. Utilization of family genetic variability to improve the rooting ability of white spruce (*Picea glauca*) cuttings. *Canadian Journal of Forest Research* **41**: 1308-1318.
- Hamman, A., et Wang, T. L. 2006. Potential effects of climate change on ecosystem and species distribution in British Columbia. *Ecology* **87**: 2773-2786.

Iverson, L. R., Schwartz, M. W., et Prasad A. M. 2004. How fast and far might tree species migrate in the eastern United States due to climate change? *Global Ecology and Biogeography* **13**: 209-219.

Johnston, M. 2009. Vulnérabilité des arbres du Canada aux changements climatiques et propositions de mesures visant leur adaptation : un aperçu destiné aux décideurs et aux intervenants du monde forestier. Conseil canadien des ministres des forêts. 47 p.

Lamhamedi, M. S., et Carles, S. 2012. Avis de recherche forestière n°39, le verger à graines d'où proviennent les semences peut-il affecter la croissance juvénile des plants d'épinette blanche? Direction de la recherche forestière, Ministère des Ressources naturelles. 2 p.

Lamhamedi, M. S., et Gravel-Genier, J. 2012. La sélection précoce des variétés somatiques hautement productives: élément clef de l'amélioration de la chaîne de valeur du bois au Québec. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Direction de la recherche forestière. Avis de recherche forestière n°41. 2 p.

Lamhamedi, M. S., Rainville, A., Colas, F., Wahid, N. Prigent, G., et Gravel-Genier, J. 2011. Les variétés somatiques à haut rendement : un outil précieux d'intensification de la production. Résumé d'un stand présenté lors du Carrefour Forêt Innovations organisé par le ministère des Ressources naturelles et de la Faune. 4-6 octobre 2011. Québec.

Lamontagne, Y. 1992. Bilan des réalisations, Mémoire de recherche n°106. Vergers à graines de première génération et tests de descendance implantés au Québec pour les espèces résineuses. Gouvernement du Québec, Ministère des Forêts, Direction de la recherche, Québec.

Logan, T., Charron, I., Chaumont, D., et Houle, D. 2011. Atlas de scénarios climatiques pour la forêt québécoise. Ouranos et MRNF. 55 p.

MacKay, J., Dean, J. F. D., Plomion, C., Peterson, D. G., Cánovas, F. M., et Pavy, N. 2012. Towards decoding the conifer giga-genome. *Plant Molecular Biology* **80**: 555-569.

Marris, E. 2009. Planting the forest of the future. *Nature* **459**: 906-908.

Mueller, J. M., et Hellmann, J. J. 2008. An assessment of invasion risk from assisted migration. *Conservation Biology* **22**: 562-567.

Nienstaedt, H., et Zasada, J.C. 1990. *Picea glauca* (Moench) Voss White spruce. In *Silvics of North America* vol. 1. Conifers - Agriculture handbook no. 654 Eds. R.M. Burns and B.H. Honkala. États-Unis. Department of Agriculture, pp. 204-226.

O'Neill, G. A., N. Ukrainetz, M. Carlson, C. Cartwright, B. Jaquish, J. King, J. Krakowski, J. H. Russell, M. Stoehr, C-Y. Xie, et A. Yanchik. 2008. Assisted migration to address climate change in British Columbia. Recommendations for interim seed transfer standards. BC Min. For. Range, Res. Br., Victoria, BC. Tech. Rep. 048. 28 p.

Pedlar, J., D. W. McKenney, J., Aubin, I., Beardmore, T., Beaulieu, J, Iverson, L., O'Neill, G. A., Winder, R., et Ste-Marie, C. 2012. Placing forestry in the assisted migration debate. *Bioscience* **69**: 835-842.

Pedlar, J., D.W. McKenney, J. Beaulieu, G.A. O'Neill, J.S. McLachlan, et S.J. Colombo. 2011. The implementation of assisted migration in Canadian forests. *Forestry Chronicle* **87**: 766-777.

- Rainville, A., Wahid, N., Lamhamedi, M. S., Prigent, G., et Beaulieu, J. 2011. Les plants issus de l'embryogénèse somatique : un énorme potentiel à notre portée pour augmenter la productivité forestière! Dans : Colas, F.; Lamhamedi, M.S. (éds), 2011. 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), 140 p. pp : 119-124.
- Rainville, A., Beaulieu, J., Langevin, L., Logan, T., et Lambert, M-C. 2014. Prédire l'effet des changements climatiques sur le volume marchand des principales espèces résineuses plantées au Québec, grâce à la génétique forestière. Mémoire de recherche forestière No 174. Ministère des Forêts, Faune et Parcs Québec.
- Rainville, A., Despôts, M., Beaudoin, R., Prinnet, P., Mottet, M.J. et Perron, M. 2003. Note de recherche forestière n° 127, l'amélioration des arbres au Québec: un outil de performance industrielle et environnementale. Direction de la recherche forestière, Ministère des Ressources naturelles, de la Faune et des Parcs du Québec. 8 p.
- Saenz-Romero, C., Rehfeldt, G. E., Soto-Correa, J. C., Aguilar-Aguilar, S., Zamarripa-Morales, V., et Lopez-Upton, J. 2012. Altitudinal genetic variation among *Pinus pseudostrobus* populations from Michoacan, Mexico. Two locations shadehouse test results. *Revista Fitotecnia Mexicana* **35**: 11-120.
- St.Clair, B. 2008. Genetic Resources and Climate Change. 2008. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Climate Change Resource Center. <http://www.fs.fed.us/ccrc/topics/genetic-resources.shtml>.
- Ste-Marie, C., Nelson, E. A., Dabros, A., et Bonneau, M. 2011. Assisted migration: Introduction to a multifaceted concept. *Forestry Chronicle* **86**: 724-730.
- Vitt, P., K. Havens, A. T. Kramer, D. Sollenberger, et E. Yates. 2010. Assisted migration of plants: Changes in latitudes, changes in attitudes. *Biological Conservation* **143**: 18–27.
- Wahid, N., Lamhamedi, M. S., Beaulieu, J., Margolis, H. A., et Deblois, J. 2012a. Genetic parameters and clonal variation in growth and nutritional traits in containerized white spruce somatic seedlings. *Acta Botanica Gallica* **159**: 373–384.
- Wahid, N., Lamhamedi, M. S., Rainville, A., Beaulieu, J., et Margolis, H. A. 2013. Genetic Control and Nursery-Plantation Genotypic Correlations for Growth Characteristics of White Spruce Somatic Clones, *Journal of Sustainable Forestry* **32**: 576-593.
- Wahid N., Rainville, A., Lamhamedi, M. S., Beaulieu, J., Margolis, H. A., et Deblois, J. 2012b. Genetic parameters and performance stability of white spruce somatic seedlings in clonal tests. *Forest Ecology and Management* **270**: 45–53.
- Williams, M. I., et Dumroese R. K. 2013a. Growing assisted migration: synthesis of a climate change adaptation strategy. In: Haase DL, Pinto JR, Wilkinson KM, technical coordinators. National Proceedings: Forest and Conservation Nursery Associations—2012. Fort Collins (CO): USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station. Proceedings RMRS-P-69. 90-96. Disponible à http://www.fs.fed.us/rm/pubs/rmrs_p069.html.
- Williams, M. I., et Dumroese, R. K. 2013b. Preparing for climate change: Forestry and assisted migration. *Journal of Forestry* **111**: 287–297.

Chapitre 1 - Revue de littérature

1.1 Les changements climatiques

Les changements climatiques actuels font l'objet de nombreuses préoccupations à l'échelle mondiale. En 1988, l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM) et le Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE) ont créé le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) regroupant des experts répartis dans plus de 130 pays et ayant pour mission d'évaluer de façon objective, les informations d'ordre scientifique, technique et socio-économique nécessaires pour mieux comprendre les fondements scientifiques des risques et les conséquences liées aux changements climatiques d'origine humaine. À tous les cinq ans, le GIEC produit des rapports d'évaluation dont le cinquième fut complété en 2014. Le rôle des activités humaines sur l'augmentation rapide de la concentration atmosphérique en CO₂ depuis l'anthropocène est maintenant reconnu par la communauté scientifique et a été déterminé comme étant la principale cause des changements climatiques actuels et futurs (Cook et al. 2013, Oreskes 2004).

L'augmentation des émissions de carbone provient du changement d'utilisation des terres et de la déforestation et d'une manière plus importante, de la combustion d'énergies fossiles (Le Quéré et al. 2013). Le bilan de carbone, basé sur la décennie 2004-2013, indique que les émissions provenant de la combustion d'énergie fossile et de la production du ciment comptent pour $8,9 \pm 0,4 \text{ PgC an}^{-1}$ tandis que les émissions provenant du changement d'utilisation des terres comptent pour $0,9 \pm 0,5 \text{ PgC an}^{-1}$ (Le Quéré et al. 2014). Des quantités importantes du carbone atmosphérique peuvent être absorbées par les océans ($2,6 \pm 0,5 \text{ Pg C an}^{-1}$) et par les terres ($2,9 \pm 0,8 \text{ Pg C an}^{-1}$) (Le Quéré et al. 2014). Cependant, malgré l'importance de ces deux grands puits, la concentration atmosphérique en CO₂ ne cesse d'augmenter atteignant 398,24 ppm en novembre 2014 et le futur de l'absorption du CO₂ anthropogéniques par les terres et les océans reste incertain (Tans et Keeling 2014) (figure 1.1).

Afin d'analyser les conséquences de l'évolution des changements climatiques, plusieurs scénarios d'émissions ont été créés par la communauté scientifique au fil du temps et aujourd'hui, les scénarios doivent tenir compte de l'adoption des moyens d'atténuation et d'adaptation face aux changements climatiques (Moss et al. 2010).

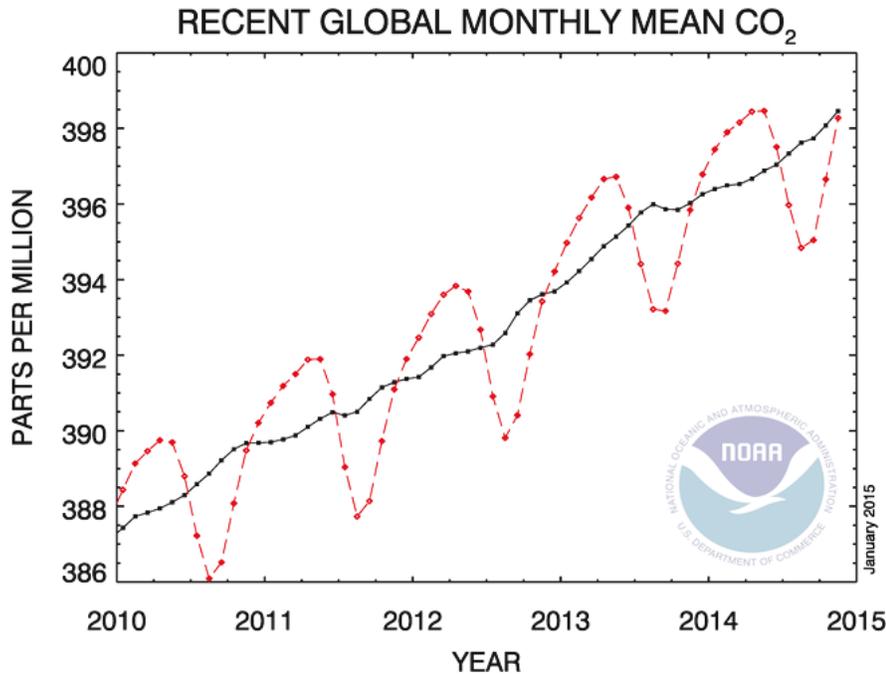


Figure 1.1 Concentration moyenne mensuelle en CO₂ (ppm) de 2010 à 2015. (Tirée de: Tans et Keeling 2014).

Dans son dernier rapport, le GIEC utilise 4 nouveaux scénarios d'émissions de référence appelés RCP (Representative Concentration Pathways) dont chacun correspond à un profil d'évolution du forçage radiatif (figure 1.2). Les 4 nouveaux scénarios sont le RCP 8.5 étant le scénario dont les émissions de gaz à effet de serre sont les plus élevées et dont le forçage radiatif continuera d'augmenter et atteindra 8.5 W m^{-2} à la fin du 21^{ème} siècle (Riahi et al. 2011), le RCP 6.0 dont les émissions en CO₂ atteindront un maximum et commenceront à diminuer après 2060 et dont le forçage radiatif se stabilisera à 6 W m^{-2} en 2100 (Masui et al. 2011), le RCP 4.5 dont les émissions atteindront un maximum vers 2040 pour ensuite diminuer jusqu'en 2080 et dont le forçage radiatif se stabilisera à $4,5 \text{ W m}^{-2}$ en 2100 (Thomson et al. 2011) et finalement le RCP 2.6 étant le seul scénario qui suggère un déclin du forçage radiatif et permettant ainsi de limiter le réchauffement planétaire à 2°C (van Vuuren et al. 2011). Comparativement aux anciens scénarios utilisés par le GIEC, l'extension dans le temps des RCP a été simulée (ECP) permettant ainsi de prendre en compte les effets de stabilisation du forçage radiatif à long terme pour chacun de ces scénarios (Meinshausen et al. 2011) (figure 1.2).

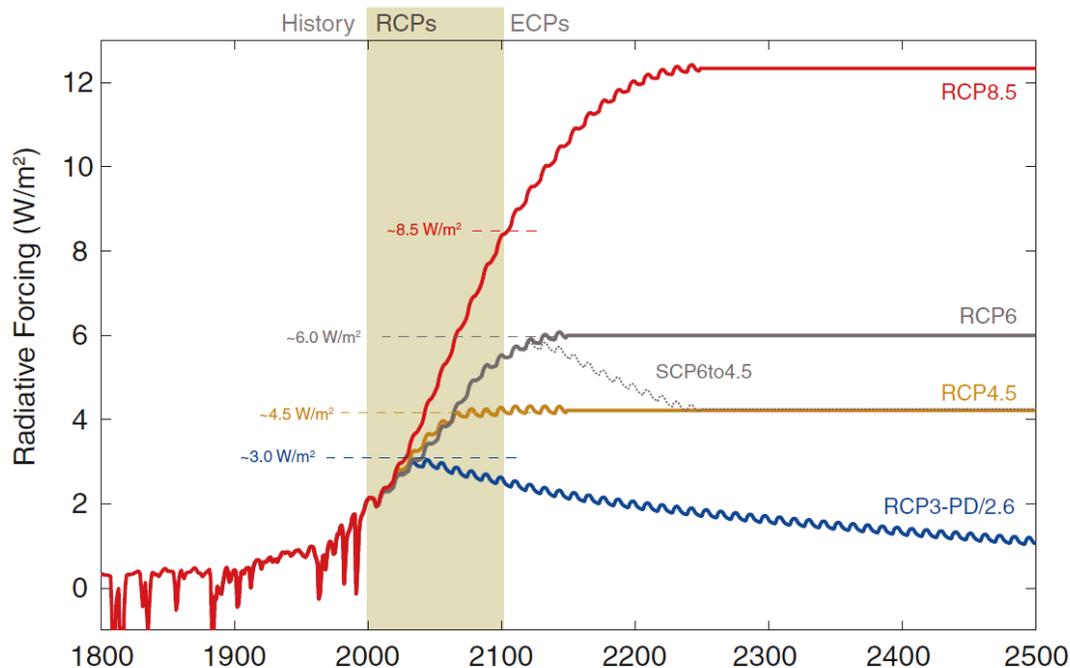


Figure 1.2 Forçage radiatif ($W m^{-2}$) pour chacun des 4 scénarios d'émissions (RCP 8.5, RCP 6, RCP 4.5, RCP 2.6 et l'extension de ces scénarios (ECP) (tirée de Meinshausen et al. 2011).

En plus des RCP, des scénarios de développement socio-économique mondial (shared socio-economic pathways (SSP)) ont été développés décrivant différentes tendances possibles d'évolution de la société et qui sont présentés selon leur niveau de défis socioéconomiques relatifs à l'adaptation au changement climatique et à l'atténuation des émissions de GES (O'Neill et al. 2013a). Il existe 5 SSP couvrant une large gamme de futurs possibles pour nos sociétés en commençant par le SSP 1 qui se caractérise par un faible défi d'adaptation et d'atténuation étant donné un développement durable avec peu d'inégalités entre les sociétés; le SSP 2, caractérisé par des défis à mi-chemin entre l'adaptation et l'atténuation; le SSP3, caractérisé par une forte croissance de la population, une croissance économique modérée et peu de changements technologiques dans le secteur de l'énergie générant ainsi de plus hauts défis d'adaptation et d'atténuation; le SSP 4, caractérisé par des inégalités mondiales et donc par un haut défi d'adaptation et un faible défi d'atténuation; puis le SSP 5, fondé sur l'absence de politique climatique et donc une forte consommation d'énergie provenant des technologies émettrices de carbone, le développement rapide des pays en voie de développement et une diminution de la pauvreté extrême augmentant ainsi la facilité d'adaptation mais tout en maintenant un très haut défi d'atténuation considérant des investissements peu élevés dans les technologies alternatives (O'Neill et al. 2013a, Kriegler et al. 2012). Afin d'évaluer les coûts, les risques et les avantages des politiques et stratégies d'atténuation et d'adaptation, les RCP et les SSP doivent être pris en compte

simultanément et une matrice reliant ces deux formes de scénarios a été élaborée (van Vuuren et al. 2014) (figure 1.3).

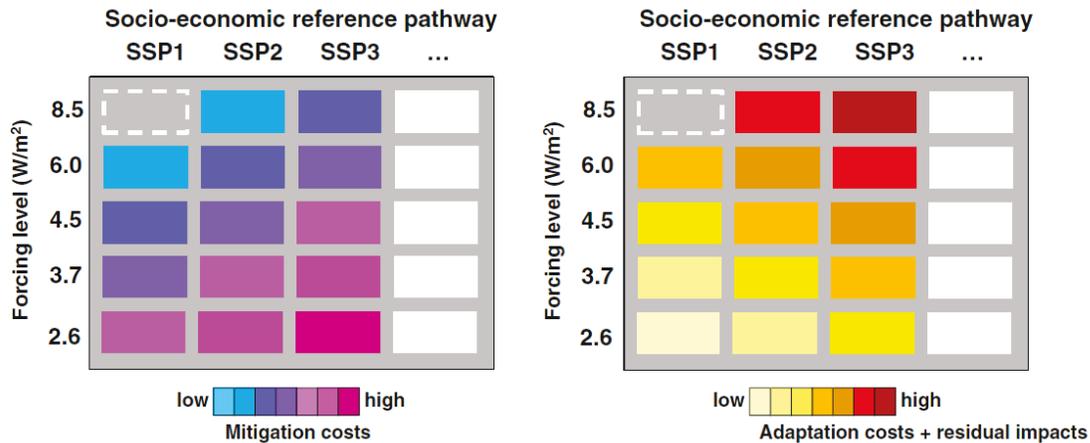


Figure 1.3 Matrices reliant les scénarios de référence du développement socio-économique mondial (SSP : Socio-economic reference pathway) et le forçage radiatif (forcing level) qui représente les scénarios RCP afin d'évaluer les coûts liés (allant de faibles (low) à élevés (high)) aux mesures d'atténuation (mitigation costs) et à l'adaptation (adaptations costs) aux changements climatiques (Figure tirée de: van Vuuren et al. 2014).

En comparant les émissions de CO₂ provenant de la combustion d'énergies fossiles et de la production du ciment avec les différents RCP, l'augmentation des émissions à un taux de 2,5% par année durant la dernière décennie aurait permis d'atteindre le scénario le plus pessimiste du GIEC, soit le RCP 8.5 (Friedlingstein et al. 2014). Il a été démontré qu'il serait techniquement possible d'atteindre un forçage radiatif de 2.6 W m⁻² d'ici la fin du siècle, cependant, sans moyens d'atténuation drastiques à l'échelle mondiale, il y aurait très peu de chance que le réchauffement demeure en dessous de 2°C d'ici la fin XXle siècle (Peters et al. 2013, van Vuuren et al. 2011). De plus, de par sa nature, le CO₂ est un gaz à effet de serre dont la présence dans l'atmosphère persiste dans le temps et donc malgré un arrêt des émissions, le réchauffement climatique peut demeurer irréversible jusqu'à plus de 1000 ans plus tard (Solomon et al. 2009).

Pour le Québec, selon le dernier rapport synthèse du Consortium sur la climatologie régionale et l'adaptation aux changements climatiques (Ouranos), le scénario d'émission RCP 8.5, signifie que la température annuelle devrait augmenter de 7°C pour la région du sud du Québec et de 10°C pour le centre et le nord du Québec pour 2100 (Ouranos 2014). Aussi, une hausse des précipitations devrait avoir lieu pour toutes les régions de la province avec une tendance à la baisse des précipitations sous forme de neige en hiver pour tout le Québec et une réduction de la durée de l'enneigement (Ouranos 2014).

1.1.1 L'impact des changements climatiques sur les forêts

Les changements climatiques peuvent entraîner d'importants impacts sur les forêts notamment en affectant la phénologie des arbres, la productivité des forêts, le stockage de carbone et la distribution des espèces (GIEC 2014). En plus d'une augmentation en CO₂, d'un changement des températures et du régime de précipitations, les changements climatiques se manifestent aussi par le changement de distribution, de fréquence et de sévérité des perturbations naturelles comme les feux de forêts, les épidémies d'insectes, la sécheresse, les maladies ou encore l'introduction de nouvelles espèces (Dale et al. 2001). Par exemple, le stress causé par les hausses de températures et les périodes de sécheresses, peut entraîner la mortalité d'espèces dominantes sur de grandes étendues et affecter plusieurs fonctions de l'écosystème notamment en ayant un impact sur la radiation, le cycle de l'eau, et celui du carbone (Anderegg et al. 2013).

Au Canada, les effets des changements climatiques sont observés à différents niveaux. Par exemple, à partir des données de température et de précipitations couvrant la période 1951 à 2010 et projetées jusqu'à la fin du 21^{ème} siècle, des indices d'humidité et de sécheresse ont été générés indiquant une augmentation de la fréquence des périodes de sécheresse extrême dans certaines régions pouvant entraîner des effets négatifs sur la santé des arbres et la régénération (Wang et al. 2014). Effectivement, de graves épisodes de sécheresse ont eu lieu en 2001-2002 dans la zone de transition entre les prairies et la forêt boréale, entraînant le dépérissement accru des peupliers faux-trembles (*Populus tremuloides* (Michx)) (Michaelian et al. 2011). Au Québec, selon une étude réalisée sur trois différents sites forestiers, soit dominé par l'érable à sucre (*Acer saccharum* (Marsh.)), le sapin baumier (*Abies balsamea* (L.) Mill) et l'épinette noire (*Picea mariana* Mill.), la température du sol devrait augmenter alors que la teneur en eau du sol devrait diminuer pour la saison de croissance d'ici la fin du 21^{ème} siècle pouvant ainsi entraîner un stress hydrique majeur (Houle et al. 2012). Aussi, un fort accroissement de la superficie brûlée de la forêt boréale de l'Ouest serait prévu pour le présent siècle (Flannigan et al. 2005). Des perturbations biotiques sont aussi à prévoir, d'ailleurs d'importantes épidémies du dendroctone du pin ponderosa (*Pinus ponderosa* C. Lawson) affectent présentement la Colombie-Britannique au point que la forêt passe du puits de carbone à une source de carbone selon les données estimées pour la période 2000-2020 (Kurz et al. 2008a, b). Du point de vue physiologique, Colombo (1998) a évalué l'impact des changements climatiques sur le débourrement de l'épinette blanche (*Picea glauca* (Moench) Voss) au Canada et sur les risques de dommages créés par le gel hâtif, démontrant que sous un climat plus chaud de 5°C, les plants pourraient débourrer de 1 à 2 semaines plus tôt.

Des changements dans la distribution spatiale des niches climatiques des espèces forestières devraient survenir. Effectivement, la température moyenne à la surface de la terre devrait dépasser les limites de la variabilité historique (période de 1860-2005) en 2069±18 ans selon le scénario RCP 4.5 ou bien en 2047±14 ans selon le scénario RCP 8.5, occasionnant ainsi une certaine vulnérabilité de la biodiversité mondiale (Mora

et al. 2013). À partir de tests de 14 combinaisons de modèles de distribution d'espèces et modèles de circulation globale, Malcolm et al. (2002) ont démontré que les distances de migration des espèces devraient être de 1000 mètres ou plus par année pour suivre leur habitat dans un scénario d'une augmentation de 2 fois plus d'émissions de CO₂. De leur côté, McKenney et al. (2007) ont estimé que les enveloppes climatiques, pour la majorité des espèces d'arbres d'Amérique du Nord, pourraient se déplacer de 330 à 700 km plus au nord au cours du prochain demi-siècle. Par ailleurs, des modèles de prédiction du potentiel de migration naturelle de 5 espèces d'arbres de l'est des États-Unis, sous des scénarios de changements climatiques, ont révélé des distances de dispersion d'en moyenne 100 à 200 m par année lors d'une simulation sur 100 ans (Iverson et al. 2004).

Les essences forestières peuvent s'adapter aux nouvelles conditions climatiques, cependant la capacité d'adaptation d'une espèce dépend de nombreux facteurs tels que la fécondité de l'espèce, la dispersion des semences, la distribution spatiale des perturbations telles que les épidémies d'insectes ou les feux de forêts et la distance à parcourir pour atteindre la niche écologique (Aitken et al. 2008). Pour certains écosystèmes, la rapidité des changements climatiques peut être inquiétante. Par exemple, en Colombie-Britannique, les écosystèmes des régions montagneuses sont très vulnérables aux changements climatiques puisque dans les 50 prochaines années, leur niche climatique devrait être complètement déplacée à l'extérieur de son aire actuelle (Hamman et Wang 2006).

De plus, une analyse de la végétation au nord du Canada n'a démontré aucune extension depuis les 25 dernières années malgré un réchauffement régional de 0.6 degrés (Masek 2001). Aussi, à partir d'un modèle basé sur des données écologiques et génétiques pouvant prédire les réponses d'une espèce aux changements climatiques, O'Neill et al. (2008) ont montré que les populations du pin lodgepole (*Pinus contorta* Dougl. ex Loud.) pouvaient répondre très différemment et donc que certaines pourraient être mieux adaptées au futur climat.

1.1.2 Les politiques adoptées face aux changements climatiques

Le Protocole de Kyoto, ratifié par 192 Parties de la Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC), fut adopté en 1997 et entra en vigueur en 2005 (UNFCCC 2014a). Ce Protocole visait une diminution de 5,2% des gaz à effet de serre pour la période de 2008 à 2012 par rapport au niveau de 1990 (Nations Unies 1998), ce qui n'a pas été atteint. Après avoir ratifié l'accord en 2005, le Canada s'est retiré officiellement du Protocole en 2011 indiquant que les objectifs visés étaient inatteignables tandis que les États-Unis refusent toujours de le ratifier. Par ailleurs, en 2009, 114 pays ont signé l'Accord de Copenhague qui confirme que la hausse de la température mondiale devrait être limitée à 2 °C et qui comprend les engagements de réduction des émissions prises par tous les grands émetteurs dont les États-Unis

(Ramanathan et Xu 2010). Un nouvel accord des Parties visant à relancer le Protocole de Kyoto est toujours en négociations et l'entente d'un nouvel accord devrait avoir lieu en 2015 lors de la 21^{ème} Conférence des Parties (COP) à Paris. Cet accord universel, devrait permettre un engagement de l'ensemble des pays afin de limiter à 2°C la hausse de la température globale moyenne d'ici 2100, par rapport à l'ère préindustrielle. En 2014, lors la 20^{ème} COP à Lima, au Pérou, l'ébauche de l'accord de Paris a été adoptée par toutes les parties et tous les pays, émergents ou riches, devront préciser et communiquer leurs engagements afin de réduire les émissions de gaz à effet de serre de 40 à 70 % d'ici à l'horizon 2050 (UNFCCC 2014b).

Pour le Canada, une réduction des émissions de 17% d'ici 2020 par rapport à celles de 2005 a été inscrite à l'Accord de Copenhague. Des mesures nationales sont prises pour réduire les GES au Canada notamment par la Réglementation des émissions de gaz à effet de serre du Canada qui couvre différents secteurs dont les transports, l'électricité, et les carburants renouvelables. Entre 2005 et 2012, les émissions canadiennes de GES ont diminué de 5,1% tout en maintenant une croissance économique et une baisse de 128 Mt est prévue d'ici 2020 par rapport aux émissions qui auraient été atteintes si aucune mesure n'avait été prise depuis 2005 (Environnement Canada 2013) (Figure 1.4).

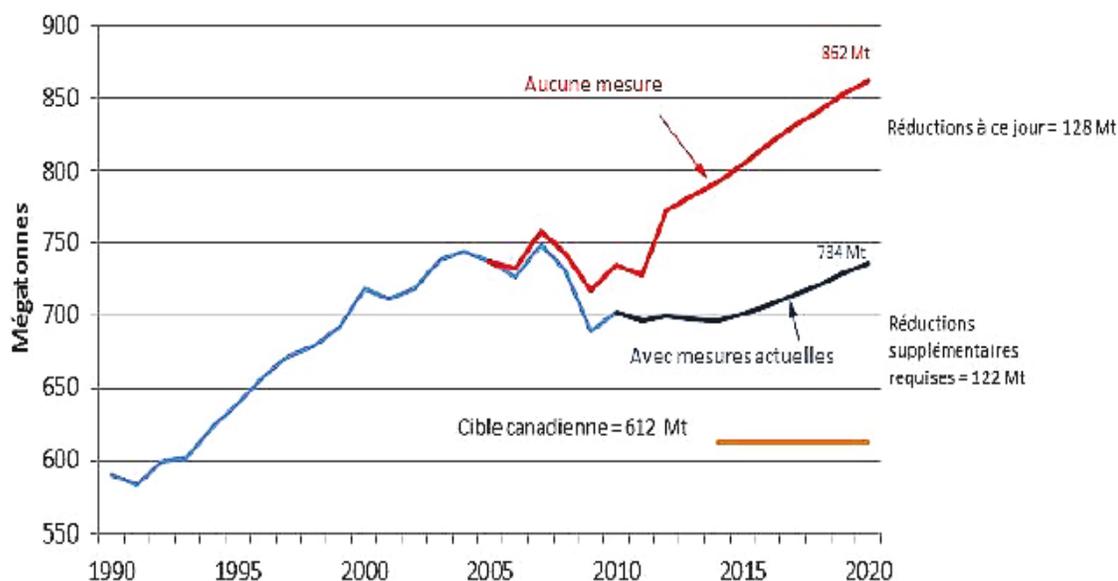


Figure 1.4 Émissions canadiennes de GES en mégatonnes depuis 1990, cible canadienne des émissions pour 2020 (612 Mt) et projections des émissions avec (734 Mt) et sans mesures d'atténuation 862 Mt) (tirée de: Environnement Canada 2013).

Parmi les mesures nationales, des normes nord-américaines spécifiques au secteur des transports ont été mises en place, en collaboration avec les États-Unis. Un règlement concernant les véhicules lourds devrait permettre de réduire jusqu'à 23 % des émissions moyennes de gaz à effet de serre provenant de ces véhicules d'ici 2018. De plus, un projet de règlement limitant les émissions des automobiles et camions légers

devrait aussi permettre de réduire les émissions moyennes de gaz à effet de serre provenant des véhicules d'environ 50 %. Au niveau des carburants, un règlement exige que 5% de l'essence soit composée en carburant renouvelable et 2 % dans le cas du diesel.

Les provinces ont aussi leurs propres engagements face aux changements climatiques. Pour le Québec, le plan d'action 2013-2020 sur les changements climatiques du gouvernement provincial (PACC 2013-2020), comporte 30 mesures visant à réduire les émissions des GES et favoriser l'adaptation de la société québécoise aux changements climatiques (MDDEFP. 2012).

En 2012, le gouvernement du Québec a mis sur pied le système québécois de plafonnement et d'échange de droits d'émission (SPEDE). Il s'agit d'un marché de carbone basé sur un plafond d'émissions de GES qui s'adresse aux entreprises qui émettent des émissions annuelles de GES dans une quantité égale ou supérieure à 25 000 tonnes métriques d'équivalent CO₂ (Gouvernement du Québec 2015). Les émetteurs auront un certain nombre d'unités d'émission allouées qui diminuera graduellement d'environ 1 à 2 % chaque année et le plafond d'émissions s'abaissera progressivement au fil des ans. Les entreprises qui émettront moins de GES que la quantité allouée pourront vendre leurs unités excédentaires sur le marché du carbone aux entreprises qui auront plus d'émissions que la quantité qui leur est allouée (figure 1.5) (Gouvernement du Québec 2015).

Ce SPEDE s'intègre au marché du carbone de la Western Climate Initiative (WCI). La WCI est un regroupement d'États américains et de provinces canadiennes qui souhaitent se doter d'une approche commune pour lutter contre les changements climatiques, notamment par le développement et la mise en œuvre d'un système nord-américain de plafonnement et d'échange de droits d'émission de GES. Le marché du carbone du Québec sera ainsi lié au marché de la Californie. Au niveau du marché nord-américain, l'objectif visé est d'atteindre des réductions d'émission de 20 % sous le niveau de 1990 d'ici 2020.

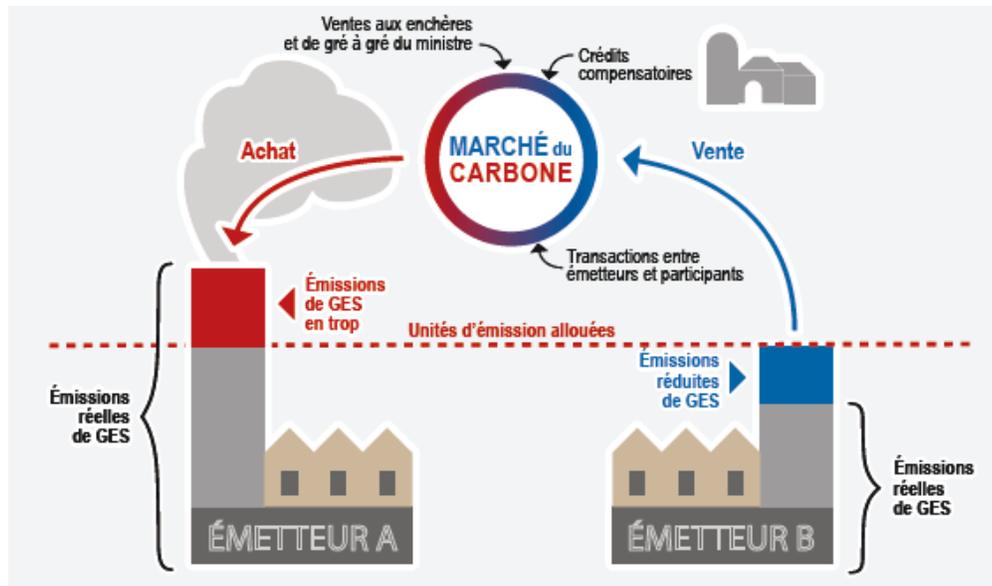


Figure 1.5 Fonctionnement du marché du carbone, selon un plafond d'unités d'émissions allouées (tirée de: www.mddelcc.gouv.qc.ca/changements/carbone/index.asp).

1.2 L'adaptation aux changements climatiques par la migration assistée

La forêt joue un grand rôle dans la lutte contre les changements climatiques en séquestrant une grande partie du carbone atmosphérique par la photosynthèse, et pour cette raison, la santé et la productivité des écosystèmes forestiers doivent être maintenus (UNEP 2014). La FAO (2013) reconnaît la contribution des plantations aux problématiques socio-économiques et environnementales et soutient que les plantations sont complémentaires aux forêts naturelles en permettant de diminuer la pression exercée sur les forêts naturelles que ce soit pour la restauration ou pour l'augmentation de la production du bois. Les plantations, dont la proportion augmente d'année en année depuis des décennies, représentent actuellement 7% de la surface forestière mondiale et leur utilisation peut couvrir un vaste éventail d'objectifs allant de la conservation à la production intensive de matière ligneuse (FAO 2013).

Au Canada, des politiques et règlements visant à améliorer la durabilité des forêts et l'adaptation aux changements climatiques est maintenant une priorité pour les gouvernements fédéraux et provinciaux et pour l'industrie. D'ailleurs, le Conseil Canadien des Ministres des Forêts (CCMF) recommande d'évaluer la tolérance des sources de semences aux variations du climat afin, d'optimiser les meilleures stratégies de migration assistée et d'établir des plantations à l'aide de provenances adaptées aux climats futurs anticipés afin d'accélérer l'adaptation des forêts (Johnston 2009).

La migration assistée, pouvant aussi être appelée colonisation assistée ou encore de relocalisation aménagée, est une stratégie d'adaptation ayant recours aux plantations qui se définit de manière générale par le déplacement d'espèces, assisté par l'humain, afin de faciliter leur adaptation aux conditions climatiques futures tout en étant adaptées aux conditions présentes (Seddon 2010, Mueller et Hellmann 2008, Vitt et al. 2010, Ricciardi et Simberloff 2009, Minter et Collins 2010).

Les distances de déplacement de migration assistée peuvent être regroupées selon 3 différentes stratégies et une terminologie a été proposée par Ste-Marie et al. (2011). On peut parler de migration assistée des populations qui correspond au déplacement réalisé à l'intérieur de l'aire de distribution de l'espèce, d'expansion assistée de la distribution qui correspond au déplacement juste à l'extérieur et en périphérie de l'aire de distribution de l'espèce et finalement, la migration assistée sur de longues distances qui représente un déplacement effectué loin à l'extérieur de l'aire de distribution de l'espèce (Ste-Marie et al. 2011).

L'implantation de la migration assistée peut être menée par deux grands objectifs, soit la conservation d'une espèce vulnérable à risque d'extinction ou encore, tel que dans la majorité des cas au Canada, pour maintenir la productivité des forêts et la santé des écosystèmes. Malgré l'utilisation du même terme, de très grandes nuances sont à faire par rapport à ces deux conceptions de la migration assistée (tableau 1.1).

La migration assistée : une approche de conservation

La migration assistée réalisée dans l'objectif de conservation d'une espèce vulnérable, priorise celles ayant un risque d'extinction sous un nouveau climat dû à un cycle de vie trop lent pour s'adapter à de nouvelles conditions, à une capacité de dispersion très locale ou encore à des limitations de distribution causées par un habitat fragmenté (Hannah 2008). De manière générale, pour un objectif de conservation, le déplacement se fera au niveau de l'espèce et aura lieu à l'extérieur de la zone de distribution de l'espèce et sur de très faibles étendues. Il est aussi possible de déplacer des individus vers une petite population isolée qui ne serait pas adaptée aux conditions climatiques afin d'amener une augmentation de la diversité génétique de la population (Aitken et Whitlock 2013).

Afin d'évaluer la vulnérabilité d'une espèce forestière face aux changements climatiques, il existe différents outils spécifiques aux critères d'évaluation de la sensibilité des espèces (Beardmore et Winder 2011). Certains outils peuvent aussi mener à orienter les décisions de faisabilité de la migration assistée d'une espèce, ce qui nécessite une connaissance très approfondie de la biologie de l'espèce (Hoegh-Guldberg et al. 2008). Les espèces visées par cet objectif de conservation ne sont pas toujours les mieux connues et documentées et ne bénéficient pas des mêmes avantages qu'une essence commerciale par exemple. Dans ce contexte, Vitt et al. (2010) proposent donc une stratégie de récolte afin de créer une banque de semences des espèces à risque

d'extinction dans le cas de changements climatiques trop rapides pour suivre le déplacement des niches écologiques qui pourra ensuite servir à une stratégie de migration assistée.

Bien que ce ne soit pas très fréquent au Canada, un exemple de migration assistée visant cet objectif serait la conservation du pin blanc (*Pinus strobus* L.) à Terre-Neuve où la survie de cette essence est menacée due à la consanguinité découlant des petites populations isolées. Une récente étude a été menée par le ministère des Ressources Naturelles du Canada afin de comparer 6 populations de pin blanc provenant de différentes latitudes de Terre-Neuve et de l'Ontario en site de plantation à l'âge de 8 ans (Major 2012).

La migration assistée : une stratégie pour maintenir la productivité forestière

Dans un contexte où la foresterie joue un rôle de grande importance économique, comme dans le cas de la forêt boréale au Canada, la migration assistée peut être réalisée avec pour objectif de maintenir et de favoriser la résilience, la santé et la productivité des forêts face aux changements climatiques (Leech et al. 2011). Cette autre conception de la migration vise plutôt le déplacement d'espèces commerciales couvrant de larges territoires et par le fait même un large spectre climatique dont les populations se sont adaptées localement au fil du temps. Dans un tel cas, la migration assistée, dite forestière, consiste à déplacer des populations à l'intérieur de l'aire de distribution de l'espèce (Pedlar et al. 2012). Cela a pour but d'assurer que les sources de semences, utilisées pour le reboisement, soient les mieux adaptées aux conditions actuelles et futures (Gray et al. 2011) et les modalités de transfert de semences doivent maintenant tenir compte de ces changements climatiques (Ying et Yanchuk 2006).

Afin de mieux comprendre comment les populations sont adaptées à leur environnement, une approche par régression multivariée a été développée pour analyser le patron géographique de la variation génétique des arbres, ce qui peut ensuite aider à développer des zones de transfert des sources génétiques à partir de variables tels que le climat, la latitude, la longitude et l'altitude (Hamman et al. 2011). De plus, les essences commerciales ciblées par la migration assistée bénéficient souvent d'un programme de reboisement et de banques de semences déjà en place étant donné leur importance économique, ce qui permet de diminuer les coûts associés à cette stratégie d'adaptation (Pedlar et al. 2011). Il est alors possible d'utiliser d'anciens tests de provenances et ceux nouvellement établis regroupant plusieurs populations dans des conditions climatiques différentes pour évaluer le patron des variations génétiques, de croissance et des caractères adaptatifs (Wang et al. 2006). Les tests de provenances peuvent aussi servir à évaluer les réponses des espèces face aux changements climatiques actuels. Par exemple, Rainville et al. (2014) ont élaboré des modèles de transfert à partir de mesures prises dans les tests de provenances selon différents scénarios climatiques afin d'évaluer la productivité future des plantations partout au Québec. Aussi, lors d'une étude visant à prédire la croissance optimale et la survie du pin gris sous des conditions climatiques futures,

Thomson et Parker (2008) ont utilisé 16 tests de provenances qui avaient été implantés par le Service canadien des Forêts dans les années 1960 dans l'est du Canada et dans 4 états situés près des Grands Lacs aux États-Unis.

Il est aussi possible d'évaluer les réponses des espèces et des populations aux changements climatiques en pépinière ou en chambre de croissance. Par exemple, une récente étude a été menée afin d'observer l'effet d'une augmentation de la température et du niveau de CO₂ chez 60 familles d'épinette blanche montrant un effet positif sur la croissance en hauteur et en diamètre chez les plants de 2 et 3 ans (Carles et al. 2014). Dans le même ordre d'idées, Lu et Man (2011) ont évalué les effets de la migration assistée sur le débourrement de 23 provenances d'épinette blanche d'Ontario en environnement contrôlé selon 6 régimes de température démontrant que l'augmentation de la température favoriserait le débourrement hâtif. Cependant, il existait une variation considérable entre les provenances concernant la période de débourrement.

Tableau 1.1 Caractéristiques et terminologie associées à la migration assistée

Objectif visé	Matériel déplacé	L'échelle d'application	Distance de déplacement	Risques associés	Terminologie associée
Maintenir la productivité des essences commerciales	Principalement au niveau des populations	Applicable sur de très grandes superficies, de plusieurs milliers d'hectares	Intérieur de l'aire de distribution de l'espèce	Faibles	-Migration assistée des populations -Flux de gènes assisté
			Juste à l'extérieur, en périphérie, de l'aire de distribution de l'espèce	Intermédiaires	-Expansion assistée de la distribution
Conservation d'une espèce vulnérable	Principalement au niveau de l'espèce	Applicable sur de petites superficies, microsites	Loin à l'extérieur de l'aire de distribution de l'espèce	Élevés	-Migration assistée sur de longues distances -Migration assistée d'espèces

1.2.1 Une stratégie adoptée à l'échelle internationale

a) Au Canada

Au Canada, la migration assistée est principalement utilisée dans un objectif d'optimisation de la santé et de la productivité des espèces commerciales indigènes (Ste-Marie et al. 2011, Pedlar et al. 2011). D'ailleurs, dans plusieurs provinces, des études ont été réalisées et des modalités de transfert de sources de semences sont révisées ou même déjà modifiées (Pedlar et al. 2011) (tableau 1.2).

En Colombie-Britannique, plusieurs avancées ont été réalisées. Par exemple, une étude a été menée sur les distances possibles de transferts des semences d'essences commerciales en plus haute altitude indiquant la possibilité d'un transfert de 200 m d'élévation pour la majorité des espèces (O'Neill et al. 2008). Aussi, la modélisation du volume marchand de 60 populations de pin lodgepole (*Pinus contorta* Dougl. ex Loud.) à partir de 9 variables climatiques annuelles (1961-1990) a permis de démontrer que l'habitat supportant cette espèce devrait se déplacer vers le nord de la province d'ici 2085 (O'Neill et al. 2008). Toujours en Colombie-Britannique, une étude basée sur un ensemble de tests de provenances génétiques du pin lodgepole indique que la productivité pourrait augmenter de 7 % avec une augmentation de 2° C mais pourrait diminuer de 9% avec une augmentation de température de 4 °C, tandis que certaines populations vulnérables pourraient disparaître (Wang et al. 2006). Une étude a aussi été menée sur la tolérance au gel et la performance du peuplier faux-tremble (*Populus tremuloides* (Michx)) issus de différentes populations provenant de la Colombie-Britannique, de l'Alberta, de la Saskatchewan et du Minnesota et reboisées sur 5 sites de plantations répartis sur de longues distances à l'intérieur de l'aire de distribution de l'espèce, montrant que la migration assistée aurait le potentiel d'augmenter la productivité des forêts (Schreiber et al. 2013). Toujours dans l'ouest du Canada et des États-Unis, un vaste projet de migration assistée (The Assisted Migration Adaptation Trial (AMAT)) est mené par des chercheurs gouvernementaux sur 15 espèces provenant de la Colombie-Britannique et des états de Washington, d'Oregon et d'Idaho lorsque reboisées sur 48 sites allant du nord de la Californie jusqu'au sud du Yukon dans le but d'évaluer les sources de semences les mieux adaptées aux climats présents et futurs (O'Neill et al. 2013b). Des résultats sur le sapin Douglas (*Pseudotsuga menziesii* var. *glauca* et var. *menziesii* (Mirb.) Franco) et sur l'épinette de l'Intérieur (*Picea glauca* (Moench) Voss, *Picea engelmannii* Passy ex Engelm. et leurs hybrides, ont montré que les distances critiques de transfert de semences étaient plus petites pour le sapin Douglas que pour l'épinette de l'Intérieur. De plus, les sources de semences améliorées bénéficient d'une augmentation en hauteur comparativement aux sources de semences issues des peuplements locaux lorsque la distance de déplacement est à l'intérieur de la distance critique de transfert (O'Neill et al. 2014). Du côté de l'Alberta, une étude menée sur la performance de 10 différentes populations de mélèze (*Larix*) provenant d'Eurasie a montré que la hauteur et la survie des

plantations pouvaient être prédites à partir de 5 variables climatiques et qu'elles seraient optimales lorsque le climat du site de plantation équivaut à celui du climat d'origine (Rehfeldt et al. 1999).

À l'est du Canada, près de 99 sources de semences de pin gris (*Pinus banksiana* (Lamb.)) ont été évaluées sur 16 sites instaurés dans les années 1960 par le Service canadien des Forêts soit au Nouveau-Brunswick, au Québec, en Ontario et dans quelques États américains comme tests de provenances. L'objectif était de déterminer la relation entre la croissance et les variables climatiques. Cette étude a montré que l'habitat optimal de cette espèce devrait se déplacer de 2° de latitude vers le nord d'ici le milieu du 21ème siècle (Thomson et Parker 2008). Plus spécifiquement en Ontario, une étude a été menée sur l'effet d'une migration assistée sur la période de débourrement de 23 sources génétiques d'épinette blanche (*Picea glauca* (Moench) Voss) âgée de 1 an en vue de sélectionner les sources de semences ayant le moins de risques de subir des dommages causés par les gels hâtifs (Lu et Man 2011). De plus, les zones optimales d'amélioration de l'épinette blanche en Ontario ont aussi été évaluées en fonction des conditions climatiques actuelles et futures selon trois modèles de circulation générale pour le climat de 2041 à 2070 indiquant que les zones d'amélioration pourraient être similaires à ou plus étroites que celles actuelles (Thomson et al. 2010). Toujours en Ontario, un modèle de croissance qui tient compte à la fois du climat du site de plantation et du climat de la source de semences a été utilisé pour l'épinette noire (*Picea mariana* Mill.) et le pin blanc (*Pinus strobus* (L.)) démontrant que la provenance locale ne serait pas la plus optimale (Yang et al. 2015). Des modèles de transfert de semences ont aussi été élaborés lors d'une étude portant sur 21 provenances de pin gris (*Pinus banksiana* (Lamb.)) en site de plantation sur une période de 25 ans démontrant que les sources de semences provenant d'un climat plus chaud et plus sec avaient une meilleure croissance radiale que les populations locales (Savva et al. 2007). Une étude plus ancienne portant sur la mortalité et la hauteur des populations de pin gris à l'âge de 15 ans sur 8 sites de plantations en Ontario avait aussi démontrée une supériorité des sources transférées vers le nord comparativement aux sources locales (Mátyás et Yeatman 1992). À Terre-Neuve, des stratégies de déplacement de provenances de pin blanc de petites populations isolées ont été évaluées démontrant que les provenances méridionales devraient être mélangées avec les sources locales afin d'augmenter la diversité génétique et, par le fait même, le caractère adaptatif de cette espèce (Major 2012).

Finalement, au Québec, une étude réalisée en chambre de croissance a été menée chez des familles d'épinette blanche afin d'évaluer l'effet des changements climatiques sur la croissance des plants en simulant une augmentation de la température et de la concentration atmosphérique en CO₂ (Carles et al. 2014) alors que dans d'autres études des modèles de transfert des sources de semences pour l'épinette noire, l'épinette blanche et le pin gris ont été élaborés afin d'évaluer le rendement futur des plantations face aux changements climatiques (Beaulieu et Rainville 2005, Andalo 2005, Rainville et al. 2014).

b) Ailleurs dans le monde

La migration assistée comme stratégie d'adaptation face aux changements climatiques est aussi adoptée à l'échelle internationale (tableau 1.2). Par exemple, sur la côte ouest américaine, 4 sources de semences de sapin Douglas ont été reboisées dans 4 environnements différents où des différences de phénologie entre les populations ont été observées, indiquant leur importance lors de l'évaluation de l'adaptation des populations face aux changements climatiques (Gould et al. 2012). Dans le sud des États-Unis, soit en Alabama, en Géorgie et en Floride, des tests de provenances de pin à encens (*Pinus taeda* L.) et d'épinette de Norvège (*Picea abies* L. Karst), ont été utilisés pour l'élaboration des modèles de régression afin de relier la croissance aux variables de température en démontrant une perte de croissance en hauteur pour des sources locales sous un réchauffement climatique de 4°C (Schmidting 1994). Au Mexique, la variation génétique selon un gradient latitudinal de 13 populations de pin du Mexique (*Pinus hartwegii* (Lindl.)), une essence vulnérable aux changements climatiques due à son habitat exclusif aux hautes altitudes, a été évalué en pépinière. Comme mesure d'adaptation de cette espèce, il a été suggéré que le transfert de semences se fasse des plus basses vers les plus hautes altitudes après avoir étudié la croissance en hauteur et la tolérance au gel (Viveros-Viveros et al. 2009). Également, au Mexique, la variation génétique de 8 populations (séparées par 100 m d'altitude selon un gradient allant de 2200 et 2900 m) de pin de la Sierra Madre (*Pinus pseudostrobus* (Lindley)), une espèce commerciale utilisée dans les programmes de reforestation, a été évaluée sur les plants de 2 ans lors de leur croissance en pépinière au Mexique mais aussi en Idaho aux États-Unis, correspondant ainsi à un déplacement à l'extérieur de la zone de distribution de l'espèce (Saenz-Romero et al. 2012). Aussi, 14 populations de pin argenté (*Pinus patula* Schltdl. & Cham) du Mexique sélectionnées selon un degré altitudinal ont été cultivées en chambre de croissance sous deux traitements de température simulant ainsi les conditions climatiques actuelles et futures (Saenz-Romero et al. 2011). En Espagne, une étude a été menée sur 11 sources de semences de pin d'Alep (*Pinus halepensis* (Mill.)) afin d'évaluer leur réponse lors de leur croissance en sites de plantation reflétant les futures conditions climatiques (Taïbi et al. 2014).

Tableau 1.2 Exemples de migration assistée à l'échelle internationale dans un contexte de changements climatiques

Nom de l'espèce	Matériel génétique	Pépinière/plantation	Âge des plants	Emplacement	Référence
Aulne rouge <i>Alnus rubra</i> (Bong.)	59 familles	2 sites de plantations	17 ans	Colombie-Britannique	Porter et al. 2013
Épinette blanche <i>Picea glauca</i> (Moench) Voss	23 provenances (semences)	Pépinière Chambres de croissance	1 an	Ontario	Lu et Man 2001
Épinette blanche <i>Picea glauca</i> (Moench) Voss	60 familles	Chambre de croissance	2 ans	Températures futures au Québec	Carles et al. 2014
Épinette de Norvège <i>Picea abies</i> L. Karst	36 sources de semences	9 tests de provenances déjà existant	16 ans	Plusieurs pays d'Europe	Schmidting 1994
Épinette noire <i>Picea mariana</i> Mill.	192 provenances	18 sites de plantation déjà existant	33 ans	Canada et Minnesota	Yang et al. 2015
Mélèze <i>Larix sp.</i>	10 populations	Sites de plantation	13 ans	Alberta et Eurasie	Rehfeldt et al. 1999
Peuplier faux-tremble <i>Populus tremuloides</i> (Michx)	Provenances (semences)	5 sites de plantation	10 ans	Ouest canadien et Minnesota	Schreiber et al. 2013
Pin d'Alep <i>Pinus halepensis</i> (Mill.)	11 sources de semences	3 sites de plantation	1, 2 et 3 ans	Espagne	Taïbi et al. 2014
Pin argenté <i>Pinus patula</i> Schltl. & Cham.	14 populations	Chambre de croissance	8 à 12 mois	Températures actuelles et futures du Mexique	Saez-Romero et al. 2011
Pin blanc <i>Pinus strobus</i> (L.)	6 populations (semences)	1 site de plantation	8 ans	Terre-Neuve et Ontario	Major 2012
Pin blanc <i>Pinus strobus</i> (L.)	195 provenances	26 tests de plantation déjà existants	16 ans	Nord-est des États-Unis et Ontario	Yang et al. 2015
Pin à encens	22 sources de	17 tests de provenances déjà	20 ans	États-Unis (Géorgie et	Schmidting 199

<i>Pinus taeda</i> L.	semences	existant		Alabama)	
Pin gris <i>Pinus banksiana</i> (Lamb.)	99 sources de semences	16 tests de provenances déjà existant	39 ans	Québec, Ontario et États-Unis	Thomson et Parker 2008
Pin gris <i>Pinus banksiana</i> (Lamb.)	99 sources de semences	8 sites de plantation	15 ans	Ontario	Mátyás et Yeatman 1992
Pin gris <i>Pinus banksiana</i> (Lamb.)	21 provenances	Site de plantation	25 ans	Ontario	Savva et al. 2007
Pin lodgepole <i>Pinus contorta</i> Dougl. ex Loud.	60 populations	43 sites de plantation déjà existant	35 ans	Sud de la Californie au Yukon	O'Neill et al. 2008
Pin lodgepole <i>Pinus contorta</i> Dougl. ex Loud.	140 populations	60 sites de plantation déjà existant	20 ans	Nouveau-Mexique, Colombie-Britannique et Yukon	Wang et al. 2006
Pin du Mexique <i>Pinus hartwegii</i> (Lindl.)	13 populations	Pépinière	7, 18 et 22 mois	Mexique	Viveros-Viveros et al. 2009
<i>Pinus pseudostrobus</i> (Lindley)	8 populations	2 pépinières	2 ans	Mexique, États-Unis (Idaho)	Saez-Romero et al. 2012
Sapin Douglas <i>Pseudotsuga menziesii</i> (Mirb. Franco)	4 sources de semences	4 sites de plantation	2 et 3 ans	Étas-Unis (Washington, Orégon et Californie)	Gould et al. 2012

1.2.2 Les risques liés à la migration assistée

Le déplacement d'espèces, assisté par l'humain, n'est pas une approche très récente. Par exemple, plusieurs plantations d'arbres exotiques ont déjà été instaurées un peu partout dans le monde tels que les acacias d'Australie plantés en Afrique, en Asie et en Amérique du Sud (Richardson et al. 2011) ou encore l'épinette de Norvège introduite au Québec (Blouin et al. 1994). Cependant, le déplacement d'espèces visant à réduire les impacts des changements climatiques est sans précédent et interpelle la société à se questionner sur la perception de l'environnement et l'aménagement des forêts versus l'adaptation naturelle aux changements climatiques (Aubin et al. 2011)

Reconnue pour ne pas être sans risques, la migration assistée est un sujet controversé faisant l'objet de nombreux débats au sein de la littérature scientifique sur les risques et les bénéfices pouvant y être attachés (Hewitt et al. 2011). Cependant, les risques associés doivent être analysés au cas par cas (Andalo et al. 2005). Parmi les problématiques, une des plus soulevées est le potentiel d'une espèce à devenir invasive dans son nouvel environnement, entraînant des effets négatifs sur la disponibilité des éléments minéraux du sol et de l'eau, l'introduction de nouveaux agents pathogènes comme des maladies ou des insectes, la présence d'un stress additionnel aux populations locales et l'hybridation entre les espèces (Mueller et Hellman 2008). D'un autre point de vue, il existe aussi la possibilité d'un échec de transfert dû à la maladaptation de l'espèce ou du génotype déplacé dans un nouvel environnement (Minteer et Collins 2010). En plus des impacts possibles au nouvel habitat, l'environnement d'origine d'une espèce vulnérable peut aussi être affecté. Par exemple, la collecte de semences réalisée objectif de créer une banque pour les espèces vulnérables pourrait entraîner une diminution des chances de régénération de l'espèce localement (Vitt et al. 2010). Enfin, Ricciardi et Simberloff (2009) croient que plusieurs conséquences inattendues et imprévisibles pourront survenir malgré l'évaluation consciencieuse des risques, dû notamment aux facteurs climatiques et à l'évolution morpho-physiologique de l'espèce introduite qui pourraient changer dans le temps.

Par ailleurs, la migration assistée ayant comme objectif de conserver une espèce vulnérable, souvent associé à un déplacement sur de longues distances à l'extérieur de l'aire de distribution de l'espèce, comporte plus de risques que la migration assistée réalisée dans le but de préserver la productivité et la santé des écosystèmes forestiers qui vise plutôt le déplacement de populations à l'intérieur de l'aire de distribution d'une espèce commerciale couvrant de larges étendues (Pedlar et al. 2012). En effet, il n'existe pas de risque d'invasion puisqu'il s'agit d'un mouvement réalisé à l'intérieur de l'aire de distribution existante des espèces. La création de nouvelles opportunités d'hybridation et le potentiel d'introduction d'insectes nuisibles ou de maladies sont pratiquement inexistantes et les risques sont essentiellement les mêmes que ceux associés aux pratiques courantes de foresterie (Pedlar et al. 2011).

1.3 Le cas de l'épinette blanche

L'épinette blanche (*Picea glauca* (Moench) Voss) est une espèce commerciale importante de la forêt boréale qui s'étend d'est en ouest de l'Amérique du Nord, allant du nord des États-Unis jusqu'à la limite nordique des arbres couvrant ainsi températures, régimes de précipitations, types de sol et topographies variés (Nienstaedt et Zasada 1990) (figure 1.6). Sa croissance rapide et sa densité de bois élevée font d'elle une essence très appréciée par l'industrie forestière (Beaulieu et Corriveau 1985).

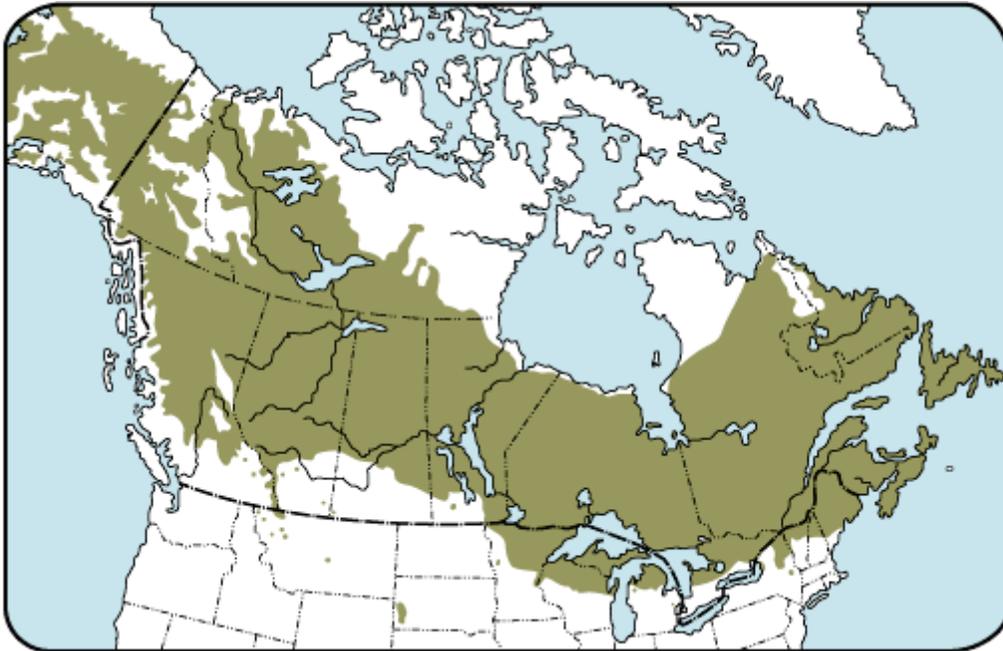


Figure 1.6 Aire de distribution de l'épinette blanche illustrée en vert (tirée de : <http://aimfc.rncan.gc.ca/fr/accueil>).

1.3.1 Diversité génétique

Les espèces arborescentes de la forêt boréale couvrant de larges étendues se subdivisent en plusieurs populations qui se sont différenciées suite aux pressions évolutives et environnementales (Beaulieu et al. 2001).

Dans le cas de l'épinette blanche, à l'échelle du Canada, les populations situées à l'ouest des Grands-Lacs seraient génétiquement distinctes des populations de l'est en raison d'origine postglaciaire différente (de Lafontaine et al. 2010). Au-delà de cette différenciation génétique postglaciaire, plusieurs études ont démontrés une variation clinale latitudinale et longitudinale entre les populations d'épinette blanche. Une corrélation négative entre la hauteur et la latitude a été observée par Jaramillo-Correa et al. (2001) chez des plants d'épinette blanche de 8 et 13 ans lors d'une étude sur 26 sources de semences représentant 6 régions écologiques du Québec de la forêt boréale et de la forêt tempérée.

Chez 31 provenances d'épinette blanche âgée de 20 ans, on a remarqué un cline longitudinale est-ouest pour la hauteur, le diamètre et la largeur de la couronne (Khalil 1985). En bas âge, la variation de croissance selon un cline latitudinal sud-nord et de manière moins prononcée selon un cline longitudinal ouest-est, a notamment été observée chez 63 provenances d'épinette blanche du Québec et de l'Ontario lors de leur croissance en pépinière jusqu'à l'âge de 3 ans (Li et al. 1997). Enfin, la variation génétique entre 127 sources de semences d'épinette blanche du Québec et de l'Ontario a pu être expliquée par la longitude, le régime de précipitations et la température liée à la saison de croissance, après deux années de croissance en serre et en site de plantation (Lesser et Parker 2004). Cette variation cline a aussi été observée chez 30 provenances d'épinette noire en bas âge transplantées sur 3 sites de plantations selon un gradient de latitude où les facteurs géoclimatiques expliquaient entre 55 et 86% de la variation des caractères de croissance et de phénologie (Beaulieu et al. 2004). Toujours chez l'épinette noire, la variation du débourrement a été évaluée en serre pour 5 populations issues de semences provenant de sites distribués selon un gradient latitudinal en forêt boréale au Québec démontrant que les populations du nord avaient débourré plus rapidement et plus tôt que les provenances du sud (Rossi et Bousquet 2014).

L'épinette blanche est connue pour avoir une grande variabilité génétique tant au niveau des populations (Jaramillo-Correa et al. 2001) qu'au niveau familial et clonal (Lamhamedi et al. 2000, Wahid et al. 2013, Wahid et al. 2012a, Wahid et al. 2012b). D'ailleurs, la variabilité familiale serait aussi importante que celle observée entre les provenances (Li et al. 1993). Dans le cadre d'un programme de reboisement d'une essence commerciale telle que l'épinette blanche, une telle variation génétique entre les populations doit alors être prise en compte afin d'assurer l'adaptation des plants à leur environnement (Lamontagne 1992). Des modèles de transferts de semences sont donc élaborés entre-autres à partir des tests de provenances permettant de comparer la croissance de différentes sources génétiques sur plusieurs sites et en utilisant la différence du climat entre le site d'origine et celui de la plantation (Rainville et al. 2014). Par exemple, Andalo et al. (2005), ont utilisé 45 sources de semences afin de développer des modèles en se basant sur des différentiels de températures et de précipitations entre l'origine des sources de semences et les sites de tests. Les sources de semences sont donc déplacées selon des modalités qui assurent un bon taux de survie et une bonne performance des plants.

1.3.2 Programme d'amélioration génétique

La recherche sur la génétique de l'épinette blanche a débuté au Québec dans les années 1950 dont l'objectif consiste à tirer profit de sa grande variabilité génétique afin d'augmenter la productivité des plantations. Dans les années 1980, les premiers vergers à graines ont été instaurés afin de produire des semences de meilleure qualité pour la production de plants destinés au reboisement. Ces vergers de première génération sont des plantations de greffes ou de semis issus d'arbres-plus provenant des peuplements naturels. Dans le cas des

essences atteignant la maturité sexuelle moins rapidement, comme dans le cas de l'épinette blanche, les vergers de greffes sont utilisés afin de réduire les délais de fleuraison. L'utilisation de ces sources génétiques améliorées permet de procurer un gain de 5 à 10% en hauteur comparativement aux sources de semences des peuplements naturels (Rainville et al. 2003). À la fin des années 1990, les vergers clonaux de deuxième génération issus des tests de provenances/descendances réalisés par le Service canadien des forêts dans les années 1970 et 1980 ont été établis. Ils sont constitués des 25 meilleures familles du Québec et de l'Ontario pouvant constituer le matériel génétique nécessaire pour fournir les domaines de l'érablière et de la sapinière (Beaulieu et al. 2009). L'utilisation de ces sources génétiques améliorées de deuxième génération permettrait un gain en volume marchand de 15 à 20% (Rainville et al. 2003).

Alors que dans les années 1980, la majorité des semences provenaient des peuplements naturels, aujourd'hui au moins 98% des semences d'épinette blanche utilisées proviennent de sources améliorées (Lamhamedi et Carles 2012). La multiplication végétative occupe aussi une place importante dans le programme d'amélioration génétique de l'épinette blanche notamment par le bouturage permettant de produire un grand nombre de plants dotés d'un gain génétique élevé (Gravel-Grenier et al. 2011) et par l'embryogenèse somatique, permettant de multiplier à l'infini des génotypes ou clones hautement productifs (Wahid et al. 2013, Wahid et al. 2012a, Wahid et al. 2012b). D'un autre côté, depuis les années 2000, les recherches menées sur les marqueurs moléculaires permettent d'obtenir la valeur des plants dès leur jeune âge notamment pour les caractères de qualité du bois. (Beaulieu et al. 2011). À l'heure actuelle, près de 1500 clones somatiques de l'épinette blanche ont été caractérisés selon des variables morpho-physiologiques sous forme d'un catalogue des variétés clonales (Lamhamedi et Gravel-Grenier 2012). Ces variétés sont également en cours d'évaluation dans le cadre de tests clonaux (Wahid et al. 2013, Wahid et al. 2012a, Wahid et al. 2012b).

La sélection génomique est également développée pour différents traits reliés à la croissance et à la qualité du bois de l'épinette blanche (Beaulieu et al. 2011, Beaulieu et al. 2014a, b). Le recours à la sélection basée sur des marqueurs moléculaires à partir de l'analyse directe de l'ADN, dans le cadre du programme d'amélioration génétique de l'épinette blanche, permet de réduire le cycle d'amélioration (Beaulieu et al. 2014b). Cette approche pourrait être intégrée dès les premières étapes de l'embryogenèse somatique, avant la production de plants ou l'installation de tests clonaux, permettant de raccourcir davantage le cycle de sélection ainsi que le coût associé au programme d'amélioration génétique de l'épinette blanche (Beaulieu et al. 2014b).

1.3.3 Production de l'épinette blanche en pépinière

Les plants d'épinette blanche, comme tous les autres résineux produits en pépinières publiques et privées au Québec pour fins de reboisement, doivent répondre à plus d'une vingtaine de critères et normes de qualité établis par le Ministère des forêts de la faune et des parcs (MFFP) (Veilleux 2012). Des efforts soutenus sont

donc consacrés à la qualité de la production de plants au Québec et plusieurs études ont été réalisées en ce sens en pépinières forestières.

Au cours de la première année de croissance, on peut distinguer trois stades de croissance du plant : la phase d'établissement qui débute par l'ensemencement jusqu'au développement des cotylédons, la phase de croissance active qui débute par la pousse de la tige entre les cotylédons jusqu'à l'atteinte de la hauteur ciblée et la phase d'endurcissement qui se caractérise par la formation des bourgeons tout en poursuivant une croissance en diamètre et du système racinaire et qui se termine par la dormance du plant (Landis et al. 1999). À partir de ces stades de croissance, les besoins et les exigences des plants peuvent être déterminés.

Dans le cas de l'épinette blanche produite en récipients, des études ont été menées dans le but d'établir les teneurs en eau optimales de la rhizosphère afin de favoriser la croissance, éviter les excès d'irrigation et diminuer le lessivage (Lamhamedi et al. 2001). À partir de la réflectométrie dans le domaine temporel, les teneurs en eau optimales ont été déterminées pour chacun des stades de développement de la première saison de croissance (1+0), indiquant le maintien d'une teneur en eau entre 30 et 45% (V/V) durant la phase de croissance active (Lamhamedi et al. 2001), alors que pour l'épinette noire (1+0), pour le même stade de croissance, la teneur optimale en eau se situe plutôt entre 30 et 35% V/V (Lamhamedi et al. 2003). Il a été démontré, à partir des plants d'épinette noire cultivés en récipients, que le maintien de la teneur en eau élevée soit de 60%V/V, lors de la première saison de croissance, conduit à des plants de plus faible biomasse à la deuxième saison de croissance comparativement à une teneur de 45% V/V, ce qui suggère qu'un régime d'irrigation non-optimal lors de la première saison de croissance entraîne des répercussions sur la croissance 2+0 en pépinière (Bergeron et al. 2004).

La teneur en eau optimale des plants d'épinette blanche en récipients a aussi été déterminée pour la deuxième saison de croissance en pépinière (2+0) démontrant qu'une moyenne saisonnière d'environ 40% (V/V) serait favorable pour atteindre une croissance en hauteur et une biomasse maximale (Lamhamedi et al. 2006). Effectivement, en comparant trois régimes d'irrigation (30, 40 et 55% V/V) chez l'épinette blanche 2+0 produite en récipients, il a été démontré qu'une diminution de la teneur en eau de 55% à 30% V/V entraîne une réduction de 65% du volume total de lessivage et de 52% du lessivage en N sans affecter significativement la croissance, l'allocation du carbone, le contenu des tissus en azote et la morphologie des plants (Stowe et al. 2010).

En plus des régimes d'irrigation, les plants forestiers résineux produits en récipients requièrent une concentration en éléments minéraux maximale et minimale selon les stades de croissances. Pour assurer la survie et la bonne croissance des plants résineux produits en récipients, une concentration entre 1,4 à 2,2 % d'azote (N) est requise (Landis et al. 1989). Il a d'ailleurs été démontré, qu'en dessous de 1,5 % d'azote dans

le feuillage, la capacité à produire de nouvelles racines après le reboisement est faible (Plaster 2009). Pour les plants d'épinette blanche de fortes dimensions, une concentration foliaire en azote supérieure à 1,5% permet d'obtenir des taux de photosynthèse nette adéquats et une bonne régénération des racines permettant donc d'obtenir un bon taux de survie et de croissance lors de l'établissement en sites de plantation (Gagnon et Lamhamedi 2011). Au Québec, le logiciel PLANTEC, a été développé par le MFFP afin de produire des calendriers de fertilisation pour chacune des cultures produites en pépinière, en fonction de leurs besoins en éléments minéraux (N, P, K), et est utilisé depuis 1992 par les pépinières publiques et par la Direction de la Recherche Forestière (DRF) (Girard et al. 2001).

Au Québec, le gel est un facteur environnemental qui peut affecter gravement le système racinaire des plants en récipients cultivés en pépinières, ce qui affecte la survie et la croissance des plants en réduisant la capacité d'absorption en eau et en azote (Bigras et Dumais 2005). Pour l'épinette blanche (1+0), des seuils de tolérance aux gels hâtifs ont été élaborés pour 6 différents vergers à graines à partir de tests de congélation artificiels (allant de +4°C à -20°C) et de modèles mathématiques (Lamhamedi et al. 2005). Toujours par rapport à la tolérance au gel, l'effet du régime d'irrigation (30%, 40% et 55% V/V) a été évalué pour les plants d'épinette blanche (2+0) endurcis naturellement en pépinière et soumis à des traitements de gel artificiel, permettant de démontrer qu'une diminution de 55% V/V à 30% V/V n'entraîne pas de conséquences négatives quant à la tolérance au gel (Carles et al. 2008).

1.4 Conclusion

Au Canada, en plus de ses services écosystémiques, la forêt boréale joue un rôle économique majeur et les plantations d'essences commerciales issues de matériel amélioré permettent d'accroître la productivité de la forêt aménagée tout en diminuant la pression exercée sur les forêts naturelles (Rainville et al. 2003).

Au Québec, l'épinette blanche est la troisième essence la plus reboisée après l'épinette noire et le pin gris et compte, à elle seule, pour 20% des 150 millions de plants reboisés par année. Afin de fournir des semences de qualité et en grande quantité, des vergers à graines ont été instaurés à partir d'arbres sélectionnés localement. Cependant, pour assurer la réussite de ces plantations, l'adaptation optimale des populations et des sources génétiques améliorées, sous les conditions climatiques semblables à celles d'origine des semences, doit être prise en considération lors des programmes de reboisement (Morgenstern et Copis 1999, Andalo et al. 2005, Beaulieu et Rainville 2005). Les semences servant à la production des plants sont donc déplacées selon des modalités de transfert assurant cette adaptation locale.

Le programme d'amélioration génétique de l'épinette blanche est des plus avancés. Il permet de produire des semences et du matériel génétique amélioré à l'échelle opérationnelle et augmenter ainsi la productivité de nos plantations. Cependant, les changements climatiques entraîneront des impacts majeurs sur la santé et la productivité de nos forêts (GIEC 2013) et face à cette problématique, la migration assistée des sources génétiques les mieux adaptées aux conditions climatiques futures et présentes assurerait l'adaptation de nos espèces commerciales aux changements climatiques (Winder et al. 2011). Dans l'objectif de maintenir la productivité des forêts et la santé des écosystèmes, la migration assistée, réalisée à l'intérieur de l'aire de distribution de l'espèce, est un moyen d'adaptation préconisé qui ne comporte les moindres risques (envahissement, mal adaptation, etc.).

Un programme de migration assistée doit tenir compte des projections spatiales du climat futur (St-Clair 2008), mais aussi de l'information génécologique des populations. L'identification des variables climatiques d'origine qui affectent l'adaptation des populations permet de développer des modèles empiriques pour prédire les sources de semences les mieux adaptées au climat et les distances de déplacement possibles (O'Neill et al. 2008). Cependant, les semences issues des vergers à graines de deuxième génération proviennent d'une sélection d'arbres représentant plusieurs régions et donc d'un large spectre de conditions climatiques. Le déplacement de ces sources génétiques dépendrait alors de leur grande plasticité plutôt que de l'adaptation à un climat d'origine précis.

Dans un contexte où l'aménagement forestier est d'une grande importance économique et que les programmes d'amélioration génétique ont été élaborés afin d'assurer une certaine performance des essences

commerciales, les plantations futures devront être adaptées aux changements climatiques. Des essais doivent être réalisés *in situ* afin d'évaluer les réponses des différentes sources génétiques aux changements climatiques à court et à long terme.

Dans cet objectif, le prochain chapitre présente les résultats d'une étude réalisée à partir de 8 sources génétiques d'épinette blanche au Québec, soit 6 de première génération et 2 de deuxième génération, afin d'évaluer les réponses morpho-physiologiques lors de leur croissance en pépinière et pendant la phase d'installation dans différents sites de reboisement qui simulent une migration assistée.

1.5 Références

- Aitken, S. N., Yeaman, S., Holliday, J. A., Wang, T., et Curtis-McLane, S. 2008. Adaptation, migration or extirpation: climate change outcomes for tree populations. *Evolutionary Applications* **1**: 95-111.
- Aitken, S. N., et Whitlock, M. C. 2013. Assisted gene flow to facilitate local adaptation to climate change. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* **44**: 367-388.
- Andalo, C., Beaulieu, J., et Rainville, A. 2005. The impact of climate change on growth of local white spruce populations in Québec, Canada. *Forest Ecology and Management* **205**: 169-182.
- Anderegg, W. R. L., Kane, J. M., et Anderegg, L. D. L. 2013. Consequences of widespread tree mortality triggered by drought and temperature stress. *Nature Climate Change* **3**: 30–36.
- Aubin, I., Garbe, C. M., Colombo, S., Drever, C. R., McKenny, D. W., Messier, C., Pedlar, J., Saner, M. A., Venier, L., Wellstead, A. M., Winder, R., Witter, E., et Ste-Marie, C. 2011. Why we disagree about assisted migration: Ethical implications of a key debate regarding the future of Canada's forests. *Forestry Chronicle* **87**: 755–765.
- Beardmore, T., et Winder, R. 2011. Review of science-based assessments of species vulnerability: Contributions to decision-making for assisted migration. *Forestry Chronicle* **87**: 745-754.
- Beaulieu, J. et Corriveau, A. 1985. Variabilité de la densité du bois et de la production des provenances d'épinette blanche, 20 ans après plantation. *Canadian Journal of Forest Research* **15**: 833-838.
- Beaulieu, J., Daoust, G., Deshaies, A., Lamhamedi, M. S., Rainville, A., et Tourigny, M. 2009. Amélioration génétique des arbres, gestion des vergers à graines et de semences, et production de plants forestiers. *Dans Manuel de foresterie*, 2e édition. Ordre des Ingénieurs Forestiers du Québec. Québec, Ouvrage collectif, Éditions Multimondes. p. 1095-1146.
- Beaulieu, J., Doerksen, T., Boyle, B., Clément, S., Deslauriers, M., Beauseigle, S., Blais, S., Poulin, P-L., Lenz, P., Caron, S., Ringaults, P., Bicho, P., Bousquet, J., et MacKay, J. 2011. Association genetics of wood physical traits in the conifer white spruce and relationships with gene expression. *Genetics* **188**: 197-214.
- Beaulieu, J., Doerksen, T., Clément, S., MacKay, J., et Bousquet, J. 2014a. Accuracy of genomic selection models in a large population of open-pollinated families in white spruce. *Heredity* **113**: 343-352.
- Beaulieu, J., Doerksen, T., MacKay, J., Rainville, A., et Bousquet, J. 2014b. Genomic selection accuracies within and between environments and small breeding groups in white spruce. *BMC Genomics* **15**: 1048.
- Beaulieu, J., Perron, M., et Bousquet, J. 2004. Multivariate pattern of adaptive genetic variation and seed source transfer in *Picea mariana*. *Canadian Journal of Forest Research* **34**: 531-545.
- Beaulieu, J., et Rainville, A. 2005. Adaptation to climate change: Genetic variation is both a short- and long-term solution. *Forestry Chronicle* **81**: 704-709.
- Beaulieu, J., Rainville, A., Daoust, G., et Bousquet, J. 2001. La diversité génétique des espèces arborescentes de la forêt boréale. *Naturaliste Canadien* **125**: 193-202.
- Bergeron, O., Lamhamedi, M. S., Margolis, H. A., Bernier, P. Y., et Stowe, D. C. 2004. Irrigation control and physiological responses of nursery-grown black spruce seedlings (1+0) cultivated in air slit containers. *HortScience* **39**: 599-605.

Bigras, F. J., et Dumais, D. 2005. Root-freezing damage in the containerized nursery: impact on plantation sites – A review. *New Forests* **30**: 167–184.

Blouin, D., Beaulieu, J., Daoust, G., et Poliquin, J. 1994. Wood quality of Norway spruce grown in plantations in Quebec. *Wood and Fiber Science*. **26**: 342-353.

Carles, S., Lamhamedi, M. S., Stowe, D. C., Margolis, H. A., Bernier, P. Y., Veilleux, L., et Fecteau B. 2008. Frost tolerance of two-year-old *Picea glauca* seedlings grown under different irrigation regimes in a forest nursery. *Scandinavian Journal of Forest Research* **23**: 137-147.

Carles, S., Boyer-Groulx, D., Lamhamedi, M. S., Rainville, A., Beaulieu, J., Bernier, P., Bousquet, J., et Margolis, H. A. 2014. Family variation in the morphology and physiology of white spruce (*Picea glauca*) seedlings in response to elevated CO₂ and temperature. *Journal of Sustainable Forestry*. DOI:10.1080/10549811.2014.980895.

Colombo, S. J. 1998. Climatic warming and its effect on bud burst and risk of frost damage to white spruce in Canada. *Forestry Chronicle* **74**: 567-577.

Cook, J., Nuccitelli, D., Green, S. A., Richardson, M., Winkler, B., Painting, R., Way, R., Jacobs, P., et Skuce, A. 2013. Quantifying the consensus on anthropogenic global warming in the scientific literature. *Environmental Research Letters* **8**: 1-7.

Dale, V. H., Joyce, L. A., McNulty, S., Neilson, R. P., Ayres, M. P., Flannigan, M. D., Hanson, P. J., Irland, L. C., Lugo, A. E., Peterson, C. J., Simberloff, D., Swanson, F. J., Stocks, B. J., et Wotton, M. 2001. Climate Change and Forest Disturbances. *BioScience* **51**:723-734.

de Lafontaine, G., Turgeon, J., et Payette, S. 2010. Phylogeography of white spruce (*Picea glauca*) in eastern North America reveals contrasting ecological trajectories. *Journal of Biogeography* **37**: 741–751.

Environnement Canada. 2013. Tendances en matière d'émissions au Canada. Gouvernement du Canada, Environnement Canada. 92 pp.

FAO. 2013. Summary Report of the 3rd International Congress on Planted Forests. Consulté en ligne : <http://www.fao.org/forestry/37902-083cc16479b4b28d8d4873338b79bef41.pdf>, le 27 septembre 2014.

Flannigan, M. D., Logan, K. A., Amiro, B. D., Skinner, W. R., et Stocks, B. J. 2005. Future area burned in Canada. *Climate Change* **72**: 1-16.

Friedlingstein, P., Andrew, R. M., Rogelj, J., Peters, G. P., Canadell, J. G., Knutti, R., Luderer, G., Raupach, M. R., Schaeffer, M., van Vuuren, D. P., et Le Quéré, C. 2014. Persistent growth of CO₂ emissions and implications for reaching climate targets. *Nature Geoscience* **7**: 709-715. DOI: 10.1038/NGEO2248.

Gagnon, J., et Lamhamedi, M. S. 2011. Les concentrations foliaires en azote recommandées au Québec pour les essences résineuses produites en récipients sont-elles adéquates? *Dans* Colas, F.; Lamhamedi, M. S. (éds), 2011. 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), 140 pp. p. 47-51.

GIEC. 2013. Résumé à l'intention des décideurs *dans* Changements climatiques : Les éléments scientifiques. Contribution du Groupe de travail I au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York, États-Unis d'Amérique. 36 pp.

- GIEC. 2014. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 688 pp.
- Girard, D., Gagnon, J., et Langlois, C. G. 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, Sainte-Foy, Québec. Note de Recherche Forestière. 111 pp.
- Gould, P. J., Harrington, C. A., et St. Clair, B. J. 2012. Growth phenology of coast Douglas-fir seed sources planted in diverse environments. *Tree physiology* **32**: 1482-1496.
- Gouvernement du Québec. 2015. Système de plafonnement et d'échange de droits d'émission de gaz à effet de serre du Québec (SPEDE) consulté en ligne <http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/changements/carbone/documents-spede/en-bref.pdf> le 29 janvier 2015.
- Gray, L. K., Gylander, T., Mbogga M. S., Chen, P., et Hamann, A. 2011. Assisted migration to address climate change: recommendations for aspen reforestation in western Canada. *Ecological Applications* **21**: 1591–1603.
- Gravel-Grenier, J., Lamhamedi, M. S., Beaulieu, J., Carles, S., Margolis, H. A., Rioux, M., Stowe, D. C., et Lapointe, L. 2011. Utilization of family genetic variability to improve the rooting ability of white spruce (*Picea glauca*) cuttings. *Canadian Journal of Forest Research* **41**: 1308-1318.
- Hamman, A., Gylander, T., et Chenet, P. 2011. Developing seed zones and transfer guidelines with multivariate regression trees. *Tree Genetics and Genomes* **7**:399-408.
- Hamman, A., et Wang, T. L. 2006. Potential effects of climate change on ecosystem and species distribution in British Columbia. *Ecology* **87**: 2773–2786.
- Hannah, L. 2008. Protected areas and climate change. *Annals of the New York Academy of Sciences* **1134**: 201–212.
- Hewitt, N., Klenk, N., Smith, A. L., Bazely, D. R., Yan, N., Wood, S., MacLellan, J. I., Lipsig-Mummé, C., et Henriques, I. 2011. Taking stock of the assisted migration debate. *Biological Conservation* **144**: 2560-2572.
- Hoegh-Guldberg, O., Hughes, L., McLntyre, S., Lindenmayer, D. B., Parmesan, C., Possingham, H. P., et Thomas, C. D. 2008. Assisted Colonization and Rapid Climate Change. *Science* **321**: 345-346.
- Houle, D., Bouffard, A., Duchesne, L., Logan, T., et Harvey, R. 2012. Projections of future foil temperature and water content for three southern Quebec forested sites. *Journal of Climate* **25**: 7690-7701.
- Iverson, L. R., Schwartz, M. W., et Prasad A. M. 2004. How fast and far might tree species migrate in the eastern United States due to climate change? *Global Ecology and Biogeography* **13**: 209-219.
- Jaramillo-Correa, J. P., Beaulieu, J., et Bousquet, J. 2001. Contrasting evolutionary forces driving population structure at expressed sequence tag polymorphisms, allozymes and quantitative traits in white spruce. *Molecular Ecology* **10**: 2729-2740.
- Johnston, M. 2009. Vulnérabilité des arbres du Canada aux changements climatiques et propositions de mesures visant leur adaptation : un aperçu destiné aux décideurs et aux intervenants du monde forestier. Conseil canadien des ministres des forêts. 47 pp.

- Khalil, M. A. K. 1985. Genetic variation in eastern white spruce (*Picea glauca* (Moench) Voss) populations. *Canadian Journal of Forest Research* **15**: 444-452.
- Kriegler, E., O'Neill, B. C., Hallegatte, S., Kram, T., Robert, J., Lempert, J., Moss, R. H., et Wilbanks, T. 2012. The need for and use of socio-economic scenarios for climate change analysis: A new approach based on shared socio-economic pathways. *Global Environmental Change* **22**: 807-822.
- Kurz, W. A., Dymond, C. C., Stinson, G., Rampley, G. J., Neilson, E. T., Carroll, A. L., Ebata, T., Safranyik, L. 2008a. Mountain pine beetle and forest carbon feedback to climate change. *Nature* **452**: 987-990.
- Kurz, W. A., Stinson, G., Rampley, G. J., Dymond, C. C., et Neilson, E.T. 2008b. Risk of natural disturbances makes future contribution of Canada's forests to the global carbon cycle highly uncertain. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. **105**: 1551-1555.
- Lamhamedi, M. S., et Carles, S. 2012. Le verger à graines d'où proviennent les semences peut-il affecter la croissance juvénile des plants d'épinette blanche ? *Avis de Recherche Forestière* No 39. 2 p.
- Lamhamedi, M. S., Chamberland, H., Bernier, P. Y., et Tremblay, F. M. 2000. Clonal variation in morphology, growth, physiology, anatomy and ultrastructure of container-grown white spruce somatic plants. *Tree Physiology* **20**: 869-880.
- Lamhamedi, M. S., et 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 Forestière* No 41. 2 p.
- Lamhamedi, M. S., Labbé, L., Margolis, H. A., Stowe, D. C., Blais, L., et Renaud, M. 2006. Spatial variability of substrate water content and growth of white spruce seedlings. *Soil Science Society of America Journal* **70**: 108-120.
- Lamhamedi, M. S., Lambany, G., Margolis, H. A., Renaud, M., Veilleux, L., et Bernier, P. Y. 2001. Growth, physiology, and leachate losses in *Picea glauca* seedlings (1+0) grown in air-slit containers under different irrigation regimes. *Canadian Journal of Forest Research* **31**: 1968-1980.
- Lamhamedi, M. S., Margolis, H. A., Renaud, M., Veilleux, L., et Auger, I. 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. *Canadian Journal of Forest Research* **33**: 279-291.
- Lamhamedi, M. S., Renaud, M., Veilleux, L. 2005. Élaboration des seuils de tolérance au gel des plants d'épinette blanche 1+0 en pépinière forestière selon les régions écologiques du Québec. *Mémoire de recherche forestière* No 147. Direction de la recherche forestière. Gouvernement du Québec. 72 p.
- Lamontagne, Y. 1992. Bilan des réalisations, *Mémoire de recherche* n°106. Vergers à graines de première génération et tests de descendances implantés au Québec pour les espèces résineuses. Gouvernement du Québec, Ministère des Forêts, Direction de la recherche, Québec
- Landis, T. D., Tinus, R. W., et Barnett, J. P. 1989. Seedling nutrition and irrigation. Volume 4. The container tree nursery manual. *Agriculture Handbook* 674. USDA Forest Service, Washington, DC.
- Landis, T. D., Tinus, R. W., et Barnett, J. P. 1999. The container tree nursery manual. Volume 6. Seedling propagation. *Agriculture Handbook* 674. USDA Forest Service, Washington, DC.

Leech, S. M., Lara Almuedo, P., et O'Neill, G. 2011. Assisted Migration: Adapting forest management to a changing climate. *BC Journal of Ecosystems and Management* **12**:18-34.

Le Quéré, C., Andres, R. J., Boden, T., Conway, T., Houghton, R. A., House, J. I., Marland, G., Peters, G. P., van der Werf, G. R., Ahlström, A., Andrew, R. M., Bopp, L., Canadell, J. G., Ciais, P., Doney, S. C., Enright, C., Friedlingstein, P., Huntingford, C., Jain, A. K., Jourdain, C., Kato, E., Keeling, R. F., Klein Goldewijk, K., Levis, S., Levy, P., Lomas, M., Poulter, B., Raupach, M. R., Schwinger, J., Sitch, S., Stocker, B. D., Viovy, N., Zaehle, S., et Zeng, N. 2013. The global carbon budget 1959–2011. *Earth System Science Data* **5**: 165–185.

Le Quéré, C., Moriarty, R., Andrew, R. M., Peters, G. P., Ciais, P., Friedlingstein, P., Jones, S. D., Sitch, S., Tans, P., Arneeth, A., Boden, T. A., Bopp L., Bozec, Y., Canadell, J.G., Chevallier, F., Cosca, C. E., Harris, I., Hoppema, M., Houghton, R. A., House, J. I., Jain, A., Johannessen, T., Kato, E., Keeling, R.F., Kitidis, V., Klein Goldewijk, K., Koven, C., Landa, C. S., Landschützer, P., Lenton, A., Lima, I. D., Marland, G., Mathis, J. T., Metz, N., Nojiri, Y., Olsen, A., Ono, T., Peters, W., Pfeil, B., Poulter, B., Raupach, M. R., Regnier, P., Rödenbeck, C., Saito, S., Salisbury, J. E., Schuster, U., Schwinger, J., Séférian, R., Segschneider, J., Steinhoff, T., Stocker, B. D., Sutton, A. J., Takahashi, T., Tilbrook, B., van der Werf, G. R., Viovy, N., Wang, Y.-P., Wanninkhof, R., Wiltshire, A., et Zeng, N. 2014. Global carbon budget 2014. *Earth System Science Data* **6**: 235-263.

Lesser, M.R., et Parker, W.H. 2004. Genetic variation in *Picea glauca* for growth and phenological traits from provenance tests in Ontario. *Silvae Genetica* **53**: 141-148.

Li, P., Beaulieu, J., et Bousquet, J. 1997. Genetic structure and patterns of genetic variation among populations in eastern white spruce (*Picea glauca*). *Canadian Journal of Forest Research* **27**: 189-198.

Li, P., Beaulieu, J., Corriveau, A., et Bousquet, J. 1993. Genetic variation in juvenile growth and phenology in a white spruce provenance. *Silvae Genetica*. **42**: 152-60.

Lu, P., et Man R. 2011. Assessment of assisted migration effects on spring bud flush in white spruce (*Picea glauca* [Moench] Voss) seedlings. *Forestry Chronicle* **87**: 391-397.

MacKay, J., Dean, J. F. D., Plomion, C., Peterson, D. G., Cánovas, F. M., et Pavy, N. 2012. Towards decoding the conifer giga-genome. *Plant Molecular Biology* **80**: 555-569.

Major, J. E. 2012. Seed-source effects, assisted migration, and fitness / Effets de l'origine des graines, migration assistée et valeur adaptative. Impact Note 57E/Note d'impact 57F. Natural Resources Canada, Canadian Forest Service - Atlantic Forestry Centre, Fredericton, NB.

Malcolm, J. R., Markham, A., Neilson, R. P., et Garaci, M. 2002. Estimated migration rates under scenarios of global climate change. *Journal of Biogeography* **29**: 835–849.

Masek, J. G. 2001. Stability of boreal forest stands during recent climate change: evidence from Landsat satellite imagery. *Journal of Biogeography* **28**: 967-976.

Masui, T., Matsumoto, K., Hijioka, Y., Kinoshita, T., Nozawa, T., Ishiwatari, S., Kato, E., Shukla, P. R., Yamagata, Y., et Kainuma, M. 2011. An emission pathway for stabilization at 6 W m⁻² radiative forcing. *Climatic Change* **109**: 59–76.

Mátyás, C., et Yeatman, C. W. 1992. Effect of geographical transfer on growth and survival of jack pine (*Pinus banksiana* Lamb.) populations. *Silvae Genetica* **41**: 370-376.

McKenny, D. W., Pedlar, J. H., Lawrence, K., Campbell, K., et Hutchinson, M. F. 2007. Potential impacts of climate change on the distribution of North American trees. *BioScience* **57**: 939-948.

MDDEFP. 2012. Québec in Action: 2013-2020 Climate Change Action Plan. Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs, Québec.

Meinshausen, M., Smith, S. J., Calvin, K., Daniel, J. S., Kainuma M. L. T., Lamarque, J-F., Matsumoto, K., Montzka, S. A., Raper, S. C. B., Riahi, K., Thomson, A., Velders, G. J. M., et van Vuuren, D. P. P. 2011. The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300. *Climatic Change* **109**: 213–241.

Michaelian, M., Hogg, E.D., Hall, R.J., et Arseneault, E. 2011. Massive mortality of aspen following severe drought along the southern edge of the boreal forest. *Global Change Biology* **17**: 2084-2094.

Minteer, B. A., et Collins, J. P. 2010. Move it or lose it? The ecological ethics of relocating species under climate change. *Ecological Applications* **20**: 1801–1804.

Mora, C., Frazier, A. G., Longman, R. J., Dacks, R. S., Walton, M. M., Tong, E. J., Sanchez, J. J., Kaiser, L. R., Stender, Y. O., Anderson, J. M., Ambrosino, C. M., Fernandez-Silva, I., Giuseffi, L. M., et Giambelluca, T. W. 2013. The projected timing of climate departure from recent variability. *Nature* **502**: 183-187.

Morgenstern, E. K., et Copis, P. 1999. Les meilleures provenances d'épinette blanche en Ontario. *Dans Rapport d'information ST-X-16. Forêt expérimentale de Petawawa. Service canadien des forêts.* 36 p.

Moss, R. H., Edmonds, J. A., Hibbard, K. A., Manning, M. R., Rose, S. K., van Vuuren, D. P., Carter, T. R., Emori, S., Kainuma, M., Kram, T., Meehl, G. A., Mitchell, J. F. B., Nakicenovic, N., Riahi, K., Smith, S. J., Stouffer, R. J., Thomson, A. M., Weyant, J. P., et Wilbanks, T. J. 2010. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature* **463**: 747-756.

Mueller, J. M., et Hellmann, J. J. 2008. An assessment of invasion risk from assisted migration. *Conservation Biology* **22**: 562–567.

Nations Unies. 1998. Protocole de Kyoto la convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques. Nations Unies. 21pp.

Nienstaedt, H., et Zasada, J. C. 1990. *Picea glauca* (Moench) Voss White spruce. In *Silvics of North America* vol. 1. Conifers - Agriculture Handbook no. 654 Eds. R.M. Burns and B.H. Honkala. États-Unis. Department of Agriculture. p. 204-226.

O'Neill, B. C., Kriegler, E., Riahi, K., Ebi, K. L., Hallegatte, S., Carter, T. R., Mathur, R., et van Vuuren, D. P. 2013a. A new scenario framework for climate change research: the concept of shared socioeconomic pathways. *Climatic Change* **122**: 387–400.

O'Neill, G. A., Ukrainetz, N., Carlson, M., Cartwright, C., Jaquish, B., King, J., Krakowski, J., Russell, J.H., Stoehr, M., Xie, C-Y., et Yanchik, A. 2008. Assisted migration to address climate change in British-Columbia. Recommendations for interim seed transfer standards. BC Min. For. Range, Res. Br., Victoria, BC. Tech. Rep. 048. 28 pp.

O'Neill, G. A., Stoehr, M., et Jaquish, B. 2014. Quantifying safe seed transfer distance and impacts of tree breeding on adaptation. *Forest Ecology and Management* **328**: 122-130.

O'Neill, G., Berger, V., Carlson, M., et Ukrainetz, N. 2013b. Assisted migration. Bulletin. British Columbia Ministry of Forests, Lands and Natural Resource Operations, Tree Improve. Branch.

- Oreskes, N. 2004. The scientific consensus on climate change. *Science* **306**. p. 1686.
- Ouranos. 2014. Vers l'adaptation. Synthèse des connaissances sur les changements climatiques au Québec. Partie 1 : Évolution climatique au Québec. Édition 2014. Montréal, Québec : Ouranos, 79 pp.
- Pedlar, J., McKenney, D. W., Aubin, I., Beardmore, T., Beaulieu, J., Iverson, L., O'Neill, G. A., Winder, R., et Ste-Marie, C. 2012. Placing forestry in the assisted migration debate. *Bioscience* **69**: 835-842.
- Pedlar, J., McKenney, D. W., Beaulieu, J., O'Neill, G. A., McLachlan, J.S., et Colombo, S. J. 2011. The implementation of assisted migration in Canadian forests. *Forestry Chronicle* **87**: 766–777.
- Peters, G. P., Andrew, R. M., Boden, T., Canadell, J. G., Ciais, P., Le Quéré, C., Marland, G., Raupach, M. R., et Wilson, C. 2013. The challenge to keep global warming below 2°C. *Nature Climate Change* **3**: 4-6.
- Plaster, E.J. 2009. *Soil Science and Management*, 5th edition. Delmar. Clifton Park, New York. 495 pp.
- Porter, R. B., Lacourse, T., Hawkins, B. J., et Yanchuk, A. 2013. Adaptive variation in growth, phenology, cold tolerance and nitrogen fixation of red alder (*Alnus rubra* Bong.). *Forest Ecology and Management* **291**: 357–366.
- Rainville, A., Desponts, M., Beaudoin, R., Prinnet, P., Mottet, M. J., et Perron, M. 2003. Note de recherche forestière n° 127, l'amélioration des arbres au Québec: un outil de performance industrielle et environnementale. Direction de la recherche forestière, Ministère des Ressources naturelles, de la Faune et des Parcs du Québec. 8 pp.
- Rainville, A., Beaulieu, J., Langevin, L., Logan, T., et Lambert, M-C. 2014. Prédire l'effet des changements climatiques sur le volume marchand des principales espèces résineuses plantées au Québec, grâce à la génétique forestière. Mémoire de recherche forestière No 174. Gouvernement du Québec. Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs. Direction de la recherche forestière. 58 p.
- Ramanathan, V., et Xu, Y. 2010. The Copenhagen Accord for limiting global warming: Criteria, constraints, and available avenues. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **107**: 8055–8062.
- Rehfeldt, G. E., Tchebakova, N. M., et Barnhardt, L. K. 1999. Efficacy of climate transfer functions: introduction of Eurasian populations of *Larix* into Alberta. *Canadian Journal of Forest Research* **29**: 1660-1668.
- Ressources naturelles Canada. 2013. Arbres, insectes et maladies des forêts du Canada consulté en ligne <http://aimfc.rncan.gc.ca/fr/arbres/fiche/38> le 6 juin 2015.
- Riahi, K., Rao, S., Krey, V., Cho, C., Chirkov, V., Fischer, G., Kindermann, G., Nakicenovic, N., et Rafaj, P. 2011. RCP 8.5—A scenario of comparatively high greenhouse gas emissions. *Climatic Change* **109**: 33–57.
- Ricciardi, A. et Simberloff, D. 2009. Assisted colonization is not a viable conservation strategy. *Trends in Ecology and Evolution* **24**: 248-253.
- Richardson D. M., Carruthers, J., Hui, C., Impson, F. A. C., Miller, J. T., Robertson, M. P., Rouget, M., LeRoux, J. J., et Wilson, J. R. U. 2011. Human-mediated introductions of Australian acacias – a global experiment in biogeography. *Diversity and Distributions* **17**: 771–787.
- Rossi, S., et Bousquet, J. 2014. The bud break process and its variation among local populations of boreal black spruce. *Frontiers in Plant Science* **5**: 574. DOI: 10.3389/fpls.2014.00574.

- Saenz-Romero, C., Beaulieu, J., et Rehfeldt, G. E. 2011. Altitudinal genetic variation among *Pinus patula* populations from Oaxaca, Mexico, in growth chambers simulating global warming temperatures. *Agrociencia* **45**: 399-411.
- Saenz-Romero, C., Rehfeldt, G. E., Soto-Correa, J.C., Aguilar-Aguilar, S., Zamarripa-Morales, V., et Lopez-Upton, J. 2012. Altitudinal genetic variation among *Pinus pseudostrobus* populations from Michoacan, Mexico. Two locations shadehouse test results. *Revista Fitotecnia Mexicana* **35**: 11-120.
- Savva, Y., Denneker, B., Koubaa, A., Tremblay, F., Bergeron, Y., et Tjoelker, M. G. 2007. Seed transfer and climate change effects on radial growth of jack pine populations in a common garden in Petawawa, Ontario, Canada. *Forest Ecology and Management* **242**: 636-647.
- Schmidting, R. C. 1994. Use provenance tests to predict response to climatic change: loblolly pine and Norway spruce. *Tree Physiology* **14**: 805-817.
- Schreiber, S. G., Ding, C., Hamann, A., Hacke, U. G., Thomas, B. R., et Brouard, J. S. 2013. Frost hardiness vs. growth performance in trembling aspen: an experimental test of assisted migration. *Journal of Applied Ecology* **50**: 939-949.
- Seddon, P. J. 2010. From reintroduction to assisted colonization: Moving along the conservation translocation spectrum. *Restoration Ecology* **18**:796-802.
- Solomon, S., Plattner, G.-K., Knutti, R., et Friedlingstein, P. 2009. Irreversible climate change due to carbon dioxide emissions. *PNAS* **106**: 1704-1709.
- St.Clair, B. 2008. Genetic Resources and Climate Change. 2008. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Climate Change Resource Center. Consulté en ligne <http://www.fs.fed.us/ccrc/topics/genetic-resources.shtml>, le 12 octobre 2014.
- Ste-Marie, C., Nelson, E. A., Dabros, A., et Bonneau, M. 2011. Assisted migration: Introduction to a multifaceted concept. *Forestry Chronicle* **86**: 724-730.
- Stowe, D. C., Lamhamedi, M. S., Carles, S., Fecteau, B., Margolis, H. A., Renaud, M., Bernier, P. Y. 2010. Managing irrigation to reduce nutrient leaching in containerized white spruce seedling production. *New Forests* **40**: 185-204.
- Taïbi, K., del Campo, A. D., Mulet, J. M., Flors, J., et Aguado, A. 2014. Testing Aleppo pine seed sources response to climate change by using trial sites reflecting future conditions. *New Forests* **45**: 603-624.
- Tans, P. et Keeling, R. 2014. Trends in Atmospheric Carbon Dioxide. National Oceanic & Atmosphere Administration. Earth System Research Laboratory (NOAA/ESRL). Consulté en ligne : <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccqg/trends/>, le 17 décembre 2014.
- Thomson, A. M., Calvin, K. V., Smith, S. J., Kyle, G. P., Volke, A., Patel, P., Delgado-Arias, S., Bond-Lamberty, B., Wise, M. A., Clarke, L. E., et Edmonds, J. A. 2011. RCP4.5: a pathway for stabilization of radiative forcing by 2100. *Climatic Change* **109**: 77-94.
- Thomson, A. M., Crowe, K. A., et Parker, W. H. 2010. Optimal white spruce breeding zones for Ontario under current and future climates. *Canadian Journal of Forest Research* **40**: 1576-1587.
- Thomson, A. M., et Parker, W. H. 2008. Boreal forest provenance tests used to predict optimal growth and response to climate change. 1. Jack pine. *Canadian Journal of Forest Research* **38**: 157-170.

- UNEP. 2014. Forests in a Changing Climate: A Sourcebook for Integrating REDD+ into Academic Programmes, United Nations. Environment Programme, Nairobi, Kenya, 124 p.
- UNFCCC. 2014a. Status of Ratification of the Kyoto Protocol. United Nations Framework Convention on Climate Change. Consulté en ligne http://unfccc.int/kyoto_protocol/status_of_ratification/items/2613.php le 6 novembre 2014.
- UNFCCC. 2014b. Lima Call for Climate Action Puts World on Track to Paris 2015. Consulté en ligne <http://newsroom.unfccc.int/lima/lima-call-for-climate-action-puts-world-on-track-to-paris-2015/> le 2 mars 2015.
- van Vuuren, D. P., Kriegler, E., O'Neill, B. C., Ebi, K. L., Riahi, K., Carter, T. R., Edmonds, J., Hallegatte, S., Kram, T., Mathur, R., et Winkler, H. 2014. A new scenario framework for climate change research: scenario matrix architecture. *Climatic Change* **122**: 373–386.
- van Vuuren, D. P., Stehfest, E., den Elzen, M. G. J., Kram, T., van Vliet, J., Deetman, S., Isaac, M., Goldewijk, K. K., Hof, A., Beltran, A. M., Oostenrijk, R., et van Ruijven, B. 2011. RCP2.6: exploring the possibility to keep global mean temperature increase below 2°C. *Climatic Change* **109**: 95–116.
- Veilleux, P. 2012. Guide terrain-inventaire de qualification des plants résineux cultivés en récipients. *Édité par Direction générale des pépinières et des stations piscicoles. Ministère de Ressources naturelles et de la Faune, Québec.* 141 p.
- Vitt, P., Havens, K., Kramer, A. T., Sollenberger, D., et Yates, E. 2010. Assisted migration of plants: Changes in latitudes, changes in attitudes. *Biology Conservation* **143**: 18–27.
- Viveros-Viveros, H., Saenz-Romero, C., Vargas-Hernandez, J. J., Lopez-Upton, J., Gustavo Ramirez-Valverde, G., Santacruz-Varela, A. 2009. Altitudinal genetic variation in *Pinus hartwegii* Lindl. I: Height growth, shoot phenology, and frost damage in seedlings. *Forest Ecology and Management* **257**: 836–842.
- Wahid, N., Lamhamedi, M. S., Beaulieu, J., Margolis, H. A., et Deblois, J. 2012a. Genetic parameters and clonal variation in growth and nutritional traits in containerized white spruce somatic seedlings. *Acta Botanica Gallica* **159**: 373–384.
- Wahid, N., Lamhamedi, M. S., Rainville, A., Beaulieu, J., et Margolis, H. A. 2013. Genetic control and nursery-plantation genotypic correlations for growth characteristics of white spruce somatic clones. *Journal of Sustainable Forestry* **32**: 576-593.
- Wahid N., Rainville, A., Lamhamedi, M. S., Beaulieu, J., Margolis, H. A., et Deblois, J. 2012b. Genetic parameters and performance stability of white spruce somatic seedlings in clonal tests. *Forest Ecology and Management* **270**: 45–53.
- Wang, Y., Hogg, E. H., Price, D. T., Edwards, J., Williamson, T. 2014. Past and projected future changes in moisture conditions in the Canadian boreal forest. *Forestry Chronicle* **90**: 678-691.
- Wang, T., Hamann, A., Yanchuk, A., O'Neill, G. A., et Aitken, S. N. 2006. Use of response functions in selecting lodgepole pine populations for future climates. *Global Change Biology* **12**: 2404–2416.
- Winder, R., Nelson, E. A., et Beardmore, T. 2011. Ecological implications for assisted migration in Canadian forests. *Forestry Chronicle* **86**: 731-744.

Yang, J., Pedlar, J. H., McKenney, D. W., et Weersink, A. 2015. The development of universal response functions to facilitate climate-smart regeneration of black spruce and white pine in Ontario, Canada. *Forest Ecology and Management* **339**: 34-43.

Ying, C. C., et Yanchuk, A. D. 2006. The development of British Columbia's tree seed transfer guidelines: Purpose, concept, methodology, and implementation. *Forest Ecology and Management* **227**: 1–13.

Chapitre 2 - Caractérisation morpho-physiologique de différentes sources génétiques d'épinette blanche en pépinière et sites de reboisement dans un contexte de migration assistée au Québec

2.1 Résumé

Les semences forestières provenant des programmes d'amélioration génétique pourraient ne plus être adaptées aux sites où elles sont actuellement destinées en raison des changements appréhendés aux conditions climatiques. Le transfert géographique ou "migration assistée" des sources génétiques de graines en fonction de leur adaptation optimale au climat des sites de reboisement figure parmi les stratégies proposées pour atténuer les conséquences négatives des changements climatiques sur la productivité des forêts. Pour approfondir nos connaissances sur les conséquences possibles de différents types de migration assistée envisageables et faciliter la prise de décision quant au choix des sources génétiques les plus appropriées, les réponses morpho-physiologiques des plants d'épinette blanche issus de huit vergers à graines ont été évaluées après deux ans en pépinière ainsi que sur trois sites de plantation situés dans trois domaines bioclimatiques du Québec.

Les réponses morpho-physiologiques, obtenues à la fin de la deuxième saison de croissance en pépinière, ont permis de regrouper les vergers en 3 groupes distincts. La modélisation des courbes de croissance des plants provenant des différents groupes a montré que la croissance en hauteur des vergers de deuxième génération et des vergers méridionaux de première génération est significativement plus élevée d'au moins 6 % par rapport aux autres vergers. Un modèle de régression multiple à trois variables a montré que la hauteur finale des plants 2+0 provenant des vergers de 1^{ère} génération était significativement corrélée aux conditions climatiques de leur site d'origine (température moyenne de la saison de croissance, température moyenne du mois de juillet, longueur de la saison de croissance). Ceci indique que ces variables pourraient être utilisées lors du choix des sites à privilégier en matière de migration assistée. Par contre, cette relation n'a pas pu être vérifiée avec les vergers de deuxième génération. Le verger et le site de plantation ont affecté significativement la croissance en hauteur des plants, et le rang relatif des différentes sources génétiques était conservé peu importe le site de plantation.

Les résultats de la présente étude combinés avec ceux obtenus à long terme contribueront à raffiner les règles opérationnelles de transfert des semences. Ils permettront également d'identifier les sources de semences (vergers et populations d'amélioration) les mieux adaptées aux conditions climatiques actuelles et futures des différents lieux de plantation.

2.2 Introduction

Les changements climatiques actuels évoluent à une vitesse rapide et la majorité des essences devront s'adapter *in situ* au nouveau climat ou encore migrer vers des conditions plus optimales à leur croissance (Aitken et al. 2008, GIEC 2007, 2013, Alberto et al. 2013, Hamman et Aitken 2013). Cependant, avec leur cycle de vie relativement long et leur capacité naturelle de migration limitée, les populations d'espèces arborescentes pourraient ne plus être adaptées aux conditions climatiques futures anticipées, entraînant ainsi une diminution de la productivité et de la santé des espèces et des écosystèmes (Carter 1996, Iverson et al. 2004, Beaulieu et Rainville 2005, Hamman et Wang 2006, Aitken et al. 2008, O'Neill et al. 2014).

Les plantations jouent un rôle globalement reconnu face à plusieurs enjeux économiques et environnementaux; elles représentent actuellement 7% de la superficie forestière mondiale (FAO, 2010). La FAO reconnaît d'ailleurs les plantations comme un complément aux forêts naturelles, entre autres comme moyen d'approvisionnement en matière ligneuse mais aussi comme moyen d'adaptation et d'atténuation aux effets des changements climatiques. Cependant, pour assurer la réussite de ces plantations, l'adaptation optimale des populations et des sources génétiques améliorées doit être prise en considération lors des programmes de reboisement (Morgenstern et Copis 1999, Andalo et al. 2005, Beaulieu et Rainville 2005). Dans plusieurs provinces du Canada, les modalités de déplacement des sources de semences sont présentement révisées et dans certains cas, ont été modifiées en vue de s'adapter aux changements climatiques anticipés (Pedlar et al. 2011). Par exemple, en Colombie-Britannique, il est maintenant possible de transférer les sources de semences de 200 m d'altitude pour la majorité des espèces commerciales (O'Neill et al. 2008). De plus, les risques souvent associés à la migration assistée dépendent fortement de la distance de déplacement et sont donc très faibles dans le cas d'un déplacement de populations à l'intérieur de la zone de distribution de l'espèce (Mueller et Hellmann 2008, Vitt et al. 2010, Aubin et al. 2011). Cependant, les différentes stratégies de déplacement des semences sont basées principalement sur des modèles empiriques (Beaulieu et al. 2004, Thomson et Parker 2008).

Au Québec, lors des dernières années, environ 130 millions de plants forestiers ont été produits annuellement pour le reboisement dont 20% est représenté par l'épinette blanche, faisant d'elle la troisième essence la plus reboisée de la province après l'épinette noire et le pin gris (Claude Gagné 2014, MFFP, communication personnelle). Au niveau de sa distribution climatique, il s'agit d'une espèce plastique, qui s'étend d'est en ouest en Amérique du Nord, et de la limite des arbres jusque dans le nord des États-Unis (Nienstaedt et Zasada 1990). Elle possède une grande variabilité génétique et un programme d'amélioration génétique nettement avancé par rapport aux autres essences commerciales (Beaulieu et al. 2009). En 2012, 98% des semences utilisées pour produire les plants d'épinette blanche étaient issues de sources améliorées (vergers

de première et de deuxième génération) qui recèlent un gain génétique en hauteur (Rainville et al. 2003, Beaulieu et al. 2009). La production de clones par embryogenèse somatique est actuellement intégrée à l'échelle opérationnelle dans la filière du bouturage et des approches de caractérisation et de sélection en pépinière (Lamhamedi et al. 2000, Wahid et al. 2012a) et sur sites de plantation (Wahid et al. 2012b, 2013) sont développées. Des pieds-mères issus de plusieurs clones somatiques sélectionnés sont intégrés dans la filière de bouturage au Québec (Lamhamedi et Gravel-Grenier 2012). Des approches de sélection par la génomique sont également développées pour différents traits reliés à la croissance et à la qualité du bois chez cette essence (Beaulieu et al. 2011, Beaulieu et al. 2014a, b).

Les modalités de transfert des sources de semences d'épinette blanche actuellement en vigueur au Québec ont été élaborées sur la base de mesures de croissance prises dans les tests de provenances établis dans les années 1960-1970; ces dernières ont permis de développer le premier modèle de transfert (Li et al. 1997). Un second modèle a ensuite été développé en 2005 afin de prédire la hauteur des arbres en fonction d'un écart climatique (Andalo et al. 2005), et finalement un troisième modèle qui prédit plutôt la productivité des plantations d'épinette blanche sous l'effet des changements climatiques (Rainville et al. 2014). Bien que ce dernier modèle permette de guider le choix des sources les mieux adaptées au climat futur afin de maximiser l'adaptation et la productivité des plantations, il nous apparaît important de mieux connaître les paramètres responsables de l'adaptation différentielle des différentes sources génétiques d'épinette blanche utilisées dans les programmes de reboisement. La caractérisation morpho-physiologique en pépinière et dans différents sites de plantation, qui simuleront trois situations de migration assistée, permettra l'acquisition de connaissances sur la réaction de diverses sources vis-à-vis différents stress biotiques et abiotiques, et sera utilisée conjointement avec les modèles de transfert des semences pour raffiner la sélection du matériel génétique hautement productif et tolérant face au changement rapide du climat.

Cet article est le premier d'une série portant sur l'évaluation des impacts des changements climatiques sur l'adaptation de l'épinette blanche. La première partie de cette étude s'est déroulée en pépinière forestière, située dans l'aire de distribution de l'épinette blanche, et porte sur la caractérisation morpho-physiologique au jeune âge de 8 différentes sources génétiques de semences issues de 6 vergers de première génération et 2 vergers de deuxième génération. Cette caractérisation permettra de déterminer s'il existe des différences morpho-physiologiques entre les sources génétiques et d'établir des liens entre la performance des plants et les conditions climatiques d'origine des vergers à graines. Ces mêmes sources génétiques ont été mises en terre dans trois sites de plantation selon un gradient écologique afin de simuler une migration assistée dans trois grands domaines bioclimatiques. Ces trois situations de migration assistée englobent celle réalisée à l'intérieur de la zone de distribution, celle juste à l'extérieur de l'aire de distribution et une dernière complètement à l'extérieur de l'aire de distribution (Ste-Marie et al 2011, Pedlar et al. 2012, Aitken et Whitlock

2013). La caractérisation en pépinière et en site de plantation permettra de prédire les performances morpho-physiologiques des sources génétiques et leur sensibilité aux gels hâtif, tardif et hivernal. Les objectifs de cette étude sont donc : i) Évaluer la variabilité entre les sources génétiques d'épinette blanche pour différents caractères morpho-physiologiques, ceci pendant deux saisons consécutives de croissance en pépinière forestière (1+0 et 2+0), ii) Caractériser la cinétique du débournement des plants (3+0) de différentes sources génétiques d'épinette blanche en serre, iii) Évaluer la performance des sources génétiques d'épinette blanche pendant la phase d'installation en réponse à une simulation d'une migration assistée dans trois sites de plantation répartis dans trois domaines bioclimatiques du Québec.

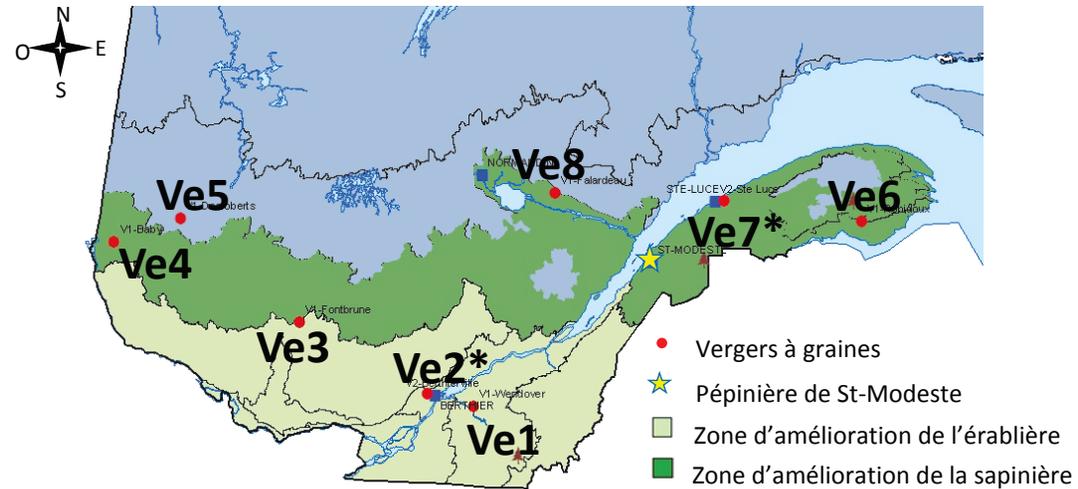
2.3 Matériel et Méthodes

2.3.1 Origine du matériel végétal

Huit vergers à graines clonales d'épinette blanche, dont 6 de première génération et 2 de deuxième génération, ont été choisis selon leur contribution et leur utilisation dans le programme de reboisement du Ministère des forêts, de la faune et des parcs du Québec (MFFP). Les vergers de première génération ont été établis pour chaque région en utilisant des arbres-plus sélectionnés localement en forêt naturelle (Beaulieu et al. 2009), représentatifs d'un territoire situé entre 45°N et 50°N de latitude et entre 57° et 79°O de longitude (annexe 1). Pour leur part, les vergers de deuxième génération ont été établis à partir d'arbres-plus sélectionnés sur de grandes étendues provenant du Québec et de l'Ontario afin de définir le matériel génétique de reboisement pour deux grandes zones naturelle d'adaptation au Québec, soit celle située approximativement au sud du 47° N de latitude et celle au nord (Li et al 1997). Les vergers sélectionnés pour la présente étude ont été numérotés de 1 à 8 par ordre croissant selon leur degré de latitude et les vergers 2 et 7 correspondent aux vergers de deuxième génération (figure 2.1). Les vergers 1 à 3 se trouvent dans le domaine de l'érablière tandis que les vergers 4 à 8 se trouvent dans le domaine de la sapinière (Saucier et al. 2010).

2.3.2 Production des différentes sources génétiques en pépinière forestière (1+0 et 2+0)

Chacun des 8 vergers à graines d'épinette blanche est représenté par deux années de récoltes de cônes, ceci afin de tenir compte de la contribution des différents clones à la production de semences d'un verger, et de la variabilité interannuelle. Afin d'éviter une trop grande différence de grosseur de graines et des variations de croissance en hauteur des semis selon la dimension des semences (Tousignant et al. 2008), seules les semences de calibre 1, 2 et 3 (diamètre $\geq 1,75$ mm), c'est-à-dire celles utilisées à l'échelle opérationnelle, ont été ensemencées. Cette approche de criblage des semences selon la grosseur est utilisée à l'échelle opérationnelle dans la province de Québec afin d'éviter les effets maternels et par souci d'uniformiser la production. L'ensemencement a été fait manuellement dans les récipients 25-310 (25 cavités par récipient, 310 cm³ par cavité; IPL®, Saint-Damien de Bellechasse, Québec) à raison de 3 semences amorcées par cavité, du 10 au 11 mai 2011, à la pépinière de Saint-Modeste (47°50'N, 69°23'O). Les récipients ont été empotés avec un substrat composé de tourbe et de vermiculite (V/V, 3/1) à une densité ajustée à 0,10 g cm⁻³. Pour chacun des 8 vergers, 125 récipients ont été ensemencés pour un total de 25 000 plants. Chaque récipient a été identifié par une étiquette autocollante placée sur une cavité du récipient, ainsi que par une étiquette enfoncée dans cette même cavité.



Vergers à graines	Localité	Latitude (°N)	Longitude (°O)
Ve1	WENDOVER	46,39	71,95
Ve2*	BERTHIERVILLE	46,08	73,18
Ve3	FONTBRUNE	46,43	75,74
Ve4	BABY	47,75	78,47
Ve5	DESROBERTS	48,76	77,86
Ve6	ROBIDOUX	48,55	65,59
Ve7*	STE-LUCE	48,53	68,35
Ve8	FALARDEAU	48,54	71,74

* Vergers à graines de deuxième génération

Figure 2.1 Numérotation, localisation et coordonnées géographiques des 8 vergers à graines d'épinette blanche à l'étude situés dans la province de Québec et emplacement de la pépinière de St-Modeste où les plants ont été produits durant deux saisons de croissance. Les vergers sont identifiés de 1 à 8 en ordre croissant de latitude.

Les récipients ensemencés ont été placés sous un tunnel couvert d'un polythène laiteux les 12 et 13 mai 2011. Les récipients étaient surélevés à une hauteur approximative de 20 cm du sol. Afin de s'assurer qu'aucun effet de gradient dans le tunnel n'affecte la croissance des plants des différentes sources génétiques, les récipients ont été répartis en 5 blocs. Chacun des blocs était composé des mêmes 8 vergers répartis aléatoirement (annexe 2). Chaque verger de chaque bloc contenait 25 récipients. L'éclaircie des semis a été réalisée le 15 juillet 2011 pour les blocs 2, 3, 4 et le 18 juillet 2011 pour les blocs 1 et 5, pour ne conserver qu'un semis par cavité. L'irrigation (1+0 et 2+0), ainsi que la fertilisation ont été appliquées à l'aide d'un robot (Aquaboom, Industries Harnois, Saint-Thomas, Québec) afin d'éviter les effets de la variabilité spatiale des teneurs en eau du substrat (Lamhamedi et al. 2006). Le coefficient d'uniformité d'arrosage du robot varie entre 95 et 98%. Le contenu en eau du substrat a été ajusté selon les stades de croissance des plants au cours de la première saison de croissance (1+0) puis maintenu entre 40 et 45% (volume/volume) durant la deuxième saison de croissance (2+0) (Lamhamedi et al. 2006, Lamhamedi et al. 2001).

Le régime de fertilisation a été ajusté à toutes les deux semaines et tout au long des deux saisons de croissance (1+0, 2+0), à l'aide du logiciel PLANTEC (Girard et al. 2001). À la fin de la première saison de croissance (1+0), chaque plant avait reçu 71 mg d'N (40 mg N-NH₄, 28 mg N-NO₃, 2 mg N-Urée), 20 mg de P, 31 mg de K et 7 mg de Mg ainsi qu'un apport en oligo-éléments (Mn, Cu, Fe et B). Les fertilisations ont été appliquées selon le stade de croissance des plants entre le 9 juin 2011 et le 22 septembre 2011. À la fin de la deuxième saison de croissance (2+0), en plus des oligo-éléments, chaque plant avait reçu entre le 4 mai 2012 et le 4 octobre 2012 : 222 mg d'N (91 mg N-NH₄, 125 mg N-NO₃, 6.5 mg N-Urée), 58 mg de P, 83 mg de K, 57 mg de Ca et 0.9 mg de Mg.

Durant la semaine du 19 décembre 2011, le dispositif a été déplacé à l'extérieur du tunnel, où il a passé l'hiver sous une couverture de neige naturelle, selon une disposition qui respectait le dispositif initial.

2.3.3 Variables de croissance et nutrition minérale 1+0 et 2+0

Des échantillonnages destructifs ont été effectués à des intervalles de deux semaines entre le 2 août 2011 et le 26 octobre 2011 (7 dates d'échantillonnage) lors de la première saison de croissance et entre le 16 mai 2012 et le 17 octobre 2012 (12 dates d'échantillonnage) lors de la deuxième saison de croissance. À chaque date d'échantillonnage, 5 plants par verger pour chacun des 5 blocs ont été aléatoirement prélevés pour un total de 200 plants par date d'échantillonnage. Les 5 plants échantillonnés par verger par bloc provenaient d'un même récipient. Le choix du premier récipient sélectionné par date d'échantillonnage ainsi que le choix des 5 cavités de ce récipient ont été déterminés aléatoirement tandis que les récipients pour les vergers suivants et des autres blocs ont été choisis systématiquement puisque leur position était la même que celle du premier récipient pour le premier verger. Les récipients ayant déjà été sélectionnés lors de la première saison

n'ont pas fait partie de la sélection aléatoire lors de la deuxième saison de croissance. Si un des plants qui devait être récolté était mort, que la cavité était vide ou qu'il s'agissait d'un semis avorté, celui à sa droite était alors systématiquement choisi. Les cavités vides créées par l'échantillonnage ont été remplies de tourbe et recouvertes de silice pour éviter un biais au niveau de la croissance racinaire des cavités voisines. Après chaque récolte, les plants étaient nettoyés à l'aide d'un jet d'air puis à l'eau afin d'enlever toute trace de substrat sur les racines. Les 5 plants provenant du même récipient étaient enroulés dans du papier humide et placés dans des sacs de plastique par verger puis par bloc. Ils étaient ensuite envoyés au Complexe scientifique la journée même et maintenus dans des conditions réfrigérées dès leur arrivée jusqu'au séchage.

Des mesures de hauteur ont été prises, en cm, à l'aide d'une règle standard en mesurant le plant du collet jusqu'à l'extrémité du bourgeon apical. Si le bourgeon apical était absent ou sec, la mesure était prise à l'extrémité de la tige, à l'endroit où il se trouvait. Pour un plan à tête multiple, la mesure devait être prise jusqu'au bourgeon de la tige dominante. Le mesurage du diamètre a été effectué avec un pied à coulisse digital d'une précision de 0,02 mm. Les hauteurs et les diamètres de tous les plants ont été mesurés dans les 24 à 48h suivant l'échantillonnage. Une fois mesurés, les plants étaient coupés au collet afin de séparer la partie aérienne du système racinaire. La partie aérienne et les racines ont été placées séparément dans des sacs de papier, puis séchées à l'étuve pour un minimum de 48h à 65°C. Une fois séchées, les masses des parties aériennes et du système racinaire ont été prises pour chacun des 200 plants échantillonnés. Puisque la croissance d'un plant est fortement dépendante de la croissance initiale (Lamhamedi et al. 1997, 1998), l'échantillonnage 2+0 représente la sommation des 2 saisons de croissance.

Lors de chacune des deux saisons de croissance et à chaque date d'échantillonnage, l'analyse de la nutrition minérale des tissus des parties aériennes et des racines (N, P, K, Ca et Mg) a été évaluée au moyen d'échantillons composites (5 plants/verger/bloc). La concentration en azote totale a été déterminée par combustion de l'échantillon à haute température en mesurant la conductibilité thermique à partir de l'analyseur LECO Trumac N (Leco Corporation, St-Joseph, Michigan). Les autres éléments (P, K, Ca, Mg) ont été dosés à l'aide d'un spectromètre d'émission atomique au plasma (modèle ICAP 9000, Thermo Instruments, Franklin, Massachusetts). Le contenu en éléments minéraux a été calculé pour chaque élément (concentration multipliée par la masse sèche) reflétant ainsi la quantité de nutriments contenus dans une quantité de matériel végétal (Timmer et al. 1991). Puisque les tissus ont été regroupés en échantillons composites pour les analyses, le contenu en éléments minéraux a été calculé à partir d'une moyenne de masse sèche des tissus. La fertilité du substrat (N-NO₃, N-NH₄, N_{minéral}, P, K, Ca, Mg) a aussi été analysée au moyen d'échantillons composites. Dans ce cas, l'échantillon composite était constitué du mélange des substrats issus des plants du même verger provenant du même bloc. Les analyses ont été réalisées au laboratoire de chimie organique et inorganique du MFFP (ISO/CEI 17025).

2.3.4 Échanges gazeux des différentes sources génétiques (2+0)

Des mesures d'échanges gazeux ont été prises sur les plants lors de leur deuxième saison de croissance (2+0). Le 3 août 2012, les plants ont été échantillonnés aléatoirement à la pépinière St-Modeste à raison d'un plant/verger/bloc, pour un total de 40 plants. Les plants ont ensuite été placés dans une chambre de croissance à l'Université Laval et les mesures ont été prises du 6 au 8 août 2012 à l'aide de l'appareil de photosynthèse LI-COR 6400 (LI-COR Inc., Lincoln, NE, USA). L'intensité de lumière de la chambre de croissance était d'environ 800 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$, la température à 20°C et l'humidité relative de l'air à 55%. Les conditions dans la cuvette lors des mesures des échanges gazeux étaient de 20°C et de 55% d'humidité relative. Les mesures ont été prises sur une section d'une branche latérale correspondant à la deuxième année de croissance. Cette branche devait être lignifiée et les aiguilles devaient avoir terminé leur développement. Afin d'éviter tout effet de stress hydrique, les plants ont été irrigués avant la prise de mesures et saturés d'eau par capillarité, en plaçant les récipients dans des bacs d'eau. Trois variables ont été mesurées : la photosynthèse nette (A), la transpiration (E) et la conductance stomatique (g_{sw}). L'efficacité d'utilisation de l'eau a été calculée à partir de la formule suivante :

$$WUE = \frac{A}{g_{sw}} \quad (1)$$

Les mesures qui ont servi aux calculs sont des moyennes de trois mesures consécutives stables.

Après la prise des mesures, la branche utilisée sur chacun des plants fut coupée et trempée dans l'azote liquide. Toutes les aiguilles ont ensuite été détachées afin de mesurer la surface foliaire projetée à l'aide du logiciel WinSeedle (Regent Instrument Inc., Québec, Canada). Les aiguilles ont ensuite été mises à l'étuve à 65°C pendant 48h dans le but d'obtenir la masse sèche et de calculer la surface foliaire spécifique (SFS; cm^2/g).

2.3.5 Primordia des bourgeons (2+0)

À la fin de la deuxième saison de croissance (28 octobre 2012) et lorsque les bourgeons de tous les plants étaient bien formés, l'évaluation du nombre de primordia a été effectuée. Les plants utilisés pour l'évaluation des primordia ont été échantillonnés de façon aléatoire à raison d'un plant par verger par bloc. Cependant, les plants devaient être représentatifs de chaque lot, par exemple, en terme de hauteur et devaient posséder un bourgeon terminal bien développé. Les plants ont ensuite été transportés au laboratoire de la Direction de la recherche forestière du MFFP à Québec où la dissection des bourgeons apicaux a été réalisée. Lors de la dissection des bourgeons, les écailles ont été enlevées complètement selon la méthode de Templeton (Templeton et al. 1993). À l'aide d'un microscope (Wild M7A Heerbrugg, Willowdale, Ontario, Canada) muni

d'une source lumineuse d'appoint, les primordia ont été observés suivant deux types de rangées, soit les rangées courtes montant assez directement jusqu'à l'apex, et les rangées longues montant plus graduellement jusqu'à l'apex (Templeton et al. 1993). Le microscope utilisé était muni d'une caméra CMOS PL-B686CF (PixelINK®, Ottawa, Ontario) qui permet de prendre une photographie des trajets des rangs des primordia. Cette photo permet par la suite d'évaluer le nombre moyen de primordia composant les rangs courts puisque ce nombre peut varier légèrement d'un rang à l'autre (Templeton et al. 1993). Le nombre total de primordia dans un bourgeon est égal au nombre de rangs courts multipliés par le nombre moyen de primordia contenus dans ces rangées (annexe 3).

2.3.6 Évaluation du débourrement du bourgeon apical des plants d'épinette blanche (3+0)

Après la fonte nivale vers le 2 mai 2013, soit au début de leur 3^e saison de croissance, les plants en récipients ont été transférés de la pépinière de St-Modeste aux serres du Complexe Scientifique du ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP) du Québec afin d'évaluer le débourrement des plants (3+0) en conditions contrôlées. Le plan d'expérience comportait 5 blocs comprenant chacun les 8 vergers d'épinette blanche distribués aléatoirement dans chacun de ces blocs. Chaque verger était représenté par 5 plants pour un total de 40 plants par bloc. Les plants sélectionnés devaient avoir un bourgeon terminal présent ainsi qu'un système racinaire doté d'une bonne cohésion de la carotte et ayant une apparence saine.

Les plants sélectionnés ont été transplantés en pots individuels de 1,92 litres avec un mélange de tourbe et de vermiculite (v/v; 3/1) à une densité de 0,10 g cm⁻³ puis la surface du pot fut recouverte de silice. Les pots ont ensuite été placés en serre sous les conditions optimales de culture pour le débourrement des semis. La serre était équipée de 9 lampes halogènes métalliques de 1000W (P.L Light Systems, Beamsville, Ontario, Canada) ajustées à 28 000 lux. Celles-ci procurent une intensité lumineuse moyenne de 800 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ à la hauteur des plants. Durant l'expérience, la photopériode a été fixée à 18h (de 6h00 à 24h00), la température à 25°C le jour/ 20°C la nuit et l'humidité relative de l'air à 64% le jour et 80% la nuit. L'humidité relative a été contrôlée par deux humidificateurs 707U (Trion Air Cleaning Equipment, Broadway, North Carolina) installés aux extrémités de la serre. L'arrosage manuel des plants était fait selon les besoins afin de maintenir une teneur en eau du substrat entre 40 et 45% (v/v) (Lamhamedi et al. 2006). Les observations du débourrement ont été réalisées à l'œil nu à chaque jour et à la même période de la journée à partir du 4 mai 2013 jusqu'au 18 mai 2013. Sur chaque plant, on notait la date à laquelle il atteignait deux stades de débourrement bien spécifiques, soit le stade 0 où les écailles sont fermées et le stade final où les écailles sont déchirées de la base ou à l'extrémité du bourgeon, laissant voir les nouvelles aiguilles (Dhont et al. 2010). Le nombre de jours pour atteindre le stade final de débourrement pour chacun des 8 vergers a ensuite été calculé.

2.3.7 Données climatiques d'origine des vergers à graines de première génération

À partir du centre pondéré des arbres-plus de chaque verger, les conditions climatiques moyennes ont été estimées à l'aide du logiciel générique BioSIM (version 10.2.5.39) (Régnière et St-Amant 2008) pour chacun des vergers à graines de première génération en utilisant les normales de 30 ans (1981 à 2010) avec 100 simulations. Les estimations ont été établies à partir des données de température et de précipitations régionales interpolées à partir des 8 stations météorologiques avoisinantes du verger et ajustées selon les différences d'altitude, de latitude et de longitude (Régnière et St-Amant 2008). L'estimation des données climatiques d'origine des sources génétiques n'a été faite que pour les vergers de première génération puisque l'origine des arbres semenciers constituant les vergers de deuxième génération était très étendue, créant ainsi une différence importante entre les conditions climatiques d'origine des arbres semenciers et celles du verger à graines.

2.3.8 Sites de plantation: Simulation de scénarios de migration assistée

Les plants ayant été produits en pépinière ont été mis en terre sur trois sites de plantation situés à l'est de la province de Québec, et répartis dans trois domaines bioclimatiques : le domaine de l'érablière, le domaine de la sapinière et le domaine de la pessière (Saucier et al. 2010). La caractérisation initiale des plants a été réalisée avant la plantation à l'aide de 15 plants/verger afin d'obtenir les valeurs moyennes de hauteur (33,5 cm - 41,9 cm), masse totale (11,9 g - 15,5 g) et concentration en azote des parties aériennes (1,5 % - 1,68 %). Les plantations expérimentales ont été établies les 28 et 29 mai 2013 dans le canton de Watford en Beauce (46°30'N, 70°40'O, région de l'érablière), du 4 au 6 juin dans le canton d'Asselin au Témiscouata (47°84'N, 68°52'O, région de la sapinière) et du 11 au 13 juin dans le canton de Deville en Gaspésie (48°62'N 65°72'O, région de la pessière). Le premier site simule une migration tout juste à l'extérieur de l'aire optimale de distribution de l'épinette blanche (selon l'endroit, l'épinette blanche représente de 0 à 7% du couvert forestier de l'érablière) tandis que les deux autres simulent une migration assistée à l'intérieur même de son aire de distribution (15 à 63% de la couverture en essences forestières dans ces régions est constituée par l'épinette blanche) (annexe 4). Les analyses texturales du sol ont révélé la présence de sols loameux pour les sites de Watford et d'Asselin et d'un loam-argileux pour le site de Deville. Les températures moyennes et les précipitations du 15 juin au 30 septembre 2013 étaient de 15,5°C et 518 mm pour Watford, 15°C et 507,5 mm pour Asselin et 13,8°C et 292,9 mm pour Deville. Pour chaque site, quatre blocs ont été établis dans lesquels les 8 sources génétiques ont été distribuées aléatoirement en parcelles de 27 m * 27 m à raison de 144 plants/parcelle. Les plants ont été mis en terre selon la densité indiquée pour l'épinette blanche au Québec, soit 2000 plants/ha (Bureau du forestier en chef 2013). Un dégagement de la compétition végétale a été effectué à la mi-juillet 2013. À la fin de la première année de croissance sur le site de reboisement, ce qui peut être considérée comme la phase d'installation, la hauteur de 64 plants/verger/bloc a été mesurée sur chacun

des trois sites puisqu'il s'agit d'une variable hautement contrôlée génétiquement (Li et al 1993, Cornelius 1994, Wahid et al. 2013). D'autres observations ont été également notées, notamment la survie, la présence de dégâts de gels, la présence de chlorose ou non due à l'accumulation d'eau, etc.

Six autres plantations simulant différents types de migration, puisqu'elles sont réparties selon deux autres transects, soit un transect nord-sud situé au centre de la province et un dernier situé à l'ouest, ont été récemment établies par le MFFP et pourront être analysées à une date ultérieure.

2.3.9 Analyses statistiques

Des analyses de variance ont été effectuées à l'aide de la procédure MIXED de SAS (SAS Institute Inc., 2011, SAS/STAT® 9.3 User's Guide, Cary, NC, USA) pour chaque variable mesurée. Un modèle à mesures répétées a été utilisé pour les variables ayant été mesurées aux deux semaines (hauteur, diamètre, masses sèches et nutrition minérale des tissus). Dans ce cas, les dates et les vergers ont été considérés comme des facteurs à effets fixes et les blocs comme un facteur à effets aléatoires. Une structure de variance/covariance la plus appropriée a été utilisée pour chacune des variables à analyser afin de tenir compte de l'autocorrélation entre les mesures effectuées sur les mêmes unités expérimentales. Plusieurs structures ont été testées et la sélection finale a été faite de manière à minimiser la valeur de la vraisemblance obtenue, tout en ayant le moins de paramètres possibles. Les postulats de normalité et d'homogénéité de la variance des résidus ont été vérifiés à l'aide de la procédure UNIVARIATE de SAS. Le seuil de significativité a été reconnu significatif à 5% ($P < 0,05$). Lorsque l'interaction entre l'effet des vergers et celui des dates d'échantillonnage était significative, les comparaisons entre les vergers ont été réalisées à la dernière date d'échantillonnage pour chacune des deux saisons de croissance (1+0 et 2+0). Les comparaisons multiples entre les moyennes ont été effectuées à l'aide d'une approche par simulations (Westfall et al. 1999) afin de déterminer où se situaient les différences. Les comparaisons des moyennes des variables d'échanges gazeux (A , g_{sw} , WUE et E), le nombre de primordia par bourgeon terminal et le nombre de jours avant le débourrement au printemps 2013 ont été effectuées à l'aide du test de Tukey. Les données correspondant au nombre de jours avant débourrement ont été transformées en utilisant la transformation logarithmique pour respecter les postulats d'homogénéité de la variance et de normalité des résidus.

Afin de déterminer les vergers similaires en matière de différentes variables morpho-physiologiques, une analyse de groupement des vergers a été effectuée à la dernière date d'échantillonnage de la deuxième saison de croissance (2+0) en utilisant la procédure CLUSTER de SAS (SAS Institute Inc.). Le groupement a été effectué en utilisant 3 variables (hauteur totale, masse racinaire et contenu en azote des parties aériennes) indicatrices de la performance des plants et considérées lors de la qualification des plants soumis aux normes de critères de qualité pour le reboisement au Québec (Veilleux 2013). Les valeurs moyennes de ces trois

variables par verges ont été standardisées avant l'analyse par groupement afin d'obtenir des échelles comparables. Le nombre de groupes a été retenu à partir de la valeur du R^2 qui indique la proportion de la variance expliquée par les classes.

Des courbes de croissance en hauteur et en masses racinaires ont été modélisées pour chacun des groupes de verges obtenus à l'aide d'un modèle logistique asymptotique en utilisant la procédure NLMIXED de SAS (SAS Institute Inc.):

$$Y = \frac{a}{[1 + e^{-c(\text{jour}-b)}]} + u + \varepsilon \quad (2)$$

où Y est la hauteur du plant à un jour donné; a, le paramètre de la hauteur à la fin de la saison de croissance 2+0 (l'asymptote de la courbe); b, le paramètre de la date à laquelle la moitié de la hauteur finale est atteinte (le point d'inflexion de la courbe); c, le paramètre du taux de croissance; e, la base du logarithme népérien; u, l'effet aléatoire du bloc et; ε , l'erreur résiduelle.

La comparaison des paramètres des courbes pour chaque groupe de verges a été faite à partir du test de T avec correction de Bonferroni. Le seuil auquel les différences ont été reconnues significatives correspond au seuil théorique ($P < 0,05$) divisé par le nombre de comparaisons 2 à 2 que nous devons faire pour chacun des paramètres.

Une régression multiple entre la hauteur finale 2+0 des plants provenant des 6 verges à graines de première génération et les conditions climatiques d'origine des verges a également été effectuée. Dix variables climatiques (la température de la saison de croissance, la température moyenne annuelle, la température minimum, la température maximum, la température moyenne du mois de juillet, les degrés-jours (5°C), les précipitations de la saison de croissance, les précipitations annuelles totales, l'aridité et la longueur de la saison de croissance), estimées par le logiciel BioSIM (Régnière et Saint-Amant 2008), ont été utilisées. L'option RSQUARE de la procédure REG de SAS (SAS Institute Inc.) a été utilisée afin de déterminer les combinaisons de variables ayant le meilleur coefficient de détermination (R^2). Les effets de colinéarité ont été vérifiés à l'aide des options TOL, VIF et COLLIN de la procédure REG de SAS (SAS Institute Inc.).

Pour la hauteur des plants mesurée en sites de reboisement, l'analyse de la variance a été effectuée à l'aide de la procédure MIXED de SAS (SAS Institute Inc.). Les sites, les verges et l'interaction site*verge ont été considérés comme des facteurs à effets fixes tandis que les blocs ont été considérés comme des facteurs à effets aléatoires. Les postulats de normalité et d'homogénéité de la variance des résidus ont été vérifiés et la comparaison des moyennes a été effectuée à partir du test de Tukey ($P < 0,05$).

2.4 Résultats

2.4.1 Variables de croissance des plants d'épinette blanche (1+0 et 2+0)

Lors de la première saison de croissance, l'analyse de la variance a montré que l'effet verger était significatif ($P < 0,0001$) pour toutes les variables de croissance à l'exception de la masse sèche des racines ($P = 0,0862$). L'effet de la date était quant à lui significatif pour toutes les variables. L'interaction date*verger était significative uniquement pour la masse sèche totale ($P = 0,0406$) et celle des parties aériennes ($P = 0,0064$). À la fin de la première saison de croissance (26 octobre 2011), les comparaisons des moyennes des masses sèches des parties aériennes et des masses sèches totales n'ont montré aucune différence significative entre les plants des différents vergers. La hauteur moyenne atteinte par les plants de tous les vergers confondus était de 9,9 cm et le diamètre moyen de 2,7 mm. Les masses sèches moyennes étaient de 0,93 g pour les parties aériennes, de 0,38 g pour les racines et de 1,31 g pour le plant entier.

À la deuxième saison de croissance (2+0), l'effet de verger et l'effet de date étaient significatifs pour toutes les variables de croissance (diamètre ($P < 0,0001$), masses sèches des parties aériennes ($P < 0,0001$), masses sèches des racines ($P = 0,0066$) et des masses sèches totales ($P = 0,0002$) tandis que l'interaction date*verger était significative uniquement pour la hauteur ($P = 0,0151$). Les comparaisons réalisées à la fin de la deuxième saison de croissance (17 octobre 2012), ont montré que le verger 3 avait atteint une hauteur supérieure (41,9 cm) à celle du verger 6 (33,6 cm) et du verger 8 (35,7 cm), alors que le verger 7 avait quant à lui atteint une hauteur finale (39,8 cm) supérieure à celle du verger 6 (33,6 cm) (figure 2.2a, tableau 2.1). (Des images des plants des 8 vergers sont présentées en annexe 5).

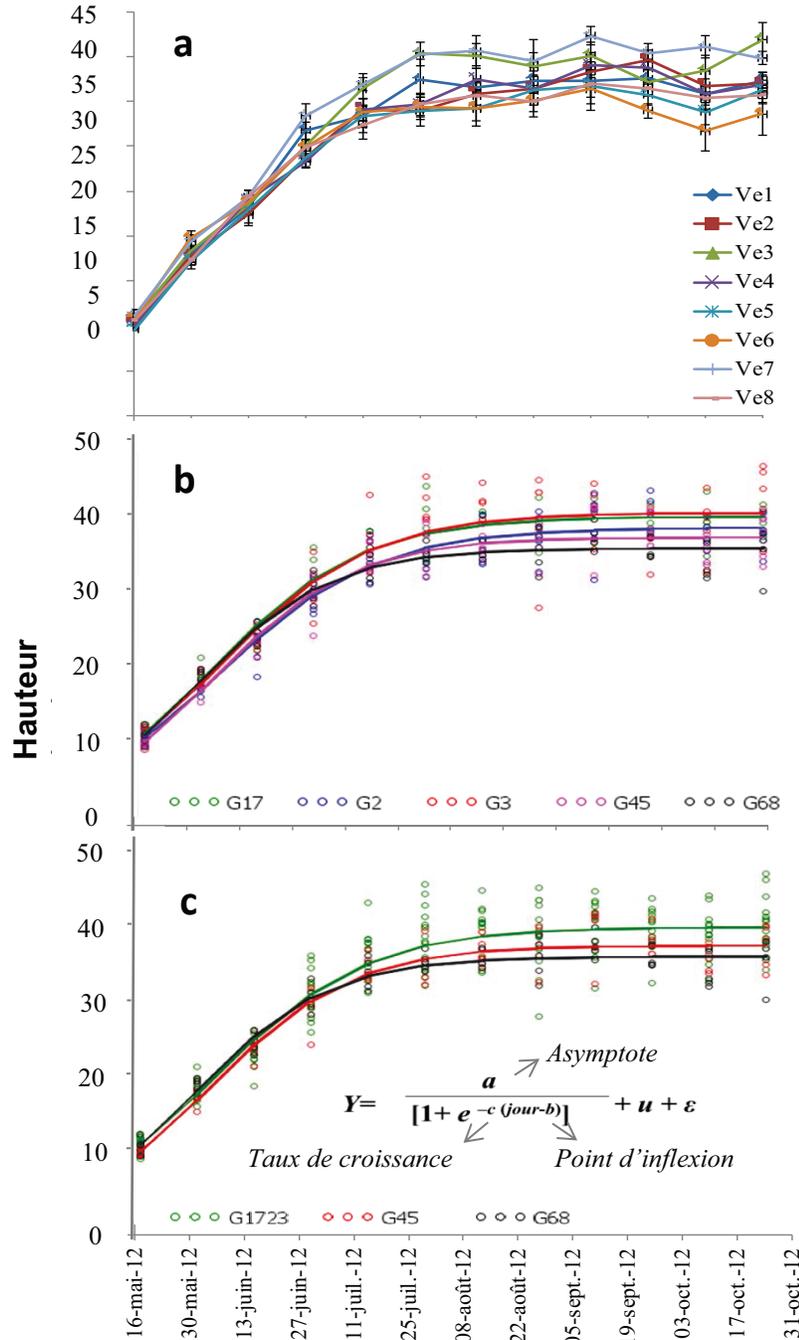


Figure 2.2 a) Courbes de croissance en hauteur des plants d'épinette blanche provenant des 8 verges à graines (Ve1 à Ve8) lors de leur deuxième saison de croissance (2+0) en pépinière forestière et dont les mesures ont été prises à chaque 2 semaines (n=25). (b) Courbes de croissance en hauteur des 5 groupes de vergers (G17, G2, G3, G45, G68) modélisées à partir d'un modèle de croissance logistique. Les vergers ont été groupés selon trois variables de croissance mesurées à la fin de la deuxième saison de croissance (2+0). (c) Courbes de croissance en hauteur des 3 groupes de vergers (G1723, G45, G68) modélisées à partir d'un modèle de croissance logistique. Les vergers ont été regroupés à partir des 5 groupes obtenus précédemment selon les paramètres de croissance démontrant une forte similitude (voir texte).

Tableau 2.1 Variables morphologiques (moyenne et erreur type entre parenthèses) des plants provenant des 8 vergers à graines d'épinette blanche telles que mesurées à la fin de la deuxième saison de croissance (2+0) en pépinière et ayant servi au groupement des vergers.

Vergers	H (cm)	MSR (mg)	N (mg/plant)
Ve1	37,3 (0,9) ^{abc}	2276 (121) ^a	134 (8) ^a
Ve2	37,0 (1,1) ^{abc}	2117 (210) ^a	127 (11) ^a
Ve3	41,9 (2,0) ^a	2190 (170) ^a	136 (13) ^a
Ve4	36,8 (1,5) ^{abc}	2407 (151) ^a	129 (5) ^a
Ve5	36,3 (1,5) ^{abc}	2420 (99) ^a	130 (6) ^a
Ve6	33,6 (2,4) ^c	2278 (145) ^a	119 (10) ^a
Ve7	39,8 (0,8) ^{ab}	2245 (167) ^a	129 (5) ^a
Ve8	35,7 (0,8) ^{bc}	2281 (49) ^a	122 (6) ^a

H=hauteur moyenne des plants; MSR=masse sèche des racines; N=contenu en azote dans les parties aériennes du plant. Pour une variable donnée, les moyennes suivies de lettres identiques indiquent l'absence de différence significative entre les vergers selon des comparaisons multiples effectuées à l'aide d'une approche par simulation (SIMULATE) au seuil de 5% (n=25).

..

2.4.2 Nutrition minérale

Lors de la première saison de croissance (1+0) l'effet de verger et l'effet de date étaient significatifs pour tous les éléments minéraux (N, P, K, Ca, Mg) des parties aériennes et des plants entiers tandis que pour les racines, l'effet de verger n'était significatif que pour le contenu en K ($P = 0,0197$). L'interaction date*verger était significatif uniquement pour le contenu en K des parties aériennes ($P = 0,0005$) et celui du plant entier ($P = 0,0038$). Les plants du verger 2 avaient un contenu en K (14,16 mg) supérieur à celui des plants des vergers 4 (7,47 mg), 5 (8,42 mg) et 8 (8,58 mg). Aussi, le contenu en K des parties aériennes des plants du verger 3 (12,28 mg) était supérieur à celui du verger 4 (7,47 mg). L'effet de verger était significatif pour le contenu de tous les autres éléments minéraux des parties aériennes (N, P, Ca, Mg) ainsi que pour le contenu en K des racines. En observant les concentrations en éléments minéraux des parties aériennes, l'interaction date*verger était significative pour les contenus en N ($P = 0,0198$) et en K ($P = 0,0385$). Les comparaisons des moyennes ont révélé que les vergers 4 (2,61 %), 6 (2,61 %) et 7 (2,60 %) ont atteint des concentrations en azote des parties aériennes plus élevées que celles du verger 2 (2,32 %). Dans le cas du K, les plants du verger 2 (1,34 %) avaient une concentration supérieure aux plants des vergers 4 (0,86 %) et 7 (1,00 %) et la concentration des plants du verger 3 (1,19 %) était supérieure à celle des plants du verger 4 (0,86 %).

À la deuxième saison de croissance (2+0), l'analyse de la variance a montré que l'effet de verger était significatif pour tous les éléments minéraux des parties aériennes, tandis que seulement le contenu en N était significatif dans le cas des racines ($P = 0,0418$) et celui en K dans le cas des plants entiers ($P = 0,0079$). L'effet de date était significatif pour tous les éléments minéraux et pour tous les types d'échantillons; par contre, l'interaction date*verger était significative uniquement pour le contenu en K des parties aériennes ($P = 0,0278$) et du plant entier ($P = 0,0361$). Les comparaisons des contenus à la dernière date d'échantillonnage (17 octobre 2012) n'ont cependant montré aucune différence significative entre les plants des différents vergers.

2.4.3 Échange gazeux et efficacité de l'utilisation de l'eau

Des différences significatives entre les vergers pour les mesures de photosynthèse nette (A) ($P = 0,0315$), la conductance stomatique (g_{sw}) ($P = 0,0282$) et la transpiration (E) ($P = 0,0389$) ont été observées (figure 2.3). Le taux de photosynthèse des plants du verger 4 était supérieur à celui des plants du verger 1 (figure 2.3a). La conductance stomatique et la transpiration des plants du verger 4 étaient supérieures à celles des plants du verger 8 (figure 2.3b et c). Aucune différence significative ($P = 0,2573$) n'a été observée entre les vergers pour l'efficacité d'utilisation de l'eau (WUE).

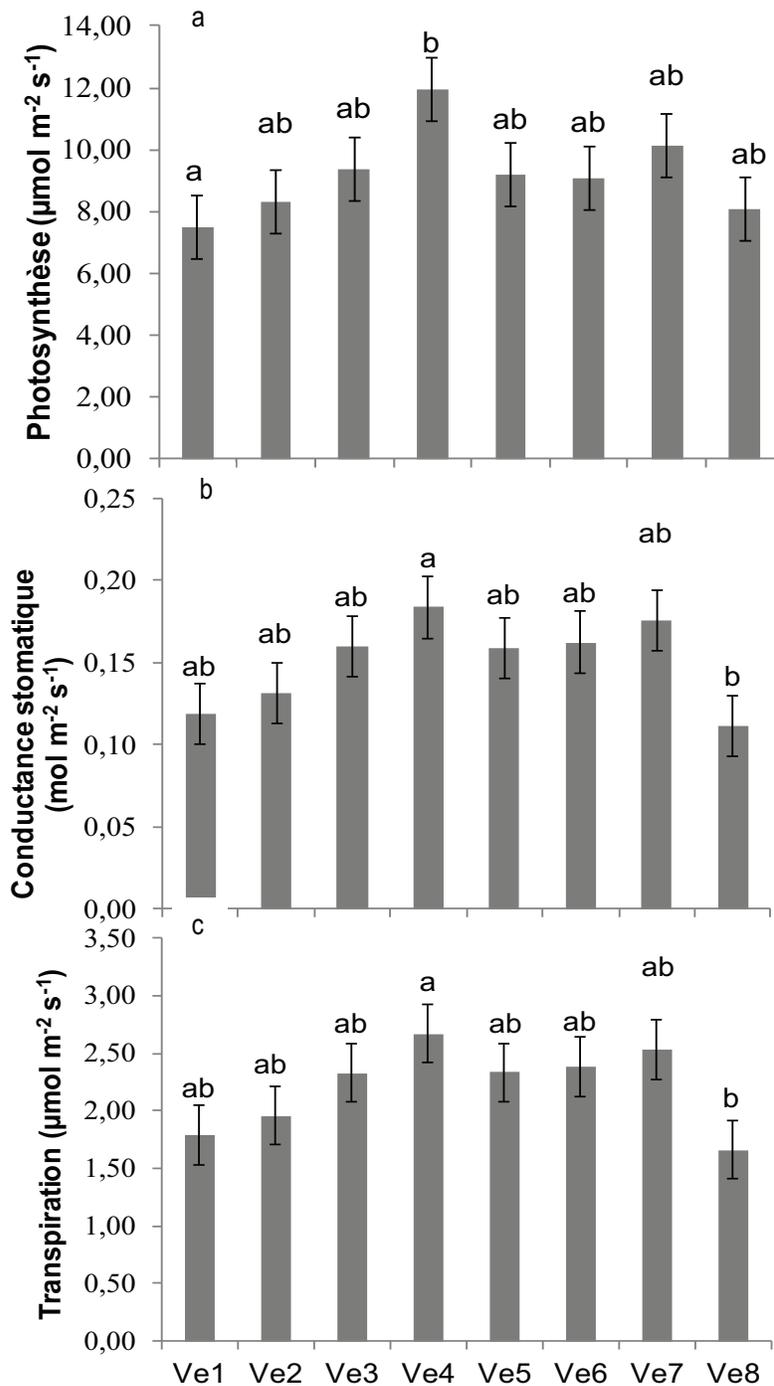


Figure 2.3 a) Taux de photosynthèse b) conductance stomatique c) et transpiration des plants d'épinette blanche provenant de 8 vergers à graines au Québec (Ve1 à Ve8) et mesurés en chambre de croissance au mois d'août de la deuxième saison de croissance (2+0) (moyenne et erreur type, n=5 plants). Pour une variable donnée, les moyennes ayant la même lettre ne sont pas significativement différentes selon le test de Tukey ($\alpha = 0.05$).

2.4.4 Nombre de primordia des bourgeons terminaux (2+0) et débourrement

Le nombre de primordia présents sur les bourgeons terminaux le 28 octobre 2012 était plus élevé pour les plants du verger 4 avec une moyenne de 424 primordia comparativement aux plants du verger 5 ayant une moyenne de 246 primordia ($P = 0,0816$) (figure 2.4). Aucune différence significative ($P = 0,3671$) entre les vergers n'a été observée pour la cinétique du débourrement en milieu contrôlé au début de la troisième saison de croissance (3+0). Le nombre de jours moyen pour atteindre le dernier stade de débourrement était de 4 jours.

2.4.5 Groupement des vergers et modélisation de la croissance en hauteur

L'analyse par groupement à partir de trois variables (hauteur, masse sèche des racines et contenu en azote des parties aériennes) mesurées à la fin de la deuxième saison de croissance des plants d'épinette blanche (17 octobre 2012) (tableau 2.1) a résulté en 5 groupes de vergers distincts expliquant 93% de la variance totale (figure 2.5). Le premier groupe était composé des vergers 1 et 7 (G17), les vergers 2 (G2) et 3 (G3) étaient individuellement séparés et composaient respectivement le deuxième et le troisième groupe, les vergers 4 et 5 (G45) composaient le quatrième groupe et les vergers 6 et 8 (G68) formaient le cinquième groupe (figure 2.5).

Les comparaisons du paramètre a (asymptote de la courbe), suite à la modélisation des courbes de croissance en hauteur de ces 5 groupes (figure 2.2a et 2.2b), indiquent que les groupes G17, G2 et G3 sont semblables entre eux et plus grands que le groupe G45 et le groupe G68. Les comparaisons du paramètre b (point d'inflexion de la courbe) indiquent que le groupe G17, G2, G3 et le groupe de vergers G45 sont différents du groupe G68. Finalement, les comparaisons du paramètre c (taux de croissance) indiquent que tous les groupes de vergers sont semblables (résultats non présentés). Comme les vergers 1, 7, 2 et 3 avaient des courbes de croissance en hauteur semblables, cela nous a permis de regrouper ces vergers ensemble et de modéliser les courbes de croissance en hauteur des trois nouveaux groupes de vergers constitués, c'est à dire les vergers 1, 7, 2 et 3 regroupés (G1723), les vergers 4 et 5 regroupés (G45) et les vergers 6 et 8 regroupés (G68) (figure 2.2b et 2.2c, annexe 6). Les comparaisons des paramètres de cette modélisation (figure 2.6) montrent que le regroupement G1723 a atteint une hauteur maximale significativement plus élevée ($a = 39,1\text{cm}$) que celles des groupes G45 ($a = 36,7\text{ cm}$) et G68 ($a = 35,2\text{ cm}$) (figure 2.6a). Cependant, le groupe G68 a atteint la moitié de sa hauteur finale ($b=15$ jours) significativement plus rapidement que le groupe G1723 ($b = 19$ jours) et le groupe de G45 ($b = 18$ jours) (figure 2.6b). Bien que les comparaisons du paramètre c indiquent que les courbes de croissance en hauteur de ces 3 regroupements de vergers ont le même taux de croissance (figure 2.6c), ils montrent des patrons de croissance distincts (figure 2.2c, figure 2.6a, b).

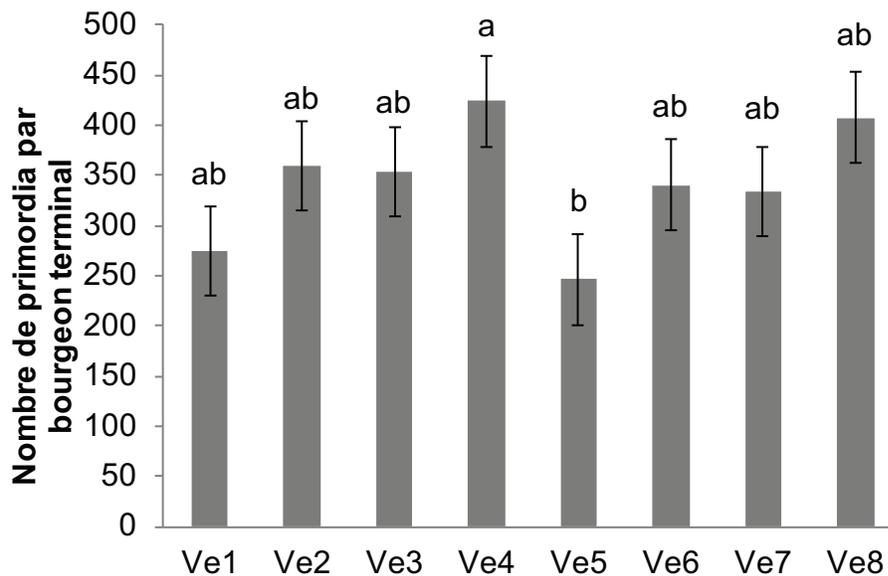


Figure 2.4 Nombre de primordia par bourgeon terminal des plants d'épinette blanche 2+0 provenant de 8 vergers à graines au Québec (Ve1 à Ve8) (moyenne et erreur type, n=5 plants). Les moyennes ayant la même lettre ne sont pas significativement différentes selon le test de Tukey ($\alpha = 0.05$).

2.4.6 Performance en relation avec le climat d'origine des vergers

Parmi les dix variables à caractère climatique intégrées dans les différents modèles, une combinaison des trois variables, soit la température moyenne de la saison de croissance, la température du mois de juillet et la longueur de la saison de croissance, a été retenue tout en évitant les effets élevés de colinéarité. Ce modèle à trois variables montre que 30% ($R^2\text{-ajusté}=0,30$) de la hauteur finale des plants 2+0 est expliquée par ces trois variables climatiques d'origine des vergers à graines ($P = 0,0066$) :

$$H = 47,31512 - 40,66226 * T_m + 45,84888 * T_j - 1,62881 * L_s \quad (3)$$

où H est la hauteur en centimètres; T_m , la température moyenne de la saison de croissance; T_j , la température moyenne du mois de juillet; L_s , la longueur de la saison de croissance.

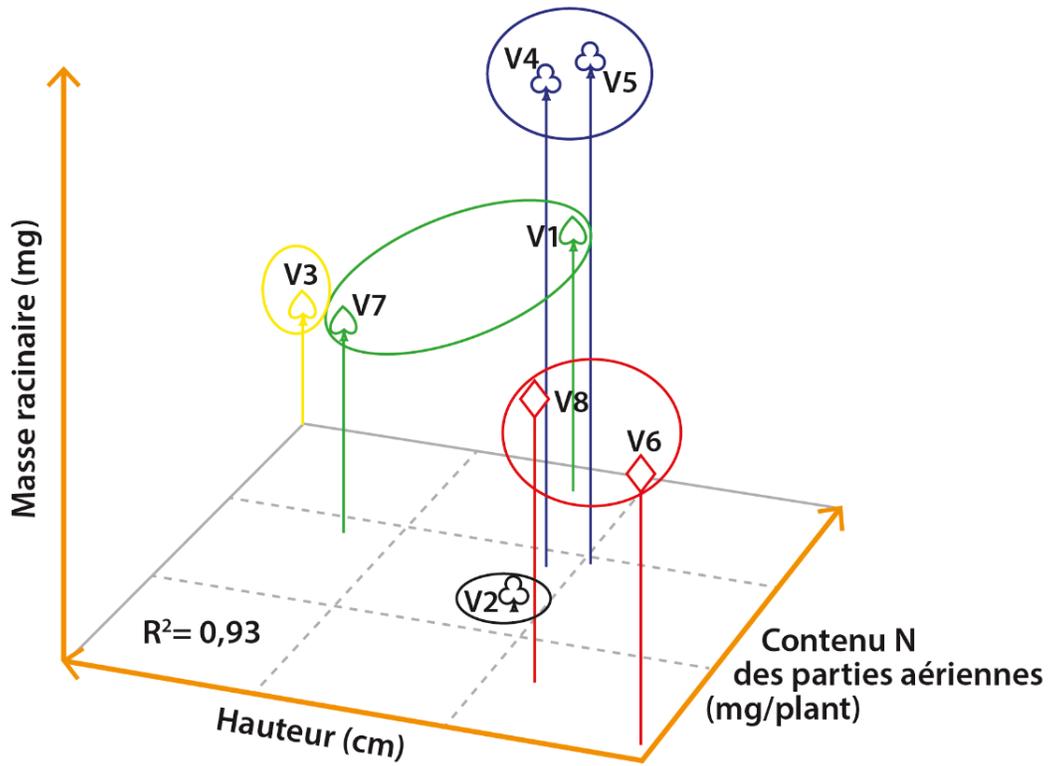


Figure 2.5 Groupement des vergers à graines à partir de trois variables morphologiques mesurées à la fin de la seconde saison de croissance (17 octobre 2012); la masse sèche des racines, la hauteur et le contenu en N des parties aériennes. Ce groupement a été obtenu en utilisant la méthode Ward. Les vergers aux symboles semblables font partie du même groupe.

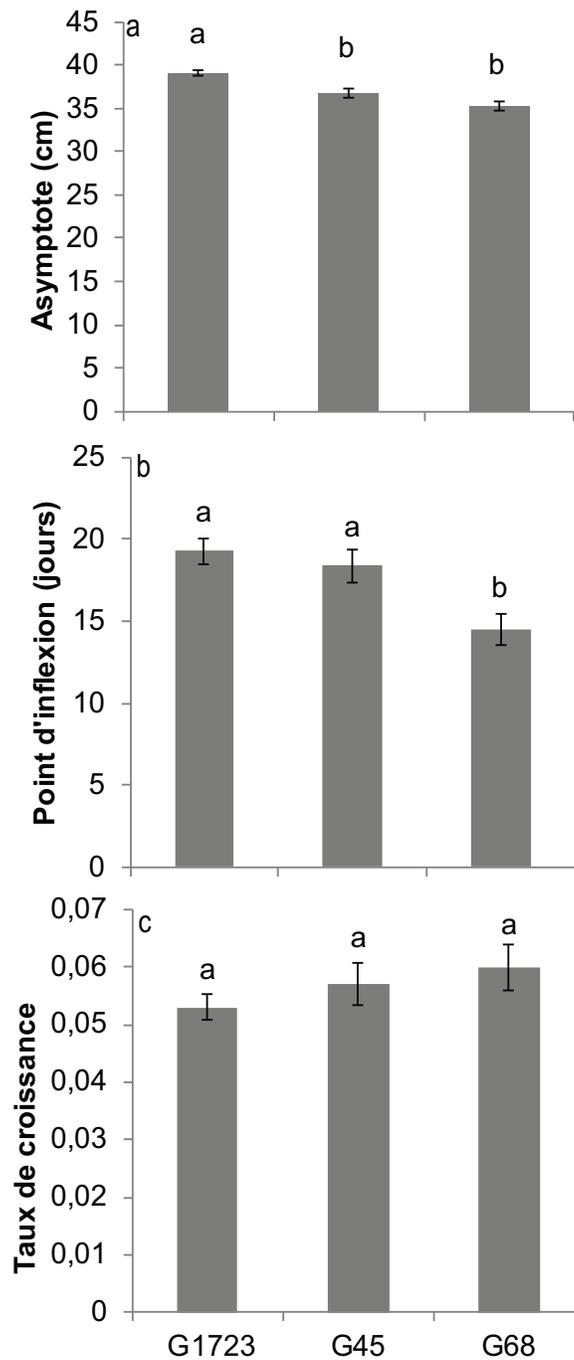


Figure 2.6 a) Asymptote b) point d'inflexion c) taux de croissance (moyenne et erreur type) des 3 courbes de croissance en hauteur modélisées selon un modèle logistique de croissance pour la deuxième année de croissance (2+0) en pépinière pour les 3 regroupements de vergers à graines d'épinette blanche (G1723, G45, G68). Pour une variable donnée, les moyennes ayant la même lettre ne sont pas significativement différentes selon le test de Bonferroni au seuil $\alpha = 0,017$.

2.4.7 Performance pendant la phase d'établissement en sites de plantation

Après la première saison de croissance sur les sites de plantation, l'analyse de la variance pour la hauteur des plants pendant la phase d'établissement, c'est-à-dire après la première saison de croissance sur les trois sites, a montré que l'effet de site et l'effet de verger étaient significatifs ($P < 0.0001$) tandis que l'interaction site*verger ne l'était pas ($P = 0,2905$). La comparaison des hauteurs moyennes des plants entre les trois sites a montré que la hauteur était supérieure pour le site d'Asselin (52,23 cm) comparativement à celle du site le plus au sud-ouest, Watford (50,52 cm), et celle du site le plus au nord-est, Deville (46,25 cm) (figure 2.7). La comparaison des moyennes de la hauteur des plants entre les vergers, après une saison de croissance, a montré que les plants issus des vergers 3 et 7 avaient atteint une hauteur moyenne supérieure à celle des autres vergers, que les plants des vergers 6 et 8 affichaient la hauteur moyenne la plus faible et que ce rang était conservé peu importe le site de plantation (figure 2.8).

Le taux de survie moyen des plants provenant des 8 vergers confondus était supérieur à 98% pour chacun des 3 sites de plantation, soit de 98,2%, 99,6% et 99,2% pour Watford, Asselin et Deville, respectivement.

De plus, aucun effet apparent de gel hâtif ou tardif n'a été observé pendant les différentes saisons de croissance aussi bien en pépinière que dans les trois sites de plantation.

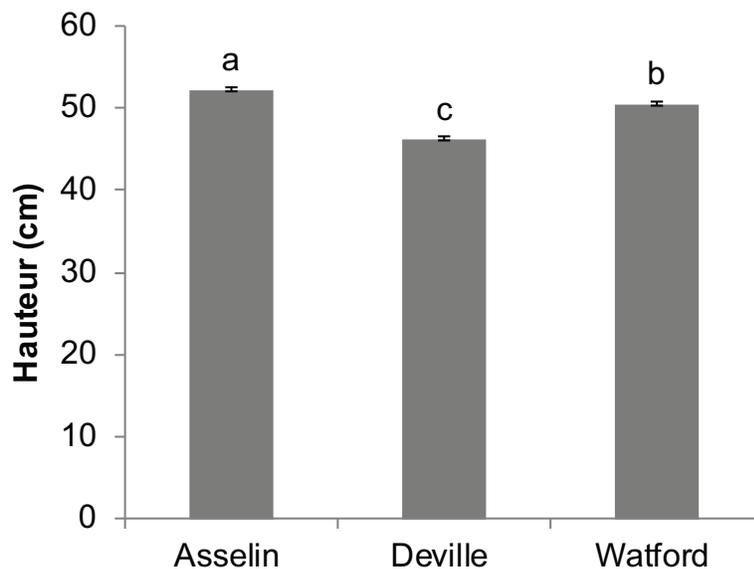


Figure 2.7 Hauteur des plants des 8 vergers à graines d'épinette blanche confondus à la fin de la première saison de croissance en plantation pour chacun des 3 sites forestiers (moyenne et erreur type, $n=2048$ plants par site). Les moyennes n'ayant pas la même lettre sont significativement différentes selon le test de Tukey ($\alpha = 0,05$).

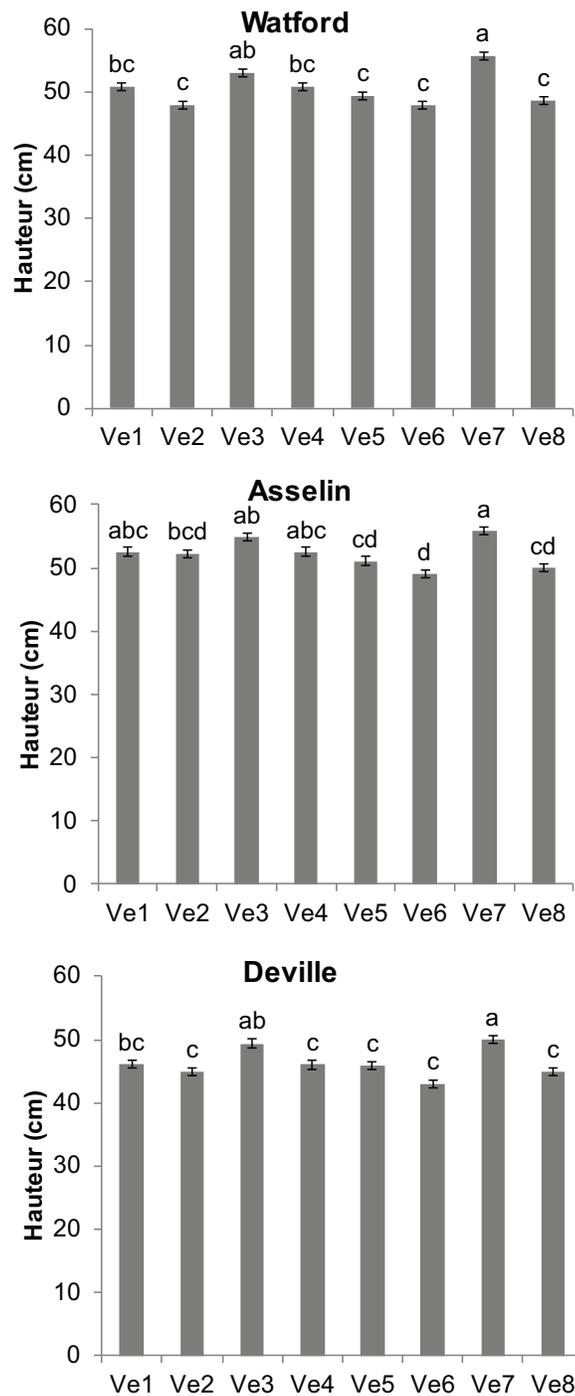


Figure 2.8 Hauteur des plants provenant de chacun des 8 vergers à graines d'épinette blanche (Ve1 à Ve8) pour les 3 sites de plantation à la fin de la première saison d'établissement (moyenne et erreur type, n=256 plants par verger). Les moyennes ayant la même lettre ne sont pas significativement différentes selon le test de Tukey ($\alpha = 0,05$).

2.5 Discussion

Cette étude a permis de développer les premières bases scientifiques d'une approche d'évaluation des différentes sources génétiques qui pourraient être utilisées à l'échelle opérationnelle au Québec dans le cadre de projets de transfert de semences ou de migration dite assistée. Cette approche combine la détermination des réponses morpho-physiologiques de différentes sources génétiques d'épinette blanche à la fois en pépinière, cette dernière étant située dans l'aire de distribution de cette essence, et dans différents sites de plantation qui simulent trois types de migration assistée (1. à l'intérieur de la zone de distribution naturelle de l'espèce mais à l'extérieur des zones de reboisement où elles sont normalement destinées dans les conditions climatiques actuelles, 2. juste à l'extérieur de l'aire de distribution, ou 3. complètement à l'extérieur de l'aire de distribution sur des distances qui pourraient être supérieures à celle des zones de dissémination naturelle des semences de l'espèce).

L'évaluation en pépinière a permis de déterminer à un bas âge les performances morpho-physiologiques et la sensibilité aux stress environnementaux des différentes sources génétiques étudiées (e.g. gels hâtif, tardif et hivernal). En effet, l'évaluation des variables de croissance et de la nutrition minérale des plants d'épinette blanche provenant des 8 vergers à graines a révélé la présence de différences morpho-physiologiques significatives entre les différentes sources génétiques. L'environnement relativement optimal et uniforme (variables environnementales, irrigation, fertilisation, substrat de croissance, etc.) de la pépinière a donc pu favoriser l'expression du potentiel génétique, révélant selon toute probabilité une adaptation différentielle de nature génétique entre les différentes sources de semences (Wahid et al. 2012a).

2.5.1 Groupement des vergers

Les variables morpho-physiologiques recueillies sur des plants issus d'un mélange de différentes années semencières ont permis de définir trois groupes de vergers en terme de similitude des réponses pour différents caractères, soit la hauteur finale, la masse des racines et le contenu en azote (figure 2.5), ainsi qu'au niveau du patron d'évolution de la croissance en hauteur tout au long de la saison de croissance (figure 2.2). Les courbes de croissance en hauteur modélisées pour chacun des trois groupes de vergers (figure 2.2c) ont démontré que les sources génétiques situées plus au sud (1 et 3) et celles de deuxième génération (2 et 7) avaient le potentiel d'atteindre des hauteurs significativement supérieures à celles des vergers de l'ouest (4 et 5) et du nord-est (6 et 8) (figure 2.6a). Nos résultats corroborent ceux obtenus par Lesser et Parker (2004) lors d'une étude menée chez des plants d'épinette blanche en jeune âge issus de 127 sources de semences de l'Ontario et du Québec, où les sources de semences ayant la plus grande croissance en hauteur à la fin de la deuxième saison de croissance provenaient généralement du sud. Un tel cline sud-nord a aussi été observé chez 63 populations d'épinette blanche en bas âge provenant du Québec et de l'Ontario lors de leur

croissance en pépinière (Li et al. 1997) ainsi que lors d'une étude réalisée sur 10 vergers à graines de première génération au Québec produits en pépinière pendant 2 ans, (Carles et al. 2011). Chez des plants d'épinette blanche âgés de 8 et de 13 ans issus de 26 sources de semences représentant 6 régions écologiques de la forêt tempérée et boréale de la province de Québec, Jaramillo-Correa et al. (2001) ont aussi montré que la hauteur des plants issus des populations des régions écologiques du sud était plus élevée que celles du nord. Un tel cline a aussi été observé chez l'épinette noire (Beaulieu et al. 2004) et pour des espèces présentes ailleurs dans le monde comme dans le cas des populations de *Pinus patula* (Saenz-Romero et al. 2011) et le *Pinus pseudostrobus* Lindl. (Saenz-Romero et al. 2012) au Mexique où un gradient altitudinal a été observé pour ces deux espèces.

2.5.2 Nutrition minérale et échanges gazeux

À la fin de la deuxième saison de croissance (2+0), la concentration foliaire moyenne en azote des plants provenant des 8 vergers (N=1.6 %) se situait dans l'intervalle requis de 1,4 à 2,2 % d'azote, pour assurer la survie et la bonne croissance des plants résineux produits en récipients (Landis et al. 1989). Pour les plants d'épinette blanche de fortes dimensions, il a été démontré qu'une concentration foliaire en azote supérieure à 1,5% permet d'obtenir des taux de photosynthèse nette adéquats et une bonne régénération des racines permettant donc d'obtenir un bon taux de survie et de croissance lors de l'établissement en sites de plantation (Gagnon et Lamhamedi 2011). Malgré que les taux de photosynthèse nette maximale ne soient pas différents entre les sources de semences du sud et celles du nord, et tel qu'observé par Bigras et Bertrand (2006) chez l'épinette noire, la moyenne pour tous les vergers était de $9,2 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, ce qui est comparable aux valeurs obtenues dans plusieurs études portant sur l'épinette blanche et qui se situent entre 6 et $15 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Awada et Redmann 2000, Sullivan et Sveinbjornsson 2011). Nos résultats peuvent s'expliquer par l'étendue restreinte en latitude des vergers d'épinette blanche ($46^{\circ}08'$ à $48^{\circ}76'$) comparativement à celle pour l'épinette noire ($45^{\circ}23'$ à $50^{\circ}39'$).

2.5.3 Formation des bourgeons et débourrement

Nos résultats obtenus sous des conditions environnementales homogènes de température, de précipitations et de photopériode, autant en site de pépinière qu'en site forestier, ont révélé que les sources génétiques du nord-est (vergers 6 et 8), qui démontraient une croissance inférieure aux autres sources, ont aoûté 4 jours plus tôt que celles du sud et que celles de deuxième génération (figure 2.6b), résultant en un arrêt de la croissance en hauteur plus hâtif pour les sources du nord-est. D'ailleurs, Li et al. (1993) avaient rapporté que chez les plants d'épinette blanche de 3 ans issus de 57 provenances du Québec et de l'Ontario produits en pépinière et reboisés en site de plantations, l'entrée en dormance était plus tardive pour les plants atteignant une hauteur plus élevée. Ces différents résultats indiquent que la saison de croissance tend donc à se prolonger pour les sources génétiques affichant les meilleures croissances.

Lors du débourrement en serre, les présents résultats ont indiqué que les sources génétiques de l'est du Canada ont probablement des cinétiques de débourrement similaires en présence de conditions environnementales optimales, ce qui confirme généralement la tendance rapportée par Li et al. (1993) pour des plants d'épinette blanche âgés de trois ans en pépinière. Il serait alors intéressant d'évaluer sur plusieurs années consécutives, dans le cadre des sites de plantation spécifiques à la migration assistée, la cinétique de formation des bourgeons et du débourrement afin de mieux caractériser la tolérance aux gels hâtif, tardif et hivernal de ces différentes sources génétiques. Effectivement, en modélisant des données de température de 10 stations météo à travers le Canada afin d'évaluer l'effet de l'augmentation de la température sur les dates de débourrement et les risques de dégâts causés par le gel tardif chez l'épinette blanche, Colombo (1998) a montré qu'avec le réchauffement du climat, le débourrement devrait être plus hâtif et les risques de gels tardifs printaniers pourraient fluctuer selon l'interaction entre le génotype et le climat local. D'autres travaux réalisés en serre ou en pépinière ont démontré, comme ici, que le débourrement est un trait physiologique sous contrôle polygénique en raison d'une distribution continue de la variation observée, et que des différences significatives étaient observées en matière de débourrement entre différentes sources géographiques ainsi que parmi différentes descendances au sein de ces sources géographiques, à la fois chez l'épinette blanche (Li et al. 1993, Rweyongeza et al. 2010) et chez l'épinette noire (Rossi et Bousquet 2014).

2.5.4 Adaptation des sources génétiques au climat d'origine

Chez les sources de semences de première génération, la hauteur atteinte à la fin de la deuxième année de croissance était liée à trois variables de température de la saison de croissance à l'origine des sources génétiques, soit négativement corrélée à la température moyenne de la saison de croissance et à la longueur de la saison de croissance, et positivement corrélée à la température moyenne du mois de juillet. À l'inverse des résultats observés antérieurement sur 45 sources de semences d'épinette blanche au Québec lors de la modélisation de 4 scénarios de changements climatiques (Andalo et al. 2005), la performance des présentes sources génétiques n'était pas liée aux variables de précipitation. Par ailleurs, l'adaptation des sources génétiques à leurs conditions climatiques d'origine pourrait avoir favorisé la croissance des sources génétiques dont la localisation de verger était la plus proche du lieu de la pépinière de notre étude, ce qui pourrait expliquer en partie la hauteur inférieure des plants d'épinette blanche issus des vergers de l'ouest et du nord-est où le climat local est plus froid. En ce sens, il serait pertinent de caractériser les mêmes sources génétiques, mais cette fois dans une pépinière située au nord ou à l'ouest de la province.

2.5.5 Performance des sources génétiques pendant la phase d'établissement

Les résultats obtenus pendant la phase d'établissement, c'est-à-dire après une première saison de croissance en site de reboisement, ont révélé un taux de survie très élevé et l'absence de dommages causés par le gel pour les trois différents sites de plantation. Ceci laisse supposer, à court terme, une bonne acclimatation et

une adaptation des différentes sources génétiques aux conditions climatiques rencontrées dans les trois domaines bioclimatiques, notamment pour les sites installés juste à l'extérieur de l'aire de distribution de l'épinette blanche. L'absence de mortalité observée lors de la phase d'établissement pour les trois sites de plantation pourrait être notamment due à la plasticité phénotypique de ces sources génétiques d'épinette blanche (Loo et al. 2015). D'ailleurs, des résultats similaires avaient été observés chez 52 clones somatiques d'épinette blanche suite à leur transfert sur 2 sites de plantation dans les domaines de l'érablière et de la sapinière (Wahid et al. 2012b) et aussi pour 57 provenances d'épinette blanche provenant du Québec et de l'Ontario reboisées sur trois sites couvrant l'érablière et la sapinière où la performance des plants de 3 ans était stable peu importe le site de plantation (Li et al. 1993). L'évaluation de la hauteur des plants issus de différentes sources génétiques pendant la phase d'installation a montré la présence de variation significative entre les sources génétiques. La croissance en hauteur, tout comme l'aoûtement et le débournement, est une variable qui démontre une héritabilité modérée mais tout de même significative ($h^2_F = 0,17$ à $0,45$) chez des familles d'épinette blanche lors de leur croissance en pépinière pendant 2 ans et mesurées à 8 ans en site de plantation (Li et al. 1993). Elle est plus forte chez les clones pour la hauteur mesurée lors des deux premières années de croissance en pépinière ($H^2_c = 0,60$) (Wahid et al. 2012b, 2013) et après quatre années en tests clonaux ($H^2_c = 0,26$) (Wahid et al. 2012b), de même que chez les boutures d'épinette blanche issues de 75 familles à la fin de la première saison de croissance ($H^2 = 0,76$) et à la fin de la deuxième saison de croissance ($H^2 = 0,79$) (Gravel-Grenier et al. 2011).

Le déplacement des sources de semences forestières est pratiqué depuis fort longtemps (Wright 1976), mais l'utilisation de cette approche comme moyen opérationnel d'adaptation des plantations aux changements climatiques est un nouveau concept qui attire une attention particulière depuis 2007 (Hewitt et al. 2011). En effet, à l'échelle internationale, plusieurs travaux de recherche ont été réalisés ou sont en cours de réalisation pour tirer profit de la variation intraspécifique, par exemple en évaluant l'effet du déplacement de sources génétiques à l'intérieur de l'aire de répartition des espèces (O'Neill et al. 2008, Thomson et Parker 2008, O'Neill et al. 2014), mais aussi pour tester le déplacement d'essences sur de longues distances à l'extérieur des aires actuelles de distribution des espèces. Par exemple, au Canada, un vaste projet portant sur 16 espèces provenant de la Colombie-Britannique et des états de Washington, d'Oregon et d'Idaho a été mis sur pied afin de déterminer la performance des sources génétiques lorsque déplacées en hautes latitudes au Yukon, et afin d'étudier également la tolérance des sources du nord à un réchauffement climatique en les reboisant en plus basses latitudes en Californie (Marris 2009, Williams et Dumroese 2013b).

L'utilisation des semences à l'échelle opérationnelle dans un programme de migration assistée demande des connaissances approfondies du matériel génétique, aussi bien au niveau de la pépinière qu'en plantation en milieu naturel (Williams et Dumroese 2013a). Nos premiers résultats sont fort encourageants et l'évaluation à

long terme des réponses morpho-physiologiques des différentes sources génétiques *in situ* sur plusieurs sites de plantation et pour plusieurs caractères reliés à l'adaptation (croissance, tolérance aux stress biotiques et abiotiques dont le gel, la sécheresse, la susceptibilité aux ravageurs forestiers, etc.) contribuera à raffiner et à mieux préciser les modèles de transfert de semences actuels qui sont généralement établis sur la base de modèles empiriques (Beaulieu et al. 2004; Rainville et al. 2014).

2.6 Conclusion et implications pour la migration assistée

La caractérisation morpho-physiologique des plants d'épinette blanche provenant de 8 sources génétiques, aussi bien en pépinière durant les deux premières années de croissance (1+0 et 2+0) qu'après une année de croissance dans trois sites de plantation, a permis d'évaluer rapidement le comportement des sources génétiques en période juvénile. En plus de permettre une sélection hâtive du matériel génétique, basée sur une combinaison des performances observées en pépinière et en site de plantation, l'originalité de nos résultats réside dans la mise en évidence, chez les vergers de première génération, d'une forte relation entre la hauteur finale à la fin de la deuxième année de croissance et le climat d'origine des semenciers du verger, plus particulièrement la température moyenne de la saison de croissance, la température du mois de juillet et la longueur de la saison de croissance. Cette corrélation laisse supposer que l'on devra tenir compte de ces paramètres climatiques lors du choix des sites de reboisement afin de faciliter l'adaptation des plants. Les réponses morpho-physiologiques différentes obtenues dans l'environnement relativement contrôlé de la pépinière est attribuable à l'expression du plein potentiel génétique des différentes sources de semences. Combinées avec les modèles de transfert, ces différences quant aux réponses morpho-physiologiques permettront de définir de nouvelles zones de transfert des semences qui amélioreront l'adaptation des plantations du Québec dans un contexte de changements climatiques.

L'approche de cette présente étude, qui combine les résultats de la croissance en pépinière et en sites de plantation, a des implications pratiques pour le reboisement. L'évaluation, à moyen et à long terme, des différentes sources génétiques sur différents sites de plantation contribuera à sélectionner les sources génétiques qui seront les mieux adaptées selon l'amplitude du déplacement (à l'intérieur de l'aire de distribution de l'espèce, juste à l'extérieur et sur de longues distances). Elle permettra d'optimiser la mise en application du choix des sources génétiques dans le cadre des projets de migration assistée en maximisant à court terme la correspondance entre le climat d'origine des sources génétiques et le choix de sites potentiels selon les variables climatiques qui sont ressorties comme les plus significatives dans la présente étude. Ils permettront également d'identifier les sources de semences (e.g. vergers et populations d'amélioration) les mieux adaptées aux conditions climatiques actuelles et futures. La combinaison de ces différents résultats permettra de préciser davantage l'amplitude écologique d'utilisation de chaque verger et de générer des cartes de déplacement et d'aptitude des sites au reboisement spécifiques à chaque source génétique.

Il s'avère également important de poursuivre l'évaluation à moyen terme, dans l'espace et dans le temps, de la productivité des plantations issues de diverses sources génétiques, la production de pollen et de semences de ces plantations en relation avec les variations du climat (température, précipitation, durée de la saison de croissance, etc.), et d'évaluer les réponses morpho-physiologiques des différentes sources génétiques en réponse aux interactions multiples des différents stress environnementaux. Ces différentes informations

contribueront, à long terme, à vérifier si la stratégie de migration assistée adoptée, basée sur les connaissances acquises grâce aux travaux de recherche, aura été efficace, en permettant par exemple l'établissement d'une nouvelle régénération potentiellement mieux adaptée aux variations du climat.

2.7 Remerciements

Cette étude a été réalisée avec la collaboration de la Direction de la recherche forestière (DRF) et de la Direction générale des pépinières et des stations piscicoles (DGPSP) du ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP) du gouvernement du Québec, ainsi que le Centre de foresterie des Laurentides du Service canadien des forêts (CFL.). Les auteurs remercient Michel Rioux et Julie Gravel-Grenier et tout le personnel de la pépinière de St-Modeste du MFFP, ainsi que Mario Renaud, Pascal Desjardins, Linda Veilleux, Guido Gagnon et Marie-Claude Lambert de la DRF du MFFP, le professeur Steeve Pépin du Département des sols et génie agroalimentaire de l'Université Laval, Dr. Marie Coyea du Département des sciences du bois et de la forêt (Université Laval) ainsi que Debra-Christiansen Stowe de Takuvik (Université Laval). Les auteurs remercient également le personnel du Laboratoire de chimie organique et inorganique de la DRF du MFFP. Le soutien financier de ce projet a été assuré par une subvention du Fonds de Recherche du Québec – Nature et Technologies (FRQNT) et par le programme à la Découverte du Conseil de recherche en sciences naturelles et en génie (CRSNG) accordé au professeur Hank Margolis. Un soutien complémentaire a également été assuré par les projets du MFFP en production de plants accordés au Dr. Mohammed Lamhamedi.

2.8 Références

- Aitken, S. N., Yeaman, S., Holliday, J. A., Wang, T., et Curtis-McLane, S. 2008. Adaptation, migration or extirpation: climate change outcomes for tree populations. *Evolutional Applications* **1**: 95-111.
- Aitken, S. N., et Whitlock, M. C. 2013. Assisted gene flow to facilitate local adaptation to climate change. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* **44**: 367-388.
- Alberto, F. J., Aitken, S. N., Alia, R., Gonzalez-Marinez, S. C., Hänninen, H., Kremer, A., Lefèvre, F., Lenormand, T., Yeaman, S., Whetten, R., et Savolainen O. 2013. Potential for evolutionary responses to climate change-evidence from tree populations. *Global change Biology* **19**: 1645-1661.
- Andalo, C., Beaulieu, J., et Rainville, A. 2005. The impact of climate change on growth of local white spruce populations in Québec, Canada. *Forest Ecology Management* **205**:169-182.
- Aubin, I., Garbe, C. M., Colombo, S., Drever, C. R., McKenny, D. W., Messier, C., Pedlar, J., Saner, M. A., Venier, L., Wellstead, A. M., Winder, R., Witter, E., et Ste-Marie, C. 2011. Why we disagree about assisted migration: Ethical implications of a key debate regarding the future of Canada's forests. *Forestry Chronicle* **87**: 755-765.
- Awada, T., et Redmann, R. E. 2000. Acclimation to light in planted and naturally-regenerated populations of white spruce seedlings. *Canadian Journal of Botany* **78**: 1495-1504.
- Beaulieu, J., Daoust, G., Deshaies, A., Lamhamedi, M. S., Rainville, A., et Tourigny, M. 2009. Amélioration génétique des arbres, gestion des vergers à graines et de semences, et production de plants forestiers. *Dans Manuel de foresterie, 2e édition. Ordre des Ingénieurs Forestiers du Québec. Québec, Ouvrage collectif, Éditions Multimondes. p. 1095-1146.*
- Beaulieu, J., Doerksen, T., Boyle, B., Clément, S., Deslauriers, M., Beauseigle, S., Blais, S., Poulin, P-L., Lenz, P., Caron, S., Ringault, P., Bicho, P., Bousquet, J., et MacKay, J. 2011. Association genetics of wood physical traits in the conifer white spruce and relationships with gene expression. *Genetics* **188**: 197-214.
- Beaulieu, J., Doerksen, T., Clément, S., MacKay, J., et Bousquet, J. 2014a. Accuracy of genomic selection models in a large population of open-pollinated families in white spruce. *Heredity* **113**: 343-352.
- Beaulieu, J., Doerksen, T., MacKay, J., Rainville, A., et Bousquet, J. 2014b. Genomic selection accuracies within and between environments and small breeding groups in white spruce. *BMC Genomics* **15**: 1048.
- Beaulieu, J., et Rainville, A. 2005. Adaptation to climate change: Genetic variation is both a short- and long-term solution. *Forestry Chronicle* **81**: 704-709.
- Beaulieu, J. Perron, M., et Bousquet, J. 2004. Multivariate pattern of adaptive genetic variation and seed source transfer in *Picea mariana*. *Canadian Journal of Forest Research* **34**: 531-545.
- Bigras, F. J., et Bertrand, A. 2006. Responses of *Picea mariana* to elevated CO₂ concentration during growth, cold hardening and dehardening: phenology, cold tolerance, photosynthesis and growth. *Tree Physiology* **26**: 875-888.
- Bureau du forestier en chef. 2013. Manuel de détermination des possibilités forestières 2013-2018. Gouvernement du Québec, Roberval, Québec, 247 p.

Carles, S., Lamhamedi, M. S., Beaulieu, J., Stowe, D. C., et Margolis, H. A. 2011. Differences in growth and mineral nutrition of seedlings produced from ten white spruce seed orchards. *New Forests* **42**: 195-214.

Carter, K. K. 1996. Provenance tests as indicators of growth responses to climate change in 10 north temperate tree species. *Canadian Journal of Forest Research* **26**: 1059-1066.

Colombo, S. J. 1998. Climatic warming and its effect on bud burst and risk of frost damage to white spruce in Canada. *Forestry Chronicle* **74**: 567-577.

Cornelius, J. 1994. Heritabilities and additive genetic coefficients of variation in forest. *Canadian Journal of Forest Research* **24**: 372-379.

Dhont, C., Sylvestre, P., Gros-Louis, M., et Isabel, N. 2010. Guide-terrain pour l'identification des stades de débournement et de formation du bourgeon apical chez l'épinette blanche. *Ressources naturelles Canada*. 18 p.

FAO. 2010. *Planted Forests in Sustainable Forest Management, a statement of principles*. Consulté en ligne : <http://www.fao.org/docrep/012/al248e/al248e00.pdf>, le 27 septembre 2014.

Gagnon, J., et Lamhamedi, M. S. 2011. Les concentrations foliaires en azote recommandées au Québec pour les essences résineuses produites en récipients sont-elles adéquates? *Dans* Colas, F.; Lamhamedi, M.S. (éds), 2011. *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), 140 p. pp. 47-51.

GIEC. 2007. Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. GIEC, Genève, Suisse. 103 p.

GIEC. 2013. Résumé à l'intention des décideurs, Changements climatiques : Les éléments scientifiques. Contribution du Groupe de travail I au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York, États-Unis d'Amérique. 36 p.

Girard, D., Gagnon, J., et Langlois, C. G. 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, Sainte-Foy, Québec. Note de Recherche Forestière. 111 p.

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*) cuttings. *Canadian Journal of Forest Research* **41**: 1308-1318.

Hamman, A., et Aitken, S. N. 2013. Conservation planning under climate change : accounting for adaptive potential and migration capacity in species distribution models. *Diversity and Distributions* **19**: 268-280.

Hamman, A. et Wang, T. L. 2006. Potential effects of climate change on ecosystem and species distribution in British Columbia. *Ecology* **87**: 2773-2786.

Hewitt, N., Klenk, N., Smith, A. L., Bazely, D. R., Yan, N., Wood, S., MacLellan, J. I., Lipsig-Mumme, C., et Henriques, I. 2011. Taking stock of the assisted migration debate. *Biological Conservation* **144**: 2560-2572.

Iverson, L. R., Schwartz, M. W., et Prasad A. M. 2004. How fast and far might tree species migrate in the eastern United States due to climate change? *Global Ecology and Biogeography* **13**: 209-219.

Jaramillo-Correa, J. P., Beaulieu, J., et Bousquet, J. 2001. Contrasting evolutionary forces driving population structure at expressed sequence tag polymorphisms, allozymes and quantitative traits in white spruce. *Molecular Ecology* **10**: 2729-2740.

Lamhamedi, M. S., Bernier, P. Y., Hébert, C., Jobidon, R. 1998. Physiological and growth responses of three types of containerized *Picea mariana* seedlings outplanted with and without vegetation control. *Forest Ecology Management* **110**: 13-23.

Lamhamedi, M. S., Bernier, P. Y., Hébert, C. 1997. Effect of shoot size on the gas exchange and growth of containerized *Picea mariana* seedlings under different watering regimes. *New Forests*. **13**: 209-223.

Lamhamedi, M. S., Chamberland, H., Bernier, P. Y., et Tremblay, F. M. 2000. Clonal variation in morphology, growth, physiology, anatomy and ultrastructure of container-grown white spruce somatic plants. *Tree Physiology* **20**: 869–880.

Lamhamedi, M. S., et 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 Forestière* No 41. 2 p.

Lamhamedi, M. S., Labbé, L., Margolis, H. A., Stowe, D. C., Blais, L., et Renaud, M. 2006. Spatial variability of substrate water content and growth of white spruce seedlings. *Soil Science Society of America Journal* **70**: 108–120.

Lamhamedi, M. S., Lambany, G., Margolis, H. A., Renaud, M., Veilleux, L., et Bernier, P. Y. 2001. Growth, physiology, and leachate losses in *Picea glauca* seedlings (1+0) grown in air-slit containers under different irrigation regimes. *Canadian Journal of Forest Research* **31**: 1968–1980.

Landis, T. D. 1989. Mineral nutrients and fertilization. *Dans* Landis, T. D., Tinus, R. W., McDonald, S. E., et Barnett, J. P. 1989. *The Container Tree Nursery Manual, Volume 4. Agriculture Handbook, 674*, Washington, Department of Agriculture, Forest Service. p. 1-67.

Lesser, M. R., et Parker W. H. 2004. Genetic variation in *Picea glauca* for growth and phenological traits from provenance tests in Ontario. *Silvae Genetica* **53**: 141-148.

Li, P., Beaulieu, J., et Bousquet, J. 1997. Genetic structure and patterns of genetic variation among populations in eastern white spruce (*Picea glauca*). *Canadian Journal of Forest Research* **27**: 189-198

Li, P., Beaulieu, J., Corriveau, A., et Bousquet, J. 1993. Genetic variation in juvenile growth and phenology in a white spruce provenance-progeny test. *Silvae Genetica*. **42**: 152-60.

Loo, J., Fady, B., Dawson, I., Vinceti, B., et Baldinelli, G. 2015. Forest genetic resources and climate change. *Dans* FAO. 2015. *Coping with climate change – the roles of genetic resources for food and agriculture*. Rome.

Marris, E. 2009. Planting the forest of the future. *Nature* **459**: 906-908.

Morgenstern, E. K., et Copis, P. 1999. Les meilleures provenances d'épinette blanche en Ontario. *Dans* Rapport d'information ST-X-16. Forêt expérimentale de Petawawa. Service Canadien des Forêts. 36 p.

Mueller, J. M., et Hellmann, J. J. 2008. An assessment of invasion risk from assisted migration. *Conservation Biology* **22**: 562–567.

Nienstaedt, H., et Zasada, J. C. 1990. *Picea glauca* (Moench) Voss White spruce. In *Silvics of North America* vol. 1. Conifers - Agriculture Handbook no. 654 Eds. R.M. Burns and B.H. Honkala. États-Unis. Department of Agriculture. pp. 204-226.

O'Neill, G. A., Ukrainetz, N., Carlson, M., Cartwright, C., Jaquish, B., King, J., Krakowski, J., Russell, J. H., Stoehr, M., Xie, C-Y., et Yanchuk, A. 2008. Assisted migration to address climate change in British Columbia. Recommendations for interim seed transfer standards. BC Min. For. Range, Res. Br., Victoria, BC. Tech. Rep. 048. 28 p.

O'Neill, G. A., Stoehr, M., et Jaquish, B. 2014. Quantifying safe seed transfer distance and impacts of tree breeding on adaptation. *Forest Ecology and Management* **328**: 122-130.

Pedlar, J., D. W. McKenney, J., Aubin, I., Beardmore, T., Beaulieu, J., Iverson, L., O'Neill, G. A., Winder, R., et Ste-Marie, C. 2012. Placing forestry in the assisted migration debate. *Bioscience* **69**: 835-842.

Pedlar, J., McKenney, D. W., Beaulieu, J., O'Neill, G. A., McLachlan, J. S., et Colombo, S. J. 2011. The implementation of assisted migration in Canadian forests. *Forestry Chronicle* **87**: 766–777.

Rainville, A., Desponts, M., Beaudoin, R., Prinnet, P., Mottet, M. J., et Perron, M. 2003. Note de recherche forestière n° 127, l'amélioration des arbres au Québec: un outil de performance industrielle et environnementale. Direction de la recherche forestière, Ministère des Ressources naturelles, de la Faune et des Parcs du Québec. 8 p.

Rainville, A., Beaulieu, J., Langevin, L., Logan, T., et Lambert, M-C. 2014. Prédire l'effet des changements climatiques sur le volume marchand des principales espèces résineuses plantées au Québec, grâce à la génétique forestière. Mémoire de recherche forestière No 174. Gouvernement du Québec. Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs. Direction de la recherche forestière. 58 p.

Régnière, J., et Saint-Amant, R. 2008. *BioSim 9 : Manuel de l'utilisateur*. Ressources Naturelles Canada, Service Canadien des Forêts, Centre de Foresterie des Laurentides, Québec, QC. 82 p

Rossi, S., et Bousquet, J. 2014. The bud break process and its variation among local populations of boreal black spruce. *Frontiers in Plant Science* **5**: 574. DOI: 10.3389/fpls.2014.00574.

Rweyongeza, D. M., Yeh, F. C., et Dhir, N. K. 2010. Genetic parameters for bud flushing and growth characteristics of white spruce seedlings. *Silvae Genetica* **59**: 151-158.

Saenz-Romero, C., Beaulieu, J., et Rehfeldt, G. E. 2011. Altitudinal genetic variation among *Pinus patula* populations from Oaxaca, Mexico, in growth chambers simulating global warming temperatures. *Agrociencia* **45**: 399-411.

Saenz-Romero, C., Rehfeldt, G. E., Soto-Correa, J. C., Aguilar-Aguilar, S., Zamarripa-Morales, V., et Lopez-Upton, J. 2012. Altitudinal genetic variation among *Pinus pseudostrobus* populations from Michoacan, Mexico. Two locations shadehouse test results. *Revista Fitotecnia Mexicana* **35**: 111-120.

Saucier, J.-P., Gosselin, J., Morneau, C., et Grondin, P. 2010. Utilisation de la classification de la végétation dans l'aménagement forestier au Québec. *Revue Forestière Française* LXII-3-4: 428-438.

- Ste-Marie, C., Nelson, E. A., Dabros, A., et Bonneau, M. 2011. Assisted migration: Introduction to a multifaceted concept. *Forestry Chronicle* **86**: 724-730.
- Sullivan, P. F., et Sveinbjornsson, B. 2011. Environmental Controls on Needle Gas Exchange and Growth of White Spruce (*Picea glauca*) on a Riverside Terrace near the Arctic Treeline. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research* **43**: 279–288.
- Templeton, C. W. G., Odlum, K. D., et Colombo, S. J. 1993. How to identify bud initiation and count needle primordia in first-year spruce seedlings. *Forestry Chronicle* **69**: 431–437.
- Thomson, A. M., et Parker, W. H. 2008. Boreal forest provenance tests used to predict optimal growth and response to climate change. 1. Jack pine. *Canadian Journal of Forest Research* **38**: 157-170.
- Timmer, V. R., Armstrong, G., et Miller, B. D. 1991. Steady-state nutrient preconditioning and early outplanting performance of containerized blackspruce seedlings. *Canadian Journal of Forest Research* **21**: 585-594.
- Tousignant, D., Lamhamedi, M. S., Colas, F., et Rioux, M. 2008. Seed size and family effects on vegetative propagation rates of stock plants for the mass cutting propagation of white spruce (*Picea glauca*) in Québec. Abstract of the conference presented at the Tree Seed Working Group. *Dans IUFRO – CTIA 2008 Joint Conference - Adaptation, Breeding and Conservation in the Era of Forest Tree Genomics and Environmental Change*, August 25-28, 2008. Québec, Canada. p. 53.
- Veilleux, P. 2013. Guide terrain-inventaire de qualification des plants résineux cultivés en récipients. *Édité par Direction générale des pépinières et des stations piscicoles. Ministère de Ressources naturelles et de la Faune, Québec.* 141 p.
- Vitt, P., Havens, K., Kramer, A. T., Sollenberger, D., et Yates, E. 2010. Assisted migration of plants: Changes in latitudes, changes in attitudes. *Biology Conservation* **143**: 18–27.
- Wahid, N., Lamhamedi, M. S., Beaulieu, J., Margolis, H. A., et Deblois, J. 2012a. Genetic parameters and clonal variation in growth and nutritional traits in containerized white spruce somatic seedlings. *Acta Botanica Gallica* **159**: 373–384.
- Wahid, N., Lamhamedi, M. S., Rainville, A., Beaulieu, J., et Margolis, H. A. 2013. Genetic Control and Nursery-Plantation Genotypic Correlations for Growth Characteristics of White Spruce Somatic Clones, *Journal of Sustainable Forestry* **32**: 576-593.
- Wahid N., Rainville, A., Lamhamedi, M. S., Beaulieu, J., Margolis, H. A., et Deblois, J. 2012b. Genetic parameters and performance stability of white spruce somatic seedlings in clonal tests. *Forest Ecology and Management* **270**: 45–53.
- Westfall, P. H., Tobias, R. D., Rom, D., Wolfinger, R. D., et Hochberg, Y. 1999. Multiple comparisons and multiple tests using the SAS system. Second edition. Cary, NC. SAS Institute Inc. 644 p.
- Williams, M. I., et Dumroese, R. K. 2013a. Preparing for climate change: Forestry and assisted migration. *Journal of Forestry* **111**: 287–297.
- Williams, M. I., et Dumroese R. K. 2013b. Growing assisted migration: synthesis of a climate change adaptation strategy. *Dans Haase D L, Pinto J R, Wilkinson KM, technical coordinators.* 2012. National Proceedings: Forest and Conservation Nursery Associations. Fort Collins. USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station. pp. 90-96.

Wright, J. W. 1976. An Introduction to Forest Genetics. Academic Press, Inc., New York 463 p.

Chapitre 3 - Conclusion générale

3.1. Sommaire des résultats

L'augmentation de la température moyenne à la surface du globe devrait dépasser 2°C d'ici la fin du 21^{ème} siècle selon le scénario RCP 6.0 du GIEC (GIEC 2013). Au Québec, les modèles prévoient une augmentation de la température moyenne de 2 à 3,5°C en été en plus d'une diminution des précipitations entraînant de sévères épisodes de stress hydrique, une couverture nivale tardive à l'automne et la fonte hâtive au printemps pour les régions de la forêt boréale (Bourque et Simonet 2008, Logan et al. 2011). Ces changements climatiques provoqueront le déplacement des niches écologiques vers le nord à une vitesse supérieure à celle de la capacité naturelle de déplacement des essences forestières (Iverson et al. 2004, Hamman et Wang 2006, Aitken et al. 2008).

La migration assistée, c'est-à-dire le déplacement géographique des espèces ou des populations, figure parmi les stratégies d'adaptation proposées pour atténuer les conséquences négatives des changements climatiques sur la productivité des forêts. Cette stratégie vise à assortir les sources de semences en fonction de leur adaptation optimale aux climats présents et futurs par le recours aux plantations.

Dans plusieurs provinces du Canada, les modalités de déplacement des sources de semences sont présentement révisées et dans certains cas, ont été modifiées en vue de s'adapter aux changements climatiques anticipés (Pedlar et al. 2011). Cependant, les différentes stratégies de déplacement des semences sont basées principalement sur des modèles empiriques (Beaulieu et al. 2004, Thomson et Parker 2008). Bien que les modèles permettent de guider le choix des sources les mieux adaptées au climat futur, la caractérisation morpho-physiologique en pépinière et dans différents sites de plantation, qui simule trois situations de migration assistée, permet l'acquisition de connaissances sur la réaction de diverses sources vis-à-vis différents stress biotiques et abiotiques.

Les objectifs de cette étude étaient de i) caractériser les variables morpho-physiologiques de différentes sources génétiques de l'épinette blanche provenant de huit vergers à graines au Québec durant deux saisons de croissance en pépinière (1+0 et 2+0), ii) évaluer la cinétique du débourrement (3+0) en serre; et iii) comparer la performance des sources génétiques pendant la phase d'installation en site de plantation simulant ainsi une migration assistée sur trois sites de plantation répartis dans trois domaines bioclimatiques du Québec. Pour ce faire, la hauteur, le diamètre, les masses sèches des parties aériennes et des racines, les concentrations des tissus en N, P, K, Ca, Mg, les échanges gazeux et le nombre de primordia ont été mesurés au cours des deux premières années de croissance en pépinière, la cinétique du débourrement a été évaluée

en serre au début de la troisième année de croissance des plants, tandis que la hauteur et le taux de survie ont été évalués à la fin de la première année de croissance en sites de plantation.

Les réponses morpho-physiologiques des sources génétiques observées à la fin de la deuxième saison de croissance en pépinière ont permis de regrouper les huit vergers en cinq groupes distincts selon trois variables morpho-physiologiques (hauteur, masses sèches des racines et contenu en azote des parties aériennes). La modélisation des courbes de croissance en hauteur de ces groupes a permis de distinguer trois groupes de vergers caractérisés par une croissance en hauteur plus élevée (d'au moins 6 %) pour les vergers de deuxième génération et les vergers méridionaux de première génération. Le modèle de régression multiple à trois variables a montré que la hauteur finale des plants 2+0 provenant des vergers de 1^{ère} génération était corrélée aux conditions climatiques d'origine des vergers (température moyenne de la saison de croissance, température moyenne du mois de juillet, longueur de la saison de croissance) laisse présager que ces variables peuvent fournir des informations pertinentes lors du choix des sites à privilégier en matière de migration assistée. Lors de la phase d'établissement, le verger et le site de plantation ont influencé significativement la croissance en hauteur des plants issus des différents vergers, et le rang des sources génétiques fut conservé, peu importe le site de plantation. Les résultats ont aussi démontré un très haut taux de survie des plants (supérieur à 98%) sur chacun des trois sites pour tous les vergers confondus (98,2% pour Watford, 99,6% pour Asselin et 99,2% Deville). De plus, aucun effet apparent de gel hâtif ou tardif n'a été observé pendant les différentes saisons de croissance aussi bien en pépinière que dans les trois sites de plantation.

Les résultats de cette étude, obtenus sous les mêmes conditions environnementales et régies de culture en pépinière ainsi qu'en sites de plantation, indiquent que les plants d'épinette blanche, en bas âge, issus de vergers à graines provenant des différentes régions du Québec ont des réponses morpho-physiologiques différentes et que ces réponses sont liées aux conditions climatiques d'origine des vergers à graines. De plus, pendant la phase d'établissement initiale sur les trois sites de plantation, le rang des sources génétiques fut conservé peu importe le site indiquant l'absence d'interaction source X site et donc, la stabilité des performances de chaque source d'un site à l'autre.

3.2. Implications pour la migration assistée dans le cadre des changements climatiques

Les résultats de la caractérisation morpho-physiologique en pépinière et en site de plantation des plants d'épinette blanche issus des sources génétiques les plus utilisées dans le programme de reboisement au Québec ont des implications pratiques pour la migration assistée. Par l'expression du plein potentiel génétique des différentes sources de semences observé dans le milieu relativement uniforme de la pépinière, cette

étude a permis d'obtenir rapidement des résultats sur le comportement des sources génétiques à un jeune âge. Effectivement, dû aux corrélations observées entre la hauteur mesurée au jeune âge et en site de plantation de plusieurs clones somatiques (Wahid et al. 2012, Wahid et al 2013) et des provenances d'épinette blanche (Li et al. 1993) à l'âge de quatre et de huit ans, une sélection hâtive des meilleures sources génétiques en pépinière serait possible. Ceci permet de réduire le temps et le coût pour la sélection du matériel génétique dédié au programme de migration assistée. À l'aide des trois variables climatiques qui sont ressorties comme étant les plus significatives dans la présente étude (température moyenne de la saison de croissance, température du mois de juillet et longueur de la saison de croissance), nous avons obtenu une source d'informations pertinentes pour optimiser la mise en application du choix des sources génétiques dans le cadre des projets de migration assistée par la correspondance entre le climat d'origine des sources génétiques et celui des sites de plantation. Les résultats de la présente étude, déterminés au jeune âge, en combinaison avec une évaluation à moyen et à long terme sur les différents sites de reboisement, contribueront à préciser les limites extrêmes de leur déplacement selon les domaines bioclimatiques. À partir de ces résultats, l'amplitude écologique d'utilisation de chaque verger à graines aidera à générer des cartes de déplacement et d'aptitude des sites au reboisement spécifiques à chaque source génétique. Même si le suivi à long-terme de la performance sur les sites de plantation demeure essentiel, l'évaluation combinée de la performance des plants dans la pépinière et en sites de plantation constitue un premier pas très important.

3.3. Limites de l'étude

L'expérience visait à évaluer si les sources génétiques de l'épinette blanche avaient des réponses morpho-physiologiques différentes et pour ce faire, la caractérisation en pépinière permet d'obtenir des résultats rapidement sur le comportement des sources génétiques à un jeune âge pour une région écologique donnée en bénéficiant d'un environnement qui favorise l'expression du plein potentiel génétique des différentes sources de semences. L'expression génétique d'un caractère est affectée par le génotype, l'environnement et par l'interaction génotype*environnement. Donc, les réponses morpho-physiologiques pourraient être différentes selon l'emplacement de la pépinière. Malgré que l'environnement de la pépinière favorise l'expression génétique tout en permettant de distinguer les différences entre les sources de semences, les réponses morpho-physiologiques peuvent être affectées par les conditions climatiques liées à la localisation de la pépinière. Par exemple, le déplacement des sources génétiques des plus basses latitudes vers le nord, où les températures sont plus froides, pourrait favoriser la croissance de ces sources génétiques et donc, l'emplacement de la pépinière pourrait être plus optimal à la croissance de certaines sources. La présente étude a été réalisée à la pépinière de Saint-Modeste (47°50'N, 69°23'O) situé dans le domaine bioclimatique de la sapinière à bouleau jaune de l'est. Ainsi, lors de cette étude, les sources génétiques de l'ouest pourraient avoir été affectées négativement par la localisation de la pépinière.

L'évaluation du débourrement au début de la troisième année de croissance (3+0) a été réalisée en serre sous des conditions uniformes permettant, encore une fois, de favoriser l'expression génétique des sources de semences. Cependant, les conditions observées dans la serre ne sont pas représentatives des conditions naturelles auxquelles les plants doivent faire face lors du débourrement. Dans le cadre de cette étude, le débourrement s'est déroulé sous une photopériode et des températures optimales et constantes, ce qui ne reflète pas les conditions réelles du débourrement en milieu naturel.

3.4. Recommandations pour les recherches futures

La croissance des sources de semences dans différentes pépinières situées près des sites de plantation et reflétant différentes conditions environnementales, permettrait de simuler une sorte de migration assistée. L'évaluation des réponses morpho-physiologiques telles que la croissance, le débourrement, la formation des bourgeons ainsi que la tolérance au gel hâtif et tardif permettrait d'obtenir des résultats rapides, en bas âge, de différentes sources génétiques et faciliter la sélection de celles les mieux adaptées selon le climat.

La sélection du matériel génétique hautement productif et adapté aux changements climatiques nécessite une caractérisation en pépinière suivie d'une évaluation à long terme de la performance des différentes sources génétiques en milieu naturel afin d'évaluer les corrélations entre les caractères observés chez les plants en pépinière et ceux en milieu naturel. Le suivi des réponses morpho-physiologiques en site de plantation à l'âge de 4 ans et de 8 ans sera donc nécessaire pour permettre la sélection des meilleures sources génétiques dans un programme de migration assistée.

La corrélation entre les réponses morpho-physiologiques et le climat d'origine devrait être évaluée lors des transferts des sources de semences en sites de plantation, ce qui permettra d'évaluer la plasticité de ces réponses dans différents environnements. Aussi, la corrélation entre la hauteur en bas âge et les trois variables climatiques d'origine étant les plus significatives dans cette étude (température moyenne de la saison de croissance, température du mois de juillet et longueur de la saison de croissance) devra être confirmée à moyen et à long terme en sites de plantation.

Il est recommandé de procéder à l'établissement de plantations à l'aide de provenances ou de sources génétiques adaptées aux climats futurs anticipés afin d'accélérer l'adaptation et la durabilité des forêts (Johnston 2009). Des modèles de transfert ont été conçus afin de déterminer la croissance de différentes sources génétiques pour certaines de nos essences commerciales en fonction des changements climatiques (Rainville et al. 2014). Cependant, très peu de projets *in situ* ont été réalisés sur la migration assistée de nos essences commerciales. Notre étude a mis l'accent sur l'épinette blanche car il s'agit d'une essence importante du programme de reboisement, hautement productive et parce que son programme d'amélioration

génétique est plus avancé au Québec. Cependant, cette même approche *in situ* devrait être développée pour les autres essences commerciales utilisées dans le programme de reboisement telles que l'épinette noire et le pin gris.

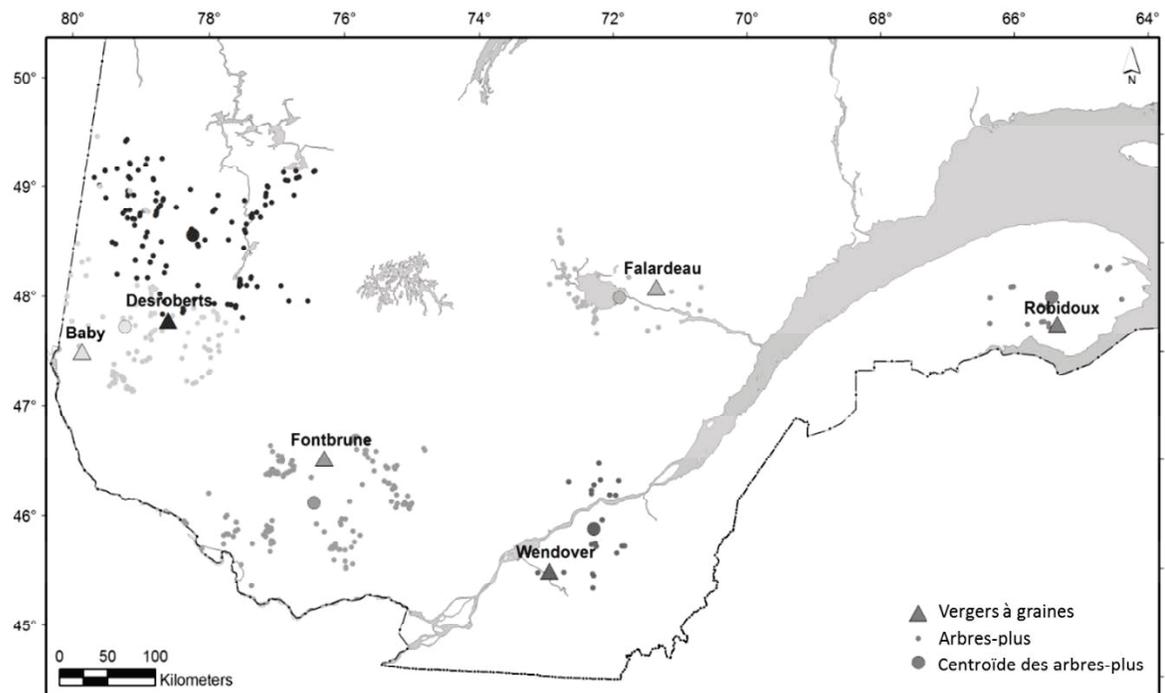
À plus long terme, l'effet des variations du climat (température, précipitations, durée de la saison de croissance, etc.) et de l'évolution des différents stress environnementaux (gels, sécheresses, épidémies d'insectes et maladies) sur la croissance et la productivité des peuplements issus des sources génétiques devront être évalués sur les sites de reboisement. Dans un objectif de production de matière ligneuse, les plantations devront être hautement productives et adaptées aux variations du climat futur. Dans l'objectif de maintenir la santé des écosystèmes, d'autres travaux pourraient porter sur l'évaluation de la production du pollen et des semences et l'abondance de la régénération naturelle issue de ces plantations.

Finalement, la caractérisation des gènes responsables de l'adaptation au climat futur des sources de semences d'épinette blanche qui seront reconnus comme étant les plus propices à être sélectionnées dans un programme de migration assistée, devrait être réalisée. Également, l'intégration de la sélection génomique permettrait l'évaluation et la sélection rapide des meilleurs génotypes, ce qui permettrait d'accélérer l'utilisation des essences forestières commerciales adaptées aux changements climatiques anticipés.

3.5 Références

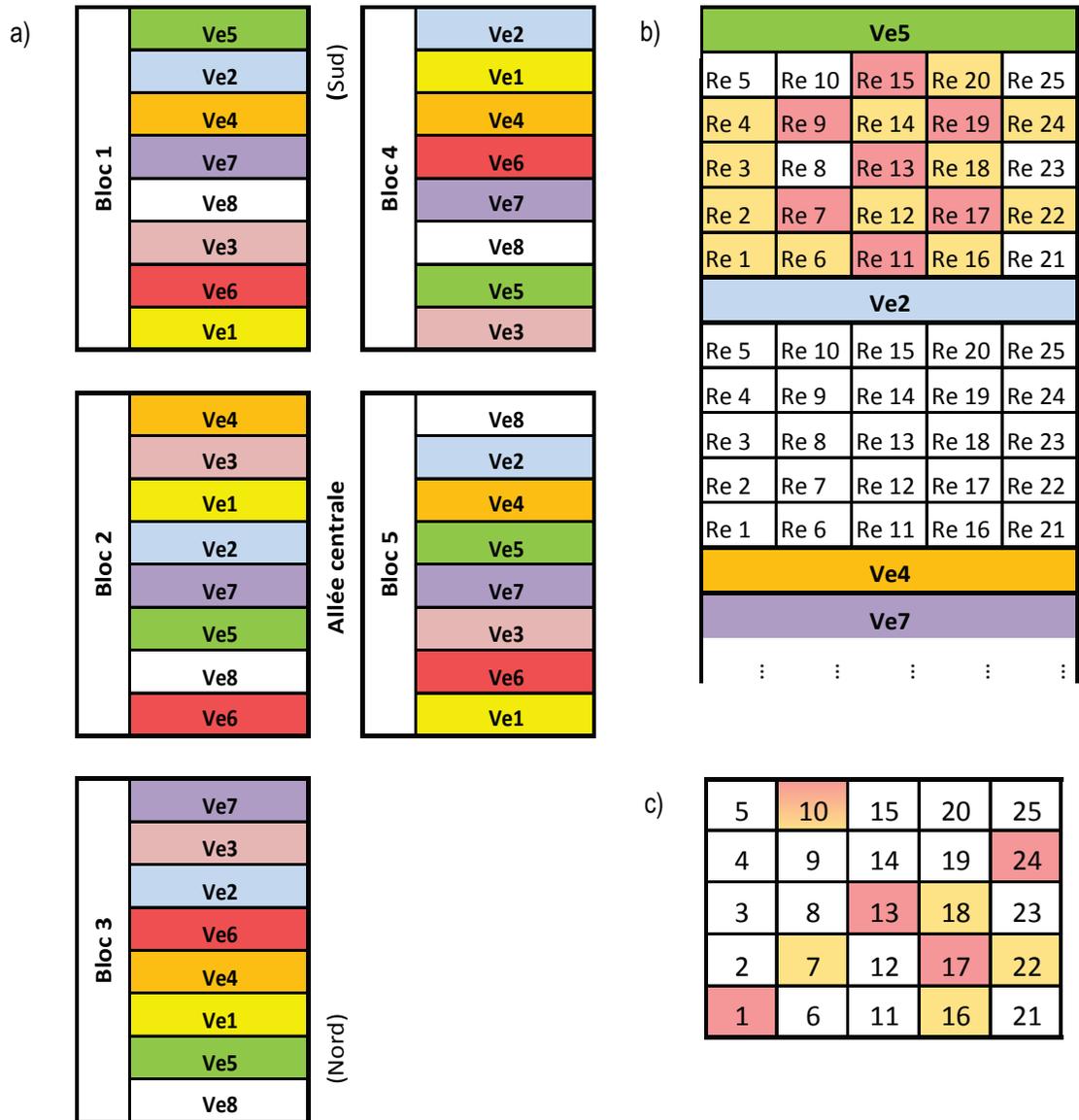
- Aitken, S. N., Yeaman, S., Holliday, J. A., Wang, T., et Curtis-McLane, S. 2008. Adaptation, migration or extirpation: climate change outcomes for tree populations. *Evolutional Applications* **1**: 95-111.
- Beaulieu, J. Perron, M., et Bousquet, J. 2004. Multivariate pattern of adaptative genetic variation and seed source transfer in *Picea mariana*. *Canadian Journal of Forest Research* **34**: 531-545.
- Bourque, A. et Simonet, G. 2008. Québec. *Dans* From impacts to adaptation : Canada in a changing climate 2007. Édité par D.S. Lemmen, F.J. Warren, J. Lacroix et E. Bush. Gouvernement du Canada. Ottawa. ON. p. 171-226.
- GIEC, 2013. Résumé à l'intention des décideurs, Changements climatiques : Les éléments scientifiques. Contribution du Groupe de travail I au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York, États-Unis d'Amérique. 36 p.
- Hamman, A. et Wang, T. L. 2006. Potential effects of climate change on ecosystem and species distribution in British Columbia. *Ecology* **87**: 2773–2786.
- Iverson, L. R., Schwartz, M. W., et Prasad, A. M. 2004. How fast and far might tree species migrate in the eastern United States due to climate change? *Global Ecology and Biogeography* **13**: 209-219.
- Johnston, M. 2009. Vulnérabilité des arbres du Canada aux changements climatiques et propositions de mesures visant leur adaptation : un aperçu destiné aux décideurs et aux intervenants du monde forestier. Conseil canadien des ministres des forêts. 47 p.
- Li, P., Beaulieu, J., Corriveau, A., et Bousquet, J. 1993. Genetic variation in juvenile growth and phenology in a white spruce provenance-progeny test. *Silva Genetica*. **42**: 152-60.
- Logan, T., Charron, I., Chaumont, D., et Houle, D. 2011. Atlas de scénarios climatiques pour la forêt québécoise. Ouranos et MRNF. 55p.
- Pedlar, J., McKenney, D. W., Beaulieu, J., O'Neill, G. A., McLachlan, J. S., et Colombo, S. J. 2011. The implementation of assisted migration in Canadian forests. *Forestry Chronicle* **87**: 766–777.
- Rainville, A., Beaulieu, J., Langevin, L., Logan, T., et Lambert, M-C. 2014. Prédire l'effet des changements climatiques sur le volume marchand des principales espèces résineuses plantées au Québec, grâce à la génétique forestière. Mémoire de recherche forestière No 174. Gouvernement du Québec. Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs. Direction de la recherche forestière. 58 p.
- Thomson, A. M., et Parker, W. H. 2008. Boreal forest provenance tests used to predict optimal growth and response to climate change. 1. Jack pine. *Canadian Journal of Forest Research* **38**: 157-170.
- Wahid, N., Lamhamedi, M. S., Rainville, A., Beaulieu, J., et Margolis, H. A. 2013. Genetic Control and Nursery-Plantation Genotypic Correlations for Growth Characteristics of White Spruce Somatic Clones, *Journal of Sustainable Forestry* **32**: 576-593.
- Wahid N., Rainville, A., Lamhamedi, M. S., Beaulieu, J., Margolis, H. A., et Deblois, J. 2012. Genetic parameters and performance stability of white spruce somaticseedlings in clonal tests. *Forest Ecology and Management* **270**: 45–53.

Annexe 1



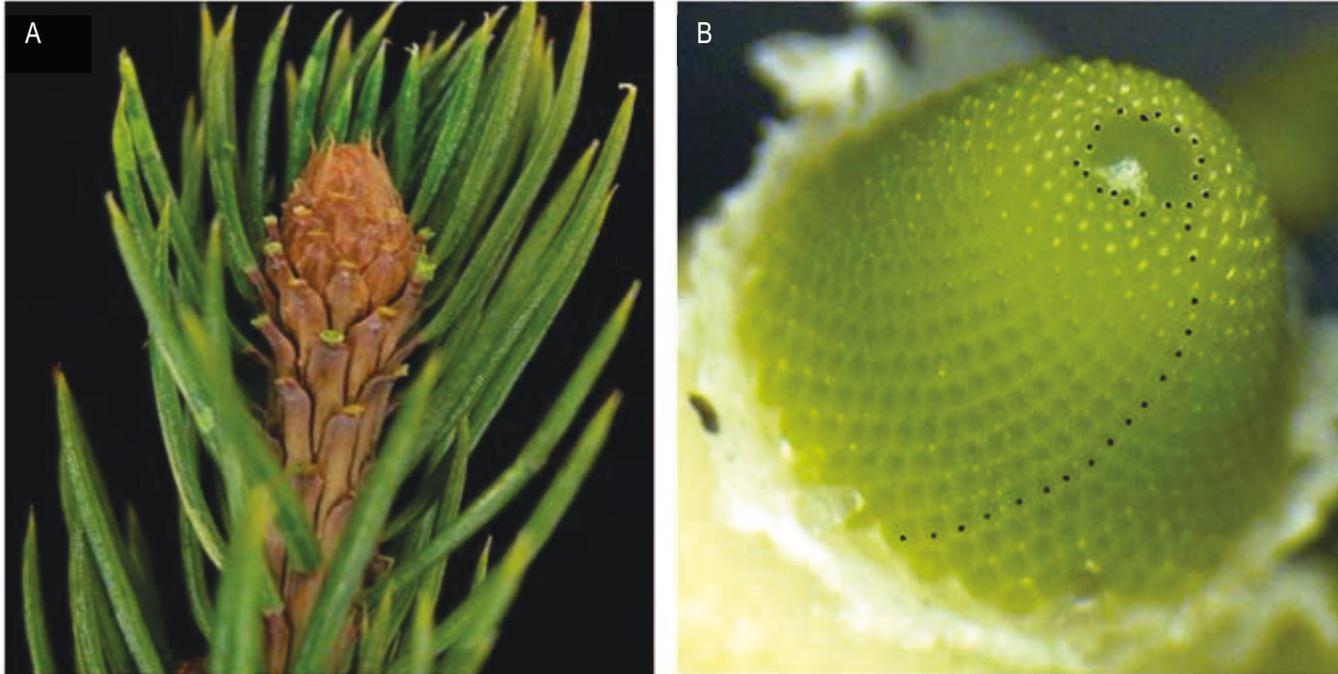
Distribution des vergers à graines de première génération d'épinette blanche à l'étude (représentés par les triangles). Localisation (petits points) et centroïde (ronds) des arbres arbres-plus semenciers ayant été sélectionnés pour l'établissement de chaque verger.

Annexe 2



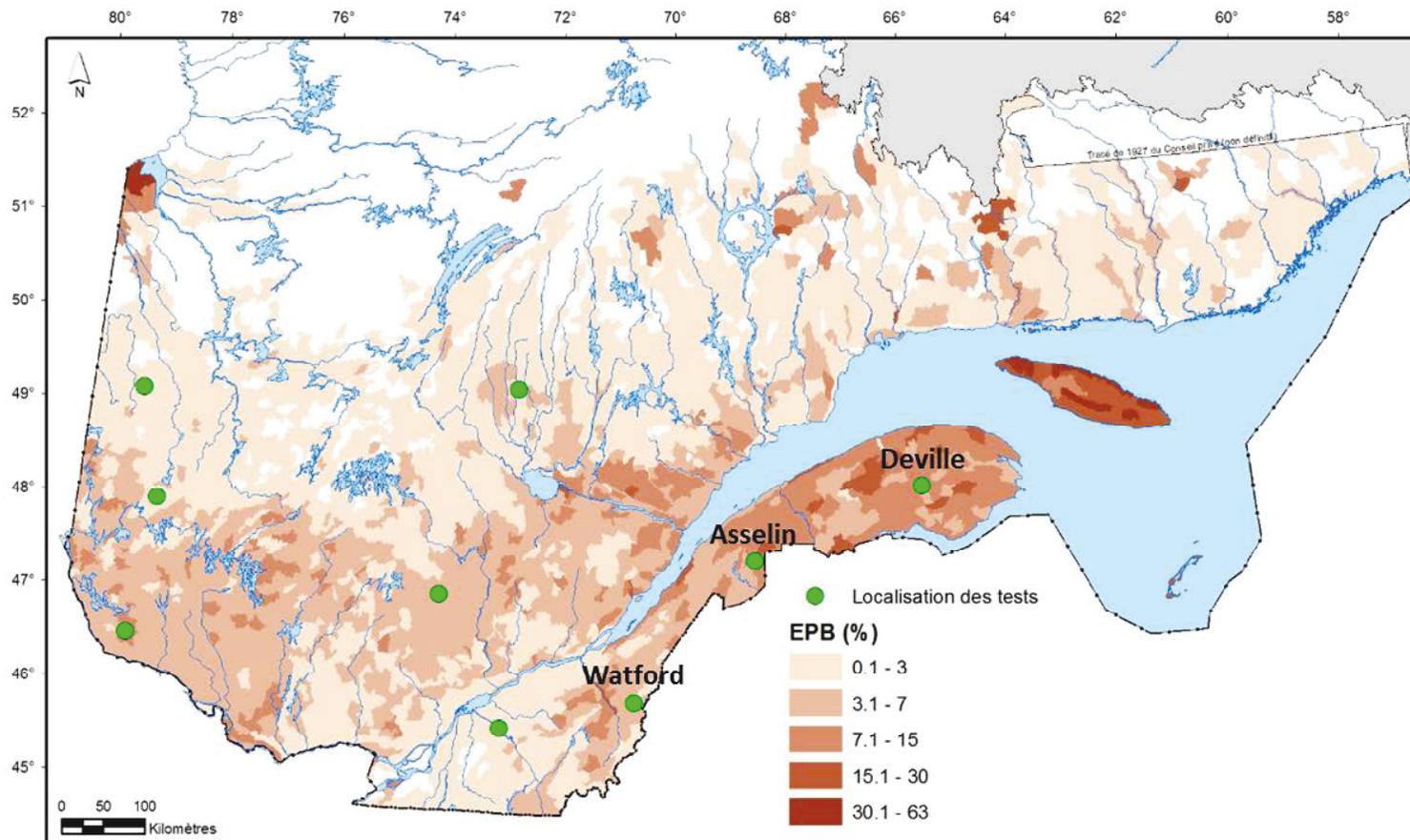
a) Plan du dispositif en pépinière. b) Exemple de la répartition des récipients par verger à graines d'épinette blanche. Les récipients en rouge sont les 7 récipients échantillonnés à la première saison de croissance (1+0) en pépinière. Les récipients en jaune sont les 12 récipients échantillonnés à la deuxième saison de croissance (2+0) en pépinière. c) Numérotation des plants selon les cavités du récipient 25-310. Les cavités de couleur, représentent les 5 plants/verger/bloc récoltés à des intervalles de deux semaines au cours de la première saison de croissance (1+0) (cavités en rouge) et au cours de la deuxième saison de croissance (2+0) (cavités en jaune) en pépinière.

Annexe 3



A) Bourgeon terminal d'un plant d'épinette blanche à la fin de la deuxième saison de croissance en pépinière (2+0) B) Illustration du nombre de rangées courtes totales et le nombre de primordia contenus dans une rangée courte

Annexe 4



Localisation des 3 sites forestiers de plantation parmi l'aire de distribution de l'épinette blanche, telle que représentée par l'abondance relative de l'espèce.

Annexe 5

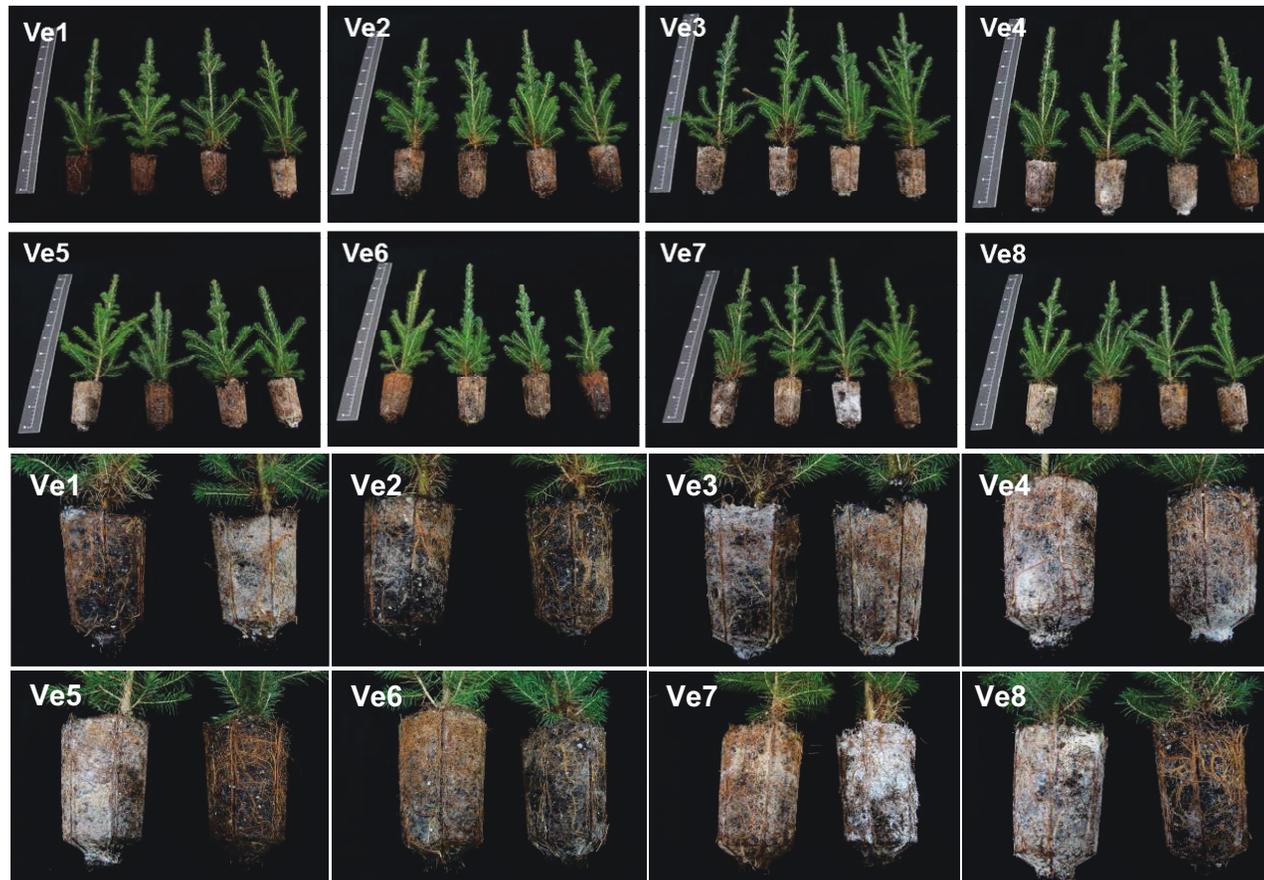
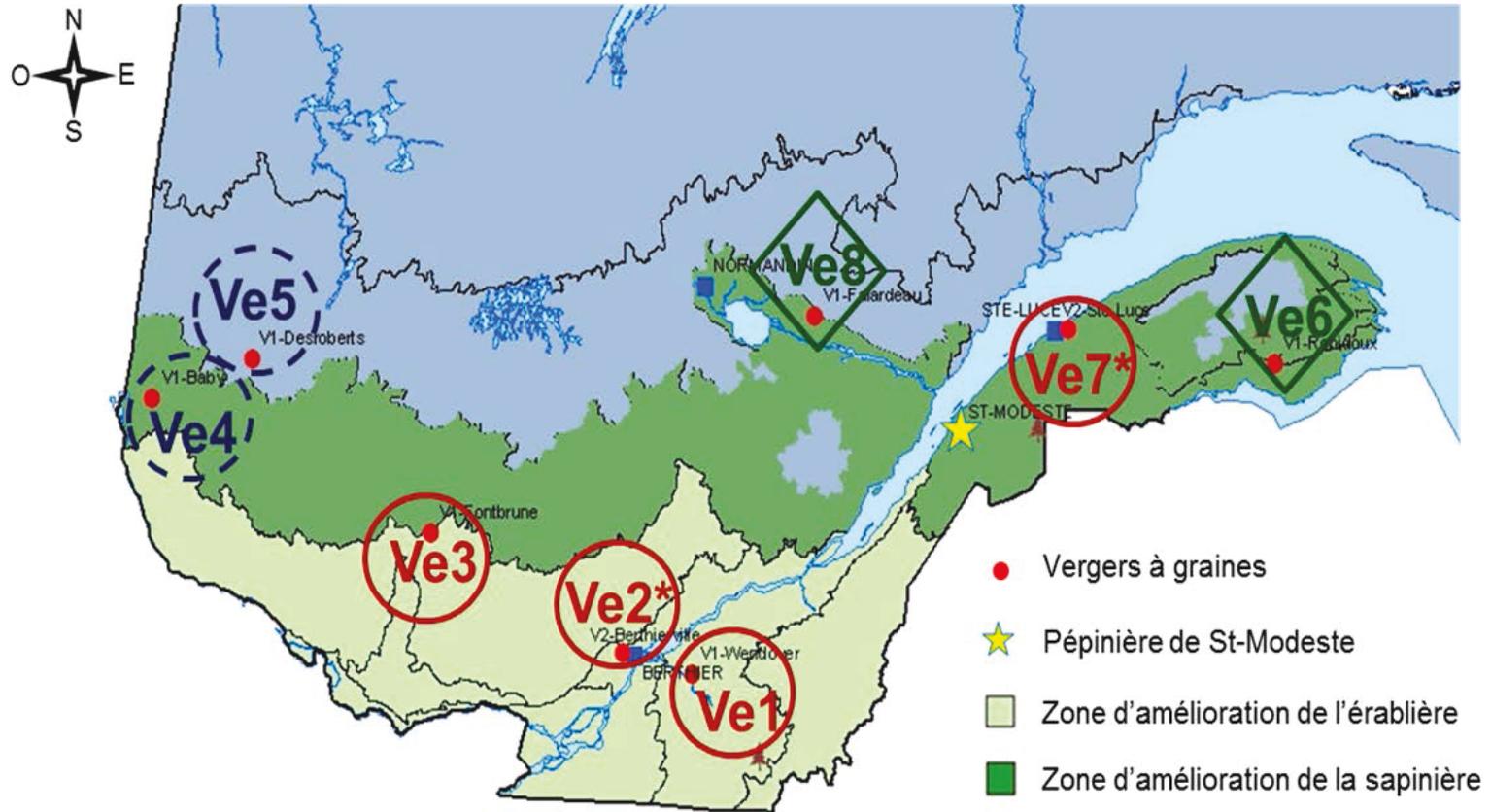


Image des plants entiers et des systèmes racinaires des 8 sources génétiques (Ve1 à Ve8) d'épinette blanche à la fin de la deuxième année de croissance en pépinière (2+0).

Annexe 6



Répartition géographique des 8 vergers à graines d'épinette blanche identifiés par des numéros de 1 à 8 selon une latitude croissante. Les vergers entourés du même symbole font partie d'un même groupe ayant été formé à partir des paramètres semblables des courbes de croissance en hauteur 2+0 modélisées à partir d'un modèle logistique. Les vergers 1, 2, 3 et 7 forment le groupe des vergers méridionaux et de deuxième génération, les vergers 4 et 5 forment le groupe des vergers de l'ouest. Les vergers 6 et 8 forment le groupe des vergers du nord-est.