

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



Prédire l'effet des changements climatiques sur le volume marchand des principales espèces résineuses plantées au Québec, grâce à la génétique forestière

par André Rainville, Jean Beaulieu, Luc Langevin, Travis Logan et Marie-Claude Lambert

MÉMOIRE DE RECHERCHE FORESTIÈRE N° 174

DIRECTION DE LA RECHERCHE FORESTIÈRE

Prédire l'effet des changements climatiques sur le volume marchand des principales espèces résineuses plantées au Québec, grâce à la génétique forestière

par André Rainville, ing.f. M. Sc., Jean Beaulieu, ing.f., M. Sc., *Ph. D.*,
Luc Langevin, stat., M. Sc., Travis Logan, B. Sc., M. Sc.
et Marie-Claude Lambert, stat., M. Sc.

MÉMOIRE DE RECHERCHE FORESTIÈRE N° 174

DIRECTION DE LA RECHERCHE FORESTIÈRE

Mandat de la DRF

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

Les mémoires de recherche forestière de la DRF

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

Vous pouvez adresser vos demandes à :

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

© Gouvernement du Québec

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

Rainville, A., J. Beaulieu, L. Langevin, T. Logan et M.-C. Lambert, 2014. *Prédire l'effet des changements climatiques sur le volume marchand des principales espèces résineuses plantées au Québec, grâce à la génétique forestière*.
Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de la recherche forestière.
Mémoire de recherche forestière n° 174, 58 p.

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

ISSN : 1183-3912

ISBN : 978-2-550-71422-4

ISBN (PDF) : 978-2-550-71423-1

F.D.C. 181.2

L.C. SD 390.7.C55

Notes biographiques



André Rainville est ingénieur forestier, détenteur d'une maîtrise en écologie et pédologie forestières avec spécialisation en amélioration génétique, de la Faculté de foresterie, de géographie et de géomatique de l'Université Laval. Il est à l'emploi du ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs depuis 1985,

comme chercheur responsable des programmes d'amélioration génétique de l'épinette blanche et des feuillus nobles au Québec, et coresponsable d'un projet sur l'évaluation des gains réels de productivité associés au reboisement avec des plants génétiquement améliorés. Depuis 2008, il participe à plusieurs projets de recherche sur le thème des changements climatiques et des mesures d'adaptation pour le Québec, comme le développement des modèles de transfert de sources de semences et la conception d'une stratégie québécoise de conservation des ressources génétiques forestières.



Jean Beaulieu a obtenu un baccalauréat en sciences forestières de l'Université Laval en 1976, ainsi qu'une maîtrise en aménagement forestier en 1979 de la même université. Après quelques années sur le marché du travail, il a complété un doctorat en sciences biologiques à l'Université de Montréal. Il a travaillé

à la Faculté de foresterie, de géographie et de géomatique pendant 5 ans, puis s'est joint en 1983 au groupe de recherche en génétique et amélioration des arbres du Service canadien des forêts, au Centre de foresterie des Laurentides, à Québec. Il y a œuvré pendant plus de 30 ans comme agent forestier, puis comme chercheur scientifique. En 2006, il joignait le Centre canadien sur la fibre de bois, pour lequel il a agi également comme coordonnateur régional pendant 7 ans. Ses travaux de recherche ont porté sur l'adaptation des arbres et leur amélioration pour les caractères d'intérêt économique. Il s'intéresse tant aux méthodes de sélection traditionnelle qu'à celles basées sur les techniques modernes de génomique. Il a pris sa retraite en avril 2014.



Luc Langevin est statisticien, diplômé de l'Université Laval où il a obtenu un baccalauréat en 1993 et une maîtrise en 1997. Il a commencé sa carrière comme statisticien au Centre de recherche en endocrinologie moléculaire du Centre hospitalier de l'Université Laval (CHUL) où il a travaillé pendant 4 ans, avant de

devenir consultant SAS jusqu'en 2007 pour la Commission de la santé et de la sécurité du travail (CSST) et la Société de l'assurance automobile du Québec (SAAQ). Il a ensuite participé pendant 2 ans au projet de modélisation ARTEMIS à la Direction de la recherche forestière. Depuis 2010, il est analyste en information de gestion pour la compagnie Industrielle Alliance, Assurance auto et habitation.



Travis Logan a obtenu un baccalauréat en écologie en 2000 et une maîtrise en systèmes d'information géographique en 2003 de l'Université de Calgary, en Alberta. Sa thèse de maîtrise portait sur des modèles d'habitat de grands carnivores dans le parc national de Banff et ses environs. Il a ensuite travaillé comme

technicien en systèmes d'information géographique (SIG) pour le Service canadien des forêts, à Edmonton, en particulier sur la modélisation des effets des changements climatiques sur la productivité primaire nette des forêts nord-américaines. Depuis 2006, il travaille au sein du groupe Scénarios et Services Climatiques du consortium Ouranos sur la climatologie régionale et l'adaptation aux changements climatiques. Il participe activement à plusieurs projets de recherche des programmes «Ressources forestières» et «Écosystèmes et biodiversité».



Marie-Claude Lambert est statisticienne, diplômée de l'Université Laval depuis 1996. En 1998, le même établissement lui décernait un diplôme de maîtrise ès sciences. De 1997 à 2006, elle a travaillé comme statisticienne au Centre de foresterie des Laurentides du Service canadien des forêts, où elle a collaboré princi-

palement aux projets du groupe ECOLEAP. Depuis 2006, elle est à l'emploi de la Direction de la recherche forestière, au sein de l'équipe de biométrie. Ses principaux champs de compétence sont la modélisation, l'analyse de variance, les modèles mixtes et les modèles linéaires généralisés.

Résumé

Devant la rapidité des changements climatiques actuels et à venir, plusieurs espèces d'arbres n'auront probablement pas le temps de s'adapter et pourraient disparaître localement, régionalement, ou même complètement. La plantation constitue une mesure privilégiée d'adaptation car elle permet de déplacer des sources de semences en vue de maximiser le rendement futur des forêts. Ces déplacements doivent toutefois se faire avec précaution et être guidés par des connaissances scientifiques appropriées. Dans les années 1960-1970, des tests de provenances ont été établis pour l'épinette noire (*Picea mariana* [Mill.] B.S.P.), l'épinette blanche (*Picea glauca* [Moench] Voss) et le pin gris (*Pinus banksiana* Lamb.), avec l'objectif de sélectionner le matériel le plus performant pour le programme québécois de reboisement. Ces tests génétiques rassemblent une variété de provenances (sources de semences) dans une gamme de sites aux conditions environnementales diverses; ils peuvent donc servir à estimer indirectement la réponse potentielle des provenances aux changements rapides de climat.

Des modèles de transfert ont donc été conçus à partir des mesures récoltées dans ces tests de provenances. Ils prédisent si les différences de climat entre deux périodes de temps, et entre deux sites lorsqu'il y a déplacement de sources de semences, auront un effet favorable ou défavorable à la croissance en hauteur. L'originalité de la présente étude réside, premièrement, dans l'utilisation de données climatiques plus vieilles (1941-1970) que celles couramment utilisées pour développer les modèles de transfert. La période la plus récente (1971-2000) étant en effet reconnue comme celle où les changements climatiques ont été les plus marqués, nous avons émis l'hypothèse que les anciens modèles ne reflétaient pas bien la capacité d'adaptation des espèces. Ce changement de période de référence a permis d'améliorer la précision des estimations de hauteur. Deuxièmement, l'effet des changements climatiques a été évalué sur le rendement futur en volume marchand (m³/ha) des plantations, plutôt qu'uniquement sur la hauteur des arbres. Finalement, les modèles de transfert présentés ici pour l'épinette blanche et l'épinette

noire sont plus performants que les modèles précédents, et donnent une meilleure évaluation de la productivité future des plantations partout au Québec. Ils pourraient donc être intégrés au calcul de la possibilité forestière.

Les résultats de simulations démontrent qu'à court terme (période 2046-2065), pour l'épinette blanche, le rendement en volume marchand des plantations issues de sources locales augmenterait dans les trois domaines bioclimatiques sous l'effet d'une amélioration des conditions climatiques, avec un effet plus marqué dans les domaines de la pessière et de la sapinière, plus au nord. Toutefois, au cours de la période 2081-2099, cette augmentation serait suivie d'une légère diminution du rendement dans les domaines de l'érablière et de la sapinière. Les variables climatiques retenues et les modèles climatiques eux-mêmes contribuent très peu à l'erreur totale associée au volume marchand prédit des plantations d'épinette blanche. L'épinette noire, quant à elle, connaîtrait à court terme une faible augmentation de rendement en volume marchand dans les domaines de la sapinière et de la pessière, mais perdrait le tiers de sa productivité dans le domaine de l'érablière. À plus long terme (2081-2099), l'erreur associée aux rendements est cette fois attribuable en grande partie aux facteurs climatiques, et trop grande pour permettre des projections fiables. Pour le pin gris, le modèle de transfert s'est avéré inefficace pour prévoir le rendement futur des plantations au Québec.

Les résultats de cette étude permettent dorénavant d'orienter le choix de la source de semences (verger à graines) à planter dans différentes régions du Québec, afin d'éliminer les pertes de rendement anticipées ou de maximiser les rendements futurs des plantations d'épinette noire et d'épinette blanche, dans un contexte de changement climatique. Cette stratégie permettra à nos forêts d'être mieux adaptées au climat futur et de maintenir leur productivité. Malgré cela, dans le domaine de l'érablière, il faut appréhender une baisse importante du rendement des plantations d'épinette noire, peu importe la source de semences utilisée.

Mots-clés : adaptation, amélioration génétique, rendement des plantations, simulations, tests de provenances, vergers à graines.

Abstract

The rapid rate of current and expected climate change is expected to exceed the capacity of many tree species to adapt, putting them at risk of extirpation at a local or regional scale, and even over their whole distribution range. Plantation is a preferred adaptation measure which allows the movement of seed sources to maximize forest productivity. However, these transfers should be made with caution and must be guided by sound scientific knowledge. In the 1960s and 1970s, black spruce (*Picea mariana* [Mill.] B.S.P.), white spruce (*Picea glauca* [Moench] Voss) and jack pine (*Pinus banksiana* Lamb.) provenance tests were established in Quebec to select the best reforestation material. Since these tests compare a variety of provenances (seed sources) on different sites with contrasting environmental conditions, they can provide an indirect estimation of the potential response of provenances to rapid climate change.

Data from these provenance tests were used to develop transfer models. These models integrate several climate scenarios to predict future height gains or losses for different time periods, or for different sites following a seed source transfer. The originality of the present study first lies in the use of older climate data (1941-1970) than usual to develop the transfer models. Since the more recent period (1971-2000) has been subjected to the greatest climate changes, we assumed that past transfer models did not reflect the real capacity of species to adapt. This change of reference period greatly improved the precision of height prediction estimations. Second, for black spruce and white spruce, we present the effects of climate change in terms of future yield in merchantable volume (m^3/ha) rather than height growth. Finally, the new models for white spruce and black spruce perform better

and give more precise estimations of future plantation yields in all of Quebec than previous ones. They could therefore be used for forest possibility calculations.

Simulations show that in the short term (2046-2065), white spruce plantation yield from local seed sources is expected to increase in all three of Quebec's bioclimatic domains because of a positive effect of climate change, especially in the north (balsam fir and black spruce domains). However, during the following period (2081-2099), productivity would slightly decrease in the sugar maple and balsam fir domains. The contribution of climate variables and climate models to total error of predicted yield is small for white spruce plantations. For black spruce, a slight yield increase is predicted in the short term in the balsam fir and spruce domains, but productivity could drop by one-third in the sugar maple domain. For the longer term (2081-2099), the error associated to black spruce plantation yield predictions, mainly due to climatic factors, is too large to allow accurate predictions. For jack pine, the transfer model proved ineffective in predicting future plantation yield in Quebec.

These results now allow the choice of the best adapted seed sources (seed orchards) to plant in different regions of Quebec, in order to counter the anticipated productivity losses due to climate change or to maximize future yields of black spruce and white spruce plantations. This strategy should help Quebec forests to adapt to future climate and to maintain their overall productivity. Even so, an important loss of productivity is expected for black spruce plantations in the sugar maple domain, no matter which seed source is used.

Keywords : adaptation, tree improvement, plantation yield, simulations, provenance tests, seed orchards.

Remerciements

Les auteurs tiennent à souligner la précieuse collaboration de M. Rémi Saint-Amant du Service canadien des forêts (SCF), qui a incorporé au logiciel BioSIM les nouveaux modèles de transfert ainsi que les différents scénarios et modèles climatiques retenus dans le présent projet. Leurs remerciements vont également à M. Guy Prigent de la Direction de la recherche forestière (DRF) pour les nombreuses discussions au sujet du rendement réel des plantations qui font partie du réseau de suivi du ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP) et qui ont permis d'élaborer les modèles d'IQS biophysique, dont il est l'un des co-initiateurs. Nous remercions aussi les chercheurs et le personnel technique de la DRF et du SCF, responsables des programmes d'amélioration génétique, qui ont planifié, mis en place et effectué le suivi (entretiens, mesurages) des tests de provenances qui sont à la base de la présente étude. Nos remerciements s'adressent plus particulièrement à MM. Roger Beaudoin, Simon Barrette, Gaétan Numainville, Guildo Gagnon, René Pâquet, Gaétan Daoust, ainsi qu'aux

regrettés MM. Armand Corriveau, Roger Keable, Jean-Claude Boutin et Serge Légaré. L'apport de nombreux autres collaborateurs et étudiants, dont l'énumération des noms serait ici trop longue, mérite également d'être souligné. Finalement, nous tenons à remercier M. Rock Ouimet pour son travail d'éditeur associé, les deux réviseurs anonymes, ainsi que Mme Denise Tousignant pour la révision linguistique et l'édition, M. Jean Noël pour la production des cartes de rendement, Mme Maripierre Jalbert pour le graphisme et Mme Nathalie Langlois pour la révision typographique du document.

Ce mémoire est le fruit de recherches menées dans le cadre du projet 112959231 (Développement de modèles de transfert de sources de semences pour l'épinette blanche, l'épinette noire et le pin gris dans un contexte de changements climatiques) de la DRF, financé en partie par le Fonds vert du Gouvernement du Québec.

Table des matières

Résumé	v
Abstract	vi
Remerciements	vii
Liste des tableaux	xi
Liste des figures	xiii
Liste des annexes	xv
Introduction	1
Développer des modèles de transfert pour guider le choix des sources de semences	2
Transformer les gains en hauteur en gains en volume marchand et incorporer l'effet des changements climatiques	3
Chapitre premier – Matériel et méthodes	5
1.1. Développement des modèles de transfert de sources de semences	5
1.1.1. Données de croissance	5
1.1.1.1. Épinette blanche	5
1.1.1.2. Épinette noire	6
1.1.1.3. Pin gris	6
1.1.2. Données climatiques utilisées pour développer les modèles	6
1.1.3. Analyses statistiques	7
1.1.3.1. Estimation de la hauteur des sources de semences dans chaque site de plantation	7
1.1.3.2. Estimation de la hauteur de la source locale de semences dans chaque site de plantation	7
1.1.3.3. Développement des modèles de transfert	8
1.1.3.4. Approche utilisée pour développer les modèles et pour choisir les variables climatiques d'intérêt	8
1.2. Climat futur	9
1.3. Production des cartes du rendement futur en volume marchand des plantations	10
Chapitre deux – Résultats	13
2.1. Modèles de transfert de sources de semences	13
2.1.1. Épinette blanche	13
2.1.1.1. Estimation des hauteurs moyennes des arbres	13
2.1.1.2. Modèle de transfert retenu	13
2.1.1.3. Influence des variables climatiques sur la croissance relative en hauteur des sources de semences	13
2.1.1.3.1. Lorsqu'on fait varier 2 des 3 variables climatiques qui entrent dans le modèle de transfert	14
2.1.1.3.2. Lorsqu'on fait varier les 3 variables climatiques qui entrent dans le modèle de transfert	14
2.1.2. Épinette noire	16
2.1.2.1. Estimation de la hauteur moyenne des arbres	16

2.1.2.2.	Modèle de transfert retenu.....	16
2.1.2.3.	Influence des variables climatiques sur la croissance relative en hauteur des sources de semences	17
2.1.2.3.1.	Lorsqu'on fait varier 2 des 3 variables climatiques qui entrent dans le modèle de transfert	17
2.1.2.3.2.	Lorsqu'on fait varier les 3 variables climatiques qui entrent dans le modèle de transfert	19
2.1.3.	Pin gris	20
2.1.3.1.	Estimation de la hauteur moyenne des sources de semences et des sources locales de semences	20
2.1.3.2.	Modèle de transfert retenu	20
2.1.3.3.	Influence des variables climatiques sur la croissance relative en hauteur des sources de semences	21
2.1.3.3.1.	Lorsqu'on fait varier 2 des 3 variables climatiques qui entrent dans le modèle de transfert	21
2.1.3.3.1.	Lorsqu'on fait varier les 3 variables climatiques qui entrent dans le modèle de transfert	23
2.2.	Climat futur.....	24
2.3.	Rendement futur des plantations.....	26
2.3.1.	Épinette blanche.....	26
2.3.1.1.	Volume marchand des sources locales de semences (sans déplacement).....	26
2.3.1.2.	Volume marchand selon la source de semences utilisée (avec déplacements)	27
2.3.2.	Épinette noire.....	28
2.3.2.1.	Volume marchand des sources locales de semences (sans déplacement).....	28
2.3.2.2.	Volume marchand selon la source de semences utilisée (avec déplacements)	30
2.3.3.	Pin gris	31
Chapitre trois – Discussion		33
3.1.	Modèles de transfert de sources de semences	33
3.1.1.	Comparaison avec les méthodes utilisées ailleurs	33
3.1.2.	Modèle de transfert pour le pin gris : variables utilisées et limites	33
3.2.	Rendements futurs des plantations	34
3.2.1.	Domaine de l'érablière	35
3.2.2.	Domaine de la sapinière	35
3.2.3.	Domaine de la pessière	36
3.3.	Effet des variations climatiques sur le rendement futur des plantations	36
3.3.1.	Facteurs liés à la disponibilité en eau (indice d'aridité, précipitations totales et utiles)	37
3.3.2.	Facteurs liés à la température	37
3.3.3.	Importance de considérer conjointement la disponibilité en eau et la température	38
3.4.	Importance du choix des sources de semences	38
3.4.1.	Pour l'épinette blanche.....	39
3.4.2.	Pour l'épinette noire	39
Conclusion		41
Références		43
Annexes		49

Liste des tableaux

Tableau 1. Minimum et maximum de l'écart relatif prédit en hauteur des plantations d'épinette blanche en fonction d'un écart de climat (source-plantation) pour les trois variables climatiques qui entrent dans le modèle de transfert	16
Tableau 2. Minimum et maximum de l'écart relatif prédit en hauteur des plantations d'épinette noire en fonction d'un écart de climat (source-plantation) pour les trois variables climatiques qui entrent dans le modèle de transfert	20
Tableau 3. Minimum et maximum de l'écart relatif prédit en hauteur des plantations de pin gris en fonction d'un écart de climat (source-plantation) pour les trois variables climatiques qui entrent dans le modèle de transfert	23
Tableau 4. Liste des modèles climatiques utilisés pour générer les valeurs futures des variables climatiques	25
Tableau 5. Rendement attendu en volume marchand des plantations d'épinette blanche, issues de sources locales, pour différentes périodes (moyenne, écart-type et coefficient de variation [CV]), en fonction du domaine bioclimatique	27
Tableau 6. Rendement attendu en volume marchand des plantations d'épinette noire, issues de sources locales, pour différentes périodes (moyenne, écart-type et coefficient de variation [CV]), en fonction du domaine bioclimatique	29

Liste des figures

Figure 1.	Carte des sites de plantation (carrés) utilisés pour développer les modèles de transfert et des sources de semences (provenances) représentées dans l'étude (cercles) pour l'épinette blanche (EPB, en orange), l'épinette noire (EPN, en bleu) et le pin gris (PIG, en vert)	5
Figure 2.	Écart relatif prédit en hauteur (par rapport à la source locale de semences) des plantations d'épinette blanche en fonction des écarts de la température maximale d'été et de la température moyenne d'hiver, lorsque l'indice d'aridité est maintenu constant	15
Figure 3.	Écart relatif prédit en hauteur (par rapport à la source locale de semences) des plantations d'épinette blanche en fonction des écarts de la température maximale d'été et de l'indice d'aridité, lorsque la température moyenne d'hiver est maintenue constante	15
Figure 4.	Écart relatif prédit en hauteur (par rapport à la source locale de semences) des plantations d'épinette blanche en fonction des écarts de la température moyenne d'hiver et de l'indice d'aridité, lorsque la température maximale d'été est maintenue constante	16
Figure 5.	Écart relatif prédit en hauteur (par rapport à la source locale de semences) des plantations d'épinette noire en fonction des écarts des degrés-jours > 0 °C et des précipitations totales annuelles, lorsque la plus basse température minimale annuelle est maintenue constante	18
Figure 6.	Écart relatif prédit en hauteur (par rapport à la source locale de semences) des plantations d'épinette noire en fonction des écarts des degrés-jours > 0 °C et de la plus basse température minimale annuelle, lorsque les précipitations totales annuelles sont maintenues constantes	18
Figure 7.	Écart relatif prédit en hauteur (par rapport à la source locale de semences) des plantations d'épinette noire en fonction des écarts des précipitations totales annuelles et de la plus basse température minimale annuelle, lorsque les degrés-jours > 0 °C sont maintenus constants	19
Figure 8.	Écart relatif prédit en hauteur (par rapport à la source locale de semences) des plantations de pin gris en fonction des écarts de la température maximale d'été et de la température minimale d'hiver, lorsque la quantité de neige convertie en eau est maintenue constante	22
Figure 9.	Écart relatif prédit en hauteur (par rapport à la source locale de semences) des plantations de pin gris en fonction des écarts de la quantité de neige convertie en eau et de la température maximale d'été, lorsque température minimale d'hiver est maintenue constante	22
Figure 10.	Écart relatif prédit en hauteur (par rapport à la source locale de semences) des plantations de pin gris en fonction des écarts de la température minimale d'hiver et de la quantité annuelle de neige convertie en eau, lorsque la température maximale d'été est maintenue constante	23
Figure 11.	Relation entre la proportion expliquée de la variance totale (R^2) et le nombre de groupes de simulations climatiques, pour les 8 variables climatiques des modèles de transfert	24

Figure 12. Couverture de l'incertitude dans les changements projetés (Δ) liée aux 8 simulations climatiques utilisées (points colorés) par rapport à l'ensemble des 81 simulations disponibles (points gris)	24
Figure 13. Rendements actuels et futurs prédits (volume marchand en m ³ /ha) des plantations d'épinette blanche, issues de sources de semences locales, dans les domaines bioclimatiques de l'érablière, de la sapinière et de la pessière	26
Figure 14. Contribution relative (% de l'erreur totale prédite) des modèles de productivité d'une part, et des variables et modèles climatiques retenus d'autre part, dans le calcul du volume marchand des plantations d'épinette blanche pour trois périodes de temps (actuelle, 2046-2065 et 2081-2099)	27
Figure 15. Rendement futur (2081-2099) attendu en volume marchand des plantations d'épinette blanche à Cabano, selon la source de semences utilisée (verger à graines) (exprimé en % par rapport à la source locale, soit le verger d'Estcourt)	28
Figure 16. Rendements actuels et futurs prédits (volume marchand en m ³ /ha) des plantations d'épinette noire, issues de sources de semences locales, dans les domaines bioclimatiques de l'érablière, de la sapinière et de la pessière	29
Figure 17. Contribution relative (% de l'erreur totale prédite) des modèles de productivité d'une part, et des variables et modèles climatiques retenus d'autre part, dans le calcul du volume marchand des plantations d'épinette noire pour trois périodes de temps (actuelle, 2046-2065 et 2081-2099)	30
Figure 18. Rendement futur (2081-2099) attendu en volume marchand des plantations d'épinette noire à Chibougamau, selon la source de semences utilisée (verger à graines) (exprimé en % par rapport à la source locale, soit le verger de Lévy)	30

Liste des annexes

Annexe A.	Liste des variables climatiques utilisées dans le projet	49
Annexe B.	Caractéristiques climatiques annuelles moyennes des 3 sites de plantation d'épinette blanche pour les périodes de 1941 à 1970 et de 1971 à 2000	50
Annexe C.	Caractéristiques climatiques annuelles moyennes des 4 sites de plantation d'épinette noire pour les périodes de 1941 à 1970 et de 1971 à 2000	51
Annexe D.	Caractéristiques climatiques annuelles moyennes des 3 sites de plantation de pin gris pour les périodes de 1941 à 1970 et de 1971 à 2000	52
Annexe E.	Méthode utilisée pour évaluer le rendement des plantations sous l'effet des changements climatiques	53
Annexe F.	Modèles de régression pour prédire la hauteur moyenne (cm) des sources locales de semences d'épinette blanche, par site de plantation	53
Annexe G.	Modèles de régression pour prédire la hauteur moyenne (cm) des sources locales de semences d'épinette noire, par site de plantation	54
Annexe H.	Modèles de régression pour prédire la hauteur moyenne (cm) des sources locales de semences de pin gris, par site de plantation	54
Annexe I.	Comparaison de l'effet simulé d'un sous-ensemble de a) 4, b) 8 ou c) 12 modèles climatiques (en rouge) par rapport aux 81 modèles possibles (en bleu), pour la période 2081-2099	55
Annexe J.	Comparaison de l'effet simulé d'un sous-ensemble de 8 modèles climatiques (en rouge) avec celui de l'ensemble des 81 modèles possibles (en bleu), pour la période 2046-2065	56
Annexe K.	Cartes du rendement attendu en volume marchand des plantations d'épinette blanche au Québec, issues des sources de semences locales, sous l'effet des changements climatiques et pour 3 périodes de temps : a) actuelle, b) 2046-2065 et c) 2081-2099	57
Annexe L.	Cartes du rendement attendu en volume marchand des plantations d'épinette noire au Québec, issues des sources de semences locales, sous l'effet des changements climatiques et pour 3 périodes de temps : a) actuelle, b) 2046-2065 et c) 2081-2099	58

Introduction

Il y a environ 18 000 ans, une épaisse couche de glace recouvrait le territoire canadien et le nord des États-Unis. Au Québec, la température annuelle moyenne était inférieure de 4 °C à la température actuelle (Dyke *et al.* 2003). Lorsque le climat s'est réchauffé, la plupart des espèces végétales et animales ont quitté leur refuge et migré vers le nord, colonisant de nouveaux territoires. La diversité des conditions rencontrées a permis aux espèces de se forger des identités génétiques distinctes. Ainsi, bien que d'un point de vue morphologique, un peuplement d'épinette blanche de l'Ouest canadien semble identique à un peuplement d'épinette blanche de l'Est canadien, les populations sont pourtant distinctes sur le plan génétique, et cette adaptation des populations s'est échelonnée sur plusieurs millénaires. Or, les changements climatiques actuels laissent entrevoir une augmentation moyenne de température du même ordre (4 °C), mais sur une période d'environ 100 ans (Logan *et al.* 2011). Selon le scénario utilisé, les modèles prévoient en effet un réchauffement de 1,1 à 6,4 °C d'ici la fin du siècle (IPCC 2007). En tenant compte de l'effet d'albédo, caractérisé par une augmentation de l'absorption de chaleur par la terre en raison d'une diminution de la surface des zones enneigées et englacées, l'augmentation de température pourrait aller jusqu'à 8 °C (Andreae *et al.* 2005, Meinshausen *et al.* 2009). Cependant, compte tenu de l'incertitude et de la variabilité des modèles climatiques, il est peu probable que l'augmentation de température soit supérieure à 10 °C ou inférieure à 2 °C (Knutti et Hegerl 2008, Roe et Baker 2007). Au Québec, les températures sur l'ensemble du territoire se réchaufferont davantage en hiver qu'en été (Christensen *et al.* 2007, Plummer *et al.* 2006). Ainsi, pour l'horizon 2050, les températures moyennes hivernales augmenteraient de 2,5 à 3,8 °C dans le sud du Québec, et de 4,5 à 6,5 °C dans le nord. En été, les hausses de température varieraient de 1,9 à 3,0 °C au sud, et de 1,6 à 2,8 °C au nord (Ouranos 2010). Pour l'horizon 2090, le changement des températures moyennes hivernales serait de 5 à 9 °C, avec un réchauffement plus important dans le nord du Québec, alors que les températures moyennes estivales augmenteraient de 2 à 3,5 °C.

Même si la température influence directement plusieurs processus biologiques, notamment le métabolisme et la croissance des espèces (Coulombe *et al.* 2009, Huang *et al.* 2010, Leblanc et Terrell 2009), des études sur les conifères de la

forêt boréale démontrent aussi l'importance de tenir compte des précipitations. En effet, la température et les précipitations sont corrélées significativement non seulement l'une avec l'autre, mais aussi avec plusieurs indices de croissance comme la production de cellules, la croissance annuelle et la productivité des forêts (Briffa *et al.* 2008, Danby et Hik 2007, Kurtz *et al.* 2008). L'augmentation des températures à la limite nord des aires de répartition des espèces de la forêt boréale serait accompagnée d'une augmentation des précipitations totales, ce qui résulterait en une meilleure croissance et survie des individus, et permettrait même la migration des arbres vers le nord (Harsch *et al.* 2009, Kullman 2001, MacDonald *et al.* 2000, 2008). Par contre, dans le domaine de l'érablière au sud du Québec, l'augmentation des températures serait accompagnée d'une très faible augmentation des précipitations totales (de 0 à 5 % selon Logan *et al.* 2011), ce qui pourrait engendrer un stress hydrique chez les arbres et limiter leur croissance.

De nombreuses études suggèrent que la rapidité des changements climatiques, particulièrement aux latitudes élevées de l'Amérique du Nord, ferait en sorte que certaines espèces arborescentes n'auraient pas le temps de s'adapter aux nouvelles conditions. Elles pourraient alors disparaître localement, régionalement ou même complètement (Gray 2005, Malmshemer *et al.* 2008, Périé *et al.* 2014, Walther *et al.* 2002). Les signes de cette mésadaptation sont d'ailleurs déjà visibles (Chuine *et al.* 2004, IPCC 2007, Parmesan 2006). Depuis deux décennies, une abondante littérature fait état de la mortalité accrue des arbres, provoquée par la sécheresse et de fortes températures, sur chaque continent et dans la plupart des écorégions (Allen *et al.* 2010, van Mantgem *et al.* 2009).

Advenant l'impossibilité de s'adapter assez rapidement pour survivre, les populations devront migrer vers des habitats propices. La totalité des simulations faites à partir de 14 combinaisons de modèles de circulation générale et de modèles de répartition d'espèces ont montré que sous l'hypothèse de doublement des concentrations de CO₂, ce qui correspond à une augmentation de température de 1,5 et 4,5 °C (IPCC 2007), les espèces devraient migrer de 1 km/an pour suivre la progression de leur climat actuel (Malcolm *et al.* 2002). Or, les modèles de prévision du potentiel de migration de 5 espèces arborescentes de l'Est des États-Unis montrent qu'il

est très peu probable qu'elles puissent se disperser de plus de 10 à 20 km d'ici 2100, ce qui correspond à une vitesse de migration de 100-200 m/an (Iverson *et al.* 2004). Les plus récentes publications parlent même de taux de migration inférieurs à 100 m/an (McLachlan *et al.* 2005, Pearson 2006). Les populations d'espèces arborescentes deviendront ainsi mésadaptées au climat local et donc, plus vulnérables.

Développer des modèles de transfert pour guider le choix des sources de semences

La plantation d'arbres permet de déplacer diverses provenances et espèces vers des lieux qui permettront leur survie à court terme et qui représenteront, avec les changements climatiques, des habitats favorables dans le futur. Ces déplacements doivent toutefois se faire avec précaution et s'appuyer sur un minimum de connaissances de l'écologie de l'espèce (Pedlar *et al.* 2011, 2012). Les modèles d'enveloppes bioclimatiques sont parmi les outils les plus couramment utilisés pour ce faire. Ils se basent sur la relation entre les caractéristiques environnementales et l'aire de répartition des espèces, et définissent les besoins des espèces afin de prédire, à l'aide d'un ensemble de scénarios climatiques, leur aire de répartition potentielle future (Pearson 2006). Ces modèles ont recours à une approche écologique. Toutefois, ils font abstraction de l'existence de différences adaptatives entre les populations d'une espèce. Cet aspect est d'autant plus important à considérer que de plus en plus d'études en génétique écologique donnent à penser que chez la plupart des espèces résineuses, plusieurs populations auront une faible capacité d'adaptation au climat (Davis et Shaw 2001, Iverson et Prasad 2002, Rehfeldt *et al.* 2006, St Clair et Howe 2007).

Depuis plusieurs décennies, dans le cadre des programmes d'amélioration génétique de plusieurs pays, des dispositifs expérimentaux ont été établis dans le but d'identifier le matériel génétique le plus performant pour le reboisement et de déterminer les distances maximales de transfert envisageables avant de constater un problème de mésadaptation (Morgenstern 1996). Ces dispositifs, appelés « tests de provenances* », regroupent des plants de plusieurs sources de semences qui se sont adaptées sur plusieurs générations à leur

environnement. Ces tests comparent la croissance de plusieurs provenances dans une variété de sites couvrant un ensemble de conditions environnementales diverses. Ils peuvent donc servir à évaluer indirectement la réaction potentielle des espèces au changement de climat (Beaulieu et Rainville 2005, Carter 1996, Matyas 1996, Schmidtling 1994). Des modèles de transfert ont été élaborés afin d'estimer la croissance des provenances en fonction des différences de climat entre le lieu d'origine de ces provenances et le site de plantation, quantifiant ainsi leur degré d'adaptation (Wu et Ying 2004) et les impacts du climat sur la croissance (Raymond et Lindgren 1990). Ces modèles sont à la base de plusieurs stratégies d'adaptation aux changements climatiques, qui proposent de planter aujourd'hui les sources de semences qui seront les mieux adaptées aux conditions climatiques futures (Ledig et Kitzmiller 1992, Papadopol 2000, Parker *et al.* 2000, Rehfeldt *et al.* 2006, Ying et Yanchuk 2006).

Il existe toutefois différents types de modèles de transfert. La plupart d'entre eux regroupent les mesures de plusieurs tests, de manière à générer un modèle général applicable à un territoire donné, comme la province de Québec. Ces modèles établissent alors la relation entre la performance d'un ensemble de populations et la distance climatique qui les sépare du site reboisé (Andalo *et al.* 2005, Carter 1996, Matyas 1996, Rehfeldt *et al.* 1999a, Schmidtling 1994). Ce faisant, on suppose alors que la relation entre la croissance et le climat est la même dans tous les environnements. Toutefois, puisque l'adaptation des populations diffère considérablement selon l'environnement dans lequel elles se retrouvent, cette hypothèse n'est pas valable (Rehfeldt *et al.* 2006, Wang *et al.* 2006). Par exemple, le transfert d'une source de semences adaptée à une température annuelle moyenne de 10 °C vers un environnement où celle-ci est de 8 °C (c.-à-d. un refroidissement de 2 °C) pourrait avoir un effet totalement différent sur les phénotypes qu'un autre transfert de même amplitude, mais cette fois-ci pour passer de 2 à 0 °C (Wang *et al.* 2010). De manière générale, les modèles de transfert dits « généraux » ne fourniraient donc pas un degré de précision suffisant pour prévoir la performance d'une source de semences de manière fiable, car ils n'expliquent qu'un faible pourcentage de la variabilité totale. Par exemple, pour 11 espèces de l'Amérique du Nord, ils expliquaient en moyenne seulement 30 % de la variation totale en hauteur des sources de semences (Andalo *et al.* 2005, Carter 1996).

Wang *et al.* (2006) ont cherché à résoudre le problème en développant des modèles de transfert individuels, spécifiques à chaque site. Ces

* Le terme « provenance » est généralement synonyme d'origine géographique. Une provenance présente des conditions écologiques suffisamment homogènes pour qu'on suppose une homogénéité génétique de la population; elle est représentée par les semences, le pollen ou les descendants de plusieurs arbres.

modèles utilisent les valeurs climatiques propres à chacune des sources de semences et à chacun des sites plutôt que les différences entre les sources de semences et le site de plantation. Ces modèles de transfert individuels expliquent une plus grande proportion de la variation totale en hauteur, soit environ 55 % (Wang et al. 2006). Toutefois, dans les études sur l'effet des changements climatiques, de tels modèles ont un usage limité, puisqu'ils sont spécifiques aux sites pour lesquels ils ont été conçus (Wang et al. 2010). Ils peuvent être regroupés pour devenir plus robustes (Carter 1996, Rehfeldt et al. 1999a, Schmidting 1994) mais alors, ils ne permettent pas de comparer les différentes populations.

Au Québec, les modèles développés dans le passé sont de type «général». Beaulieu et al. (2004) ont développé un premier modèle pour l'épinette noire (*Picea mariana* [Mill.] B.S.P.) qui prévoit la croissance en hauteur en fonction des variables climatiques et détermine le niveau de risque associé au transfert de plants vers un territoire différent de l'environnement d'origine. En 2005, un second modèle de transfert a été développé pour l'épinette blanche (*Picea glauca* [Moench] Voss) (Andalo et al. 2005), à partir de mesures de hauteur à l'âge de 22 ans. Il prévoit la hauteur en fonction d'un écart pour 2 variables climatiques, soit la température journalière maximale moyenne et les précipitations totales des mois d'été. Il présente toutefois une importante lacune, puisqu'il n'utilise qu'un seul modèle et un seul scénario climatique afin de prévoir les valeurs futures des variables climatiques. Or, l'utilisation d'un ensemble de modèles et de scénarios climatiques fournit une évaluation de l'incertitude qui est associée aux projections, ce qui permet aux décideurs de mieux évaluer le niveau de confiance dans les changements médians ou moyens calculés (Glecker et al. 2008).

Le premier objectif du présent travail consistait donc à élaborer de nouveaux modèles de transfert «généraux» qui permettraient d'expliquer un plus fort pourcentage de la variabilité totale que les modèles précédents, et fourniraient un degré supérieur de précision pour prédire la croissance relative en hauteur d'une source de semences par rapport à la source locale (exprimée en %), en fonction d'un écart climatique. Cet écart climatique peut découler soit du transfert d'une source de semences hors de son lieu d'origine, soit d'un changement rapide du climat avec le temps (aussi appelé changement climatique), soit d'une combinaison de ces deux facteurs. Les espèces visées par ces modèles sont celles qui représentent plus de 90 % des plants produits dans le cadre du programme de

reboisement du ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP), soit l'épinette noire, l'épinette blanche et le pin gris (*Pinus banksiana* Lamb.) (Direction générale de la production de semences et de plants forestiers, comm. pers., 2014).

Transformer les gains en hauteur en gains en volume marchand et incorporer l'effet des changements climatiques

Le volume marchand spécifique d'un peuplement de structure équienne, monospécifique et au couvert fermé est fonction de la hauteur dominante* des arbres (Eichhorn 1904, dans Prégent et al. 2010). Même dans les plantations en très bas âge, la hauteur dominante est l'un des meilleurs indicateurs du potentiel de productivité (Jansson 2007, Prégent et Végiard 2000). La hauteur dominante atteinte à un âge de référence donné est appelée «indice de qualité de station», ou IQS; cet indice est à la base de plusieurs modèles de croissance forestière actuellement utilisés en recherche forestière (Crookston et Dixon 2005, Davis et al. 2001, Skovsgaard et Vanclay 2008) et en aménagement forestier. Au Québec, les courbes d'IQS des plantations ont été mises à jour récemment (Prégent et al. 1996, 2010). Toutefois, pour prévoir le volume marchand d'une plantation n'importe où au Québec, il faut être en mesure d'estimer l'IQS à cet endroit précis. Des modèles d'IQS biophysique, qui tiennent compte des variables climatiques, édaphiques et de structure, ont donc été élaborés pour 7 espèces résineuses utilisées en plantations au Québec (Beaulieu et al. 2011). Ces modèles utilisent les données de croissance de plus de 5 000 parcelles établies dans des plantations opérationnelles suivies par le MFFP. Les variables climatiques associées à ces parcelles ont été générées par le logiciel BioSIM, un logiciel de simulation développé au Service canadien des forêts (Régnière et Saint-Amand 2008). Pour toutes les espèces étudiées, les corrélations entre les rendements prévus et observés en volume marchand sont relativement étroites (> 0,80, Beaulieu et al. 2011). À l'aide de ces modèles, on peut donc estimer l'IQS des plantations partout au Québec. Les équations du tarif de cubage utilisées à l'échelle opérationnelle par le MFFP pour évaluer les rendements des plantations nous permettent ensuite de passer de l'IQS au volume marchand (Prégent et al. 2010).

Jusqu'à tout récemment, le climat était considéré comme «stable», et de telles équations

* La hauteur dominante correspond à la hauteur moyenne des 200 plus hautes tiges à l'hectare pour l'épinette noire, et à celle des 100 plus hautes tiges à l'hectare pour l'épinette blanche.

pouvaient être utilisées pour simuler les rendements en volume marchand des plantations sur plusieurs rotations. Or, à présent, le passé n'est plus garant de l'avenir. Puisque le climat actuel change beaucoup plus rapidement qu'auparavant, les espèces forestières, qui ont évolué sur plusieurs générations et se sont adaptées graduellement à leur environnement, doivent maintenant s'adapter sur quelques générations. Si l'on veut utiliser les modèles de productivité pour prévoir le rendement futur en volume marchand des plantations, il est essentiel d'y incorporer des mesures d'adaptation des populations. Les modèles de transfert, qui témoignent de la capacité maximale d'adaptation des populations à un changement rapide du climat, joueront ce rôle.

Le second objectif de la présente étude était donc de combiner les modèles de productivité et les modèles de transfert afin de prévoir le rendement futur en volume marchand des plantations partout au Québec, sous l'effet des changements climatiques. Une telle méthode a déjà été proposée dans le passé (Beaulieu et Rainville 2005) et est actuellement mise en application en Colombie-Britannique (O'Neill et Nigh 2011). Elle permet de maximiser la précision des estimations de la productivité forestière future des plantations, un élément essentiel à l'aménagement forestier durable (Davis *et al.* 2001, Porté et Bartelink 2002).

Chapitre premier

Matériel et méthodes

En lien avec les deux objectifs énoncés précédemment, le présent chapitre ainsi que le chapitre suivant (résultats) seront présentés en trois sections distinctes, soit 1) le développement des modèles de transfert de sources de semences; 2) les projections du climat futur; et 3) la cartographie du rendement futur en volume marchand des plantations.

1.1. Développement des modèles de transfert de sources de semences

1.1.1. Données de croissance

1.1.1.1. Épinette blanche

Dans le cadre du programme d'amélioration génétique de l'épinette blanche mené par le Service

canadien des forêts, 3 tests de provenances d'épinette blanche ont été mis en place à la fin des années 1970 sur les sites de La Patrie (site 1), de Dablon (site 2) et de Mastigouche (site 3). Cinquante provenances du Québec, réparties d'est en ouest et du sud au nord jusqu'à la latitude 50° N (Figure 1), y sont représentées par des plants issus de semences récoltées sur 5 arbres, c'est-à-dire par 5 familles uniparentales. Le dispositif expérimental est composé de 6 blocs aléatoires, à l'intérieur desquels les provenances sont réparties au hasard. Dans chacun des blocs, chacune des 50 provenances est représentée par 5 familles, à raison de 5 arbres par famille.

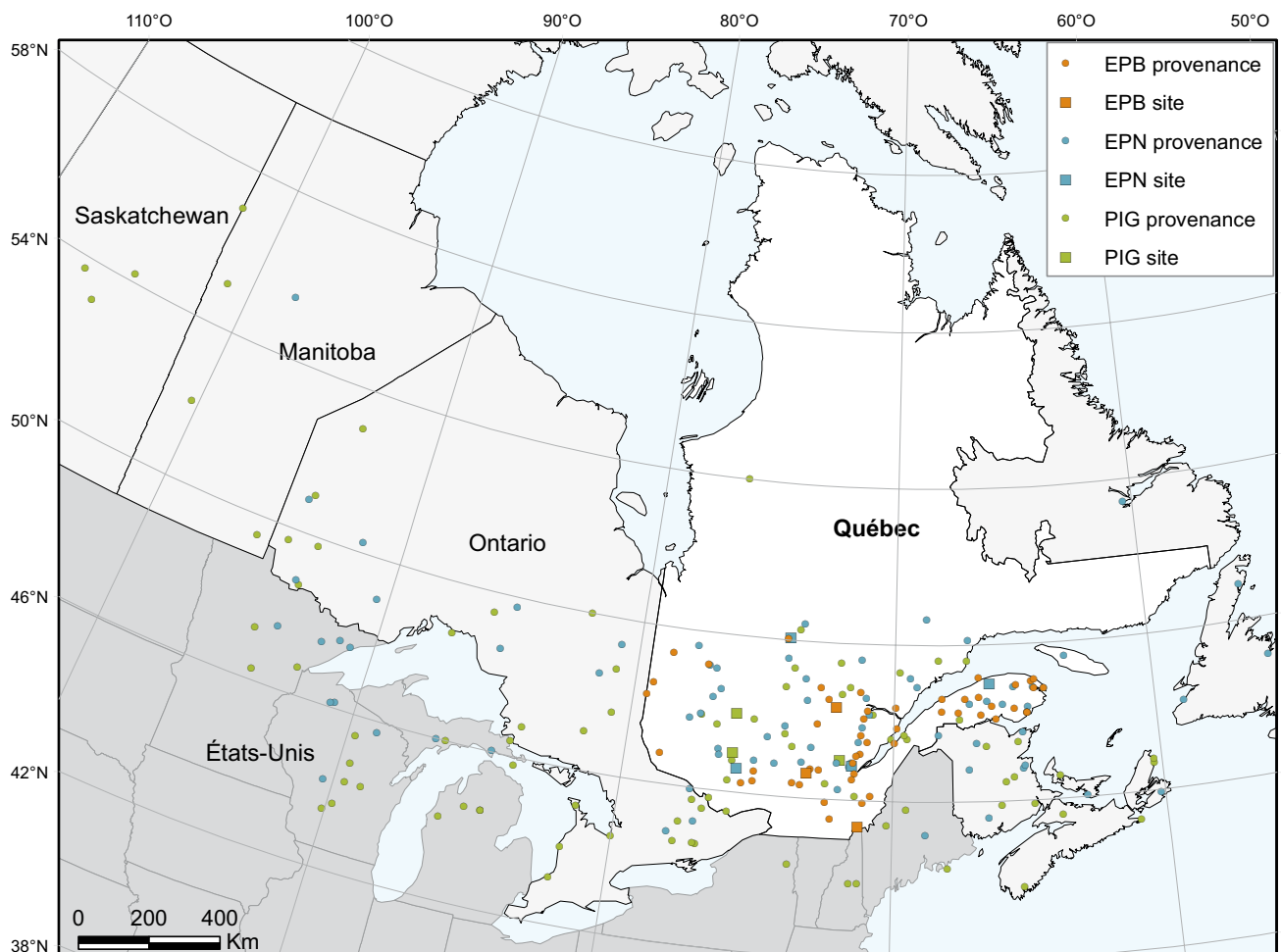


Figure 1. Carte des sites de plantation (carrés) utilisés pour développer les modèles de transfert et des sources de semences (provenances) représentées dans l'étude (cercles) pour l'épinette blanche (EPB, en orange), l'épinette noire (EPN, en bleu) et le pin gris (PIG, en vert).

En 1997, soit 22 ans après la plantation, la hauteur totale des arbres a été mesurée. Au site de Mastigouche, 7 provenances étaient absentes en raison d'un nombre insuffisant de plants au moment de la plantation. Par ailleurs, les données de la provenance « Drummondville » ont été retirées de toutes les analyses des 3 sites, car les hauteurs moyennes des arbres étaient nettement inférieures à celles des autres provenances, ce qui laisse supposer la présence d'une mésadaptation dans cette population. Au total, les mesures de 16273 arbres ont été utilisées pour les analyses.

1.1.1.2. Épinette noire

Quatre tests de provenances d'épinette noire ont été mis en place par le Service canadien des forêts au début des années 1970 sur les sites de Mont-Laurier (site 1), de Lac St-Ignace (site 2), de Chibougamau (site 3) et de Valcartier (site 4). Les arbres représentent 40 provenances typiques de l'ensemble de l'aire de répartition de l'espèce (Figure 1). Le dispositif expérimental comprend 6 blocs aléatoires complets de 16 arbres par provenance par bloc.

En 1993, la hauteur a été mesurée pour tous les arbres vivants, qui avaient alors 24 ans. Bien que chaque parcelle représentant une provenance ait été constituée au départ de 16 arbres, le nombre d'arbres toujours vivants en 1993 variait d'une provenance à l'autre. Les provenances « Blandford » ont été retirées de l'analyse car les hauteurs moyennes des arbres étaient nettement inférieures à celles des autres sources de semences. Au total dans les 4 sites, 10800 arbres ont été inclus dans les analyses.

1.1.1.3. Pin gris

Dans les années 1960, 3 tests de provenances de pin gris ont été mis en place par la DRF et ses collaborateurs sur les sites de Sainte-Christine (site 1), de Chouart (site 2) et de Fontbrune (site 3). Les arbres représentaient 90 provenances de plusieurs provinces du Canada (de l'Alberta aux Maritimes) ainsi que des États-Unis (en bordure des Grands Lacs) (Figure 1).

Toutes les provenances n'étaient pas présentes dans chaque plantation. Les analyses ont été réalisées sur celles qui se trouvaient dans au moins 2 plantations et qui avaient un taux de survie d'au moins 20 %. Au total, 66 provenances répondaient à ces critères : 65 sont présentes dans le site 1, 57 dans le site 2 et 64 dans le site 3.

Les sites 1 et 2 ont été établis selon un dispositif expérimental comprenant 9 blocs aléatoires dans lesquels chacune des provenances était représentée par 5 arbres. Les données disponibles pour réaliser les analyses étaient la hauteur moyenne par bloc et par provenance, à l'âge de 21 ans, et le nombre d'arbres par bloc et par provenance. Pour estimer la moyenne des hauteurs par provenance, les moyennes de hauteur d'arbres ont été pondérées par le nombre d'arbres dans chaque bloc.

Le site 3 comprenait 5 blocs aléatoires, et chaque source de semences était représentée par 40 à 50 arbres. Pour ce site, nous ne disposions que de la hauteur moyenne des arbres survivants dans chaque bloc et pour chaque provenance à l'âge de 19 ans, mais pas du nombre d'arbres par bloc et par provenance; on ne pouvait donc pas calculer une moyenne pondérée par bloc. La médiane des moyennes des blocs, qui est moins influencée par les valeurs extrêmes, a donc été utilisée pour estimer la hauteur moyenne des arbres des provenances dans ce site.

1.1.2. Données climatiques utilisées pour développer les modèles

La liste des variables climatiques utilisées pour développer les modèles de transfert apparaît à l'annexe A. Le logiciel BioSIM a été utilisé pour générer, par interpolation des données récoltées dans les stations météo, les données climatiques associées aux différentes sources de semences (provenances) et aux sites de plantation* au Québec (tests de provenances). Ce logiciel de simulation, élaboré par le Service canadien des forêts, utilise les enregistrements des stations météorologiques les plus rapprochées des sources de semences et des sites de plantation pour estimer, par interpolation, les valeurs des normales climatiques rencontrées dans ces sites pour des périodes de 30 ans (Régnière 1996). Plus spécifiquement, pour les différentes sources de semences, nous avons choisi de générer 2 périodes de simulation : de 1941 à 1970 et de 1971 à 2000. La période la plus récente (1971-2000) correspond à celle où les changements climatiques ont été plus marqués, l'augmentation des

* Les données de croissance utilisées pour développer les modèles de transfert ont été recueillies sur des arbres représentant plusieurs provenances géographiques de l'espèce, qui ont été plantés dans des tests de provenances. Dans la section matériel et méthodes, les sites de plantation correspondent donc aux tests de provenances, alors que les sources de semences représentent les diverses provenances utilisées. L'utilisateur de ces modèles pourra ensuite choisir d'utiliser comme source de semences un verger à graines ou un peuplement naturel, et de les déplacer n'importe où sur le territoire (site de plantation).

températures ayant été beaucoup plus rapide qu'au début du siècle*. Ainsi, l'ancien modèle de transfert pour l'épinette blanche (Andalo et al. 2005) avait été développé en utilisant des données climatiques qui reflétaient déjà un climat en changement. Nous croyons donc que les données climatiques plus anciennes (1941-1970) sont plus représentatives des conditions dans lesquelles ont évolué les populations d'espèces forestières, et conséquemment, qu'elles devraient permettre d'améliorer la fiabilité et la capacité de prévision (le R^2) des modèles de transfert construits avec ces données climatiques. De plus, c'est pendant la période 1941-1970 qu'ont poussé les arbres qui ont fourni les graines pour établir les tests de provenances. Ainsi, les données de 1941-1970 ont été utilisées pour représenter les conditions climatiques des diverses sources de semences évaluées et pour développer les modèles de transfert. Les données de la période 1971-2000 ont servi à développer le modèle qui permet d'estimer la hauteur moyenne des sources locales de semences dans chaque site de plantation. Pour chaque combinaison de source (ou de site de plantation) et d'année, une centaine de simulations ont été réalisées avec le logiciel BioSIM, et la moyenne des normales de 30 ans a servi à la modélisation. Les valeurs moyennes des variables climatiques pour chacun des sites de plantation apparaissent aux annexes B, C et D, respectivement, pour l'épinette blanche, l'épinette noire et le pin gris.

1.1.3. Analyses statistiques

Notre but est de modéliser l'effet, sur la croissance en hauteur, de soumettre une source de semences donnée à un climat différent du lieu d'origine où les populations se sont maintenues pendant plusieurs générations. Cette différence de climat peut provenir 1) de son déplacement (ou transfert) sur le territoire, c.-à-d. de la récolte des semences dans un peuplement donné et de la plantation des semis issus de ces semences dans un environnement différent de son lieu d'origine, et 2) d'une modification rapide du climat local dans le temps, communément appelée « changement climatique ».

L'analyse statistique comportera donc les étapes suivantes : 1) estimation de la hauteur des provenances dans chaque site de plantation; 2) estimation de la hauteur de la source locale de semences dans chaque site de plantation; 3) choix des variables climatiques d'intérêt; et 4) développement des modèles de transfert qui exprimeront un écart relatif de hauteur (en %) d'une provenance

donnée par rapport à la provenance locale, lequel sera fonction d'un écart de climat engendré soit par un déplacement sur le territoire, soit par une modification du climat dans le temps, soit par la combinaison de ces deux facteurs.

1.1.3.1. Estimation de la hauteur des sources de semences dans chaque site de plantation

Pour développer les modèles de transfert des sources de semences, il fallait tout d'abord estimer la hauteur moyenne des arbres provenant de chaque source de semences dans chacun des sites de plantation. Pour l'épinette noire et l'épinette blanche, nous avons analysé les données recueillies sur l'ensemble des arbres dans chaque site de plantation à l'aide d'un modèle linéaire, en considérant toutes les sources de variation comme aléatoires. Les analyses ont été réalisées à l'aide de la procédure MIXED du logiciel SAS (SAS Institute Inc. 2004) et avec la méthode REML. La hauteur moyenne des sources de semences a été obtenue à l'aide de l'énoncé ESTIMATE. Cette approche n'a pu être utilisée avec le pin gris, car nous ne disposions pas des mesures de hauteur pour chaque arbre, mais bien de moyennes par parcelle et par bloc.

1.1.3.2. Estimation de la hauteur de la source locale de semences dans chaque site de plantation

Comme la source locale de semences n'était pas représentée dans les tests de provenances mis en place il y a une vingtaine d'années, il n'était pas possible d'évaluer directement l'écart de performance de chaque source de semences par rapport à la source dite « locale ». Nous ne pouvions pas non plus normaliser les hauteurs pour les rendre comparables entre les sites de plantations. Pour chacun de ceux-ci, il a donc fallu estimer la hauteur moyenne de la source locale de semences. Carter (1996) a utilisé un modèle de régression linéaire pour prévoir les hauteurs moyennes des sources de semences en fonction des conditions climatiques moyennes et des caractéristiques géographiques des sites. Cette méthode a été utilisée régulièrement par les généticiens pour développer des modèles de transfert qui prennent en compte l'effet anticipé des changements climatiques (Andalo et al. 2005, O'Neill et al. 2008, O'Neill et Nigh 2011); nous l'avons utilisée dans le présent travail.

Comme nous l'avons mentionné précédemment, les valeurs des variables climatiques utilisées pour développer les modèles étaient des normales climatiques, c'est-à-dire des moyennes calculées sur une période de 30 ans (de 1941 à 1970), à laquelle on a ajouté les coordonnées de latitude, longitude et

* [www.planete-energies.com/fr/energie-et-environnement/changement-climatique/les-signes-du-changement-climatique-137.html] (consulté le 16 décembre 2013).

altitude des sources de semences. Une régression linéaire a été développée pour chaque site à l'aide du modèle suivant :

$$\bar{Y}_{ij} = f(x_{1ij}, \dots, x_{kij}; \beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k) + e_{ij}$$

où

\bar{Y}_{ij} est la hauteur moyenne des arbres de la source de semence j dans le site de plantation i ,

x_{1ij}, \dots, x_{kij} représentent les valeurs des variables ou fonctions de variables climatiques ou géographiques incluses dans le modèle,

β_0 est le coefficient d'ordonnée à l'origine,

β_1, \dots, β_k sont les coefficients propres à chaque terme du modèle, et

e_{ij} représente l'erreur propre à chaque observation.

Une fois les modèles élaborés, les valeurs des variables explicatives propres à chaque site de plantation ont été entrées dans le modèle afin de générer la hauteur moyenne estimée de la source locale de semences. Les valeurs des variables explicatives sont celles des normales climatiques pour la période de 1941 à 1970 aux sites de plantation (Annexes B, C et D).

1.1.3.3. Développement des modèles de transfert

Nous avons calculé la performance de chaque source de semence j , c'est-à-dire l'écart relatif en hauteur (E_{ij} ou % de correction) par rapport à la hauteur moyenne de la source locale de semences du site de plantation i , de la façon suivante :

$$E_{ij} = 100 \times \left(\frac{\hat{Y}_{ij}}{\hat{Y}_i} - \hat{Y}_i \right) / \hat{Y}_i$$

où

\hat{Y}_{ij} est la hauteur moyenne estimée des arbres de la source de semences j du site de plantation i , et

\hat{Y}_i est la hauteur moyenne estimée des arbres de la source locale de semences du site de plantation i .

Nous avons ensuite développé un modèle de régression linéaire dans lequel cet écart relatif de hauteur est expliqué par la différence de climat existant entre le lieu d'origine de la source de semences utilisée et le site de plantation. Pour les sources de semences, on a utilisé les normales climatiques de la période de 1941 à 1970 et pour les sites de plantation, celles de 1971 à 2000.

Le modèle de transfert est de la forme suivante :

$$E_{ij} = f(\Delta x_{1ij}, \dots, \Delta x_{kij}; \beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k) + e_{ij}$$

où

E_{ij} est l'écart relatif de hauteur (en %) de la source de semence j au site de plantation i , par rapport à la source locale de semences au site de plantation i . Ce pourcentage d'écart relatif sera plus tard utilisé comme facteur de correction de l'IQS des plantations (% de correction_(Modèle de transfert) × IQS) afin de calculer le volume marchand (m³/ha) de celles-ci sous l'effet des changements climatiques ;

$\Delta x_{1ij}, \dots, \Delta x_{kij}$ représentent la valeur des différences des variables ou fonctions de variables climatiques incluses dans le modèle, entre le lieu d'origine de la source de semences utilisée et le site de plantation. Ces termes peuvent représenter des effets simples, quadratiques, ou des interactions ;

β_0 est le coefficient d'ordonnée à l'origine ;

β_1, \dots, β_k sont des coefficients propres à chaque terme du modèle ; et

e_{ij} représente l'erreur propre à chaque observation.

1.1.3.4. Approche utilisée pour développer les modèles et pour choisir les variables climatiques d'intérêt

Une approche systématique a été utilisée pour développer les modèles de hauteur moyenne de la source locale de semences et les modèles de transfert. Elle consistait à ajuster, pour chaque variable climatique, un modèle linéaire simple, puis d'y ajuster des modèles avec des effets simples, quadratiques ou d'interaction pour toutes les combinaisons de 2 et de 3 variables climatiques. Les postulats de normalité de la distribution et d'homogénéité de la variance des résidus ont été vérifiés.

Les modèles présentant les meilleures caractéristiques statistiques ont ensuite été analysés individuellement en détail. Les principaux critères de sélection de modèle utilisés étaient le critère d'information d'Akaike corrigé (AICc ou *corrected Akaike information criterion*) qui est une fonction de la vraisemblance du modèle et du nombre de paramètres, du coefficient de détermination (R^2), de la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (RMSE ou *root mean square error*) et de la statistique PRESS (somme prédite des carrés des résidus, ou *predicted residual sums of squares*), obtenue de la validation croisée du modèle de régression selon la méthode avec retrait d'un élément (*leave-one-out*). La validation croisée est une méthode pour estimer la fiabilité d'un modèle fondée sur une technique d'échantillonnage : on divise la population en sous-échantillons et l'on en utilise un pour estimer l'erreur moyenne, puis un autre pour valider le résultat avec l'échantillon principal. Parmi l'ensemble des modèles possibles qui respectent les postulats de normalité et d'homogénéité de la variance des résidus, on choisit ceux possédant les plus faibles valeurs des critères d'AICc et de la statistique PRESS ainsi que les plus fortes valeurs de R^2 .

Comme plusieurs variables climatiques étaient corrélées entre elles, et pour éviter d'obtenir un trop grand nombre de modèles ou des problèmes de colinéarité, les variables climatiques ont d'abord été regroupées en classes disjointes. La technique de classification utilisée pour ce faire est celle de la procédure VARCLUS de SAS qui regroupe dans une même classe les variables fortement corrélées, et sépare les variables peu ou pas corrélées. Une seule variable climatique par classe ainsi formée a été incluse dans le modèle de régression. Cependant, le fait que des variables provenant de groupes différents soient incluses dans un même modèle de régression n'implique pas nécessairement une totale absence de colinéarité. La présence de celle-ci a été vérifiée pour tous les modèles considérés. Une telle analyse de groupement a également été réalisée pour les différences entre les variables climatiques des sources de semences (période 1941-1970) et celles des sites de plantation (période 1971-2000).

L'écart relatif prédit en hauteur (par rapport à la source locale) en fonction des écarts de climat est illustré dans la section résultats pour chaque espèce. Comme les modèles retenus étaient composés de trois variables, nous avons présenté la variation de deux variables climatiques à la fois, en maintenant la troisième constante. La performance de la source locale de semences (écart de 0,0) est identifiée par un point sur les surfaces de réponse. Les valeurs

climatiques choisies pour les scénarios sont celles typiquement observées avec les données utilisées dans l'analyse, et ne proviennent pas de prévisions de modèles de changements climatiques. De la même manière, les valeurs d'écarts choisies dans les graphiques représentent le domaine de valeurs des données utilisées dans la modélisation. Sur les graphiques, les gains de hauteur sont illustrés par une trame bleue, alors que les pertes le sont par une trame orange.

1.2. Climat futur

Des études récentes sur les impacts et adaptations aux changements climatiques indiquent que les analyses utilisant les résultats d'un ensemble de simulations climatiques fournissent, à ce jour, le meilleur estimateur du climat simulé (Glecker et al. 2008). Plus spécifiquement, la médiane ou la moyenne d'un ensemble de simulations de modèles de climat global (MCG) ou de modèles régionaux du climat (MRC) produit, sur une gamme de variables climatiques et sur plusieurs régions du globe, des résultats plus constants qu'une seule simulation ou modèle, comparativement aux résultats de référence (tels que mesurés avec des appareils) (Logan et al. 2011). De plus, l'utilisation d'un ensemble de modèles climatiques fournit une évaluation de l'incertitude associée aux projections et permet aux décideurs de mieux évaluer l'amplitude des changements, à l'aide des valeurs médianes ou moyennes et des valeurs extrêmes.

En 2011, au début de cette étude, Ouranos disposait d'un ensemble de 81 simulations climatiques pour la création de projections futures. Parmi celles-ci, 6 simulations régionales sont issues du modèle régional canadien du climat (MRCC 4.2.3) (Music et Caya 2007), pour un domaine couvrant l'Amérique du Nord (200 x 192 points de grille) ou bien centré sur le Québec (111 x 87 points de grille), avec une résolution horizontale de 45 km (vrai à 60° de latitude N). Les simulations régionales ont été pilotées aux frontières entre le Canada et les États-Unis par les champs atmosphériques provenant de 2 simulations (membres 4 et 5) du modèle canadien couplé de climat global (CGCM3/T47 à environ 3,75 x 3,75 deg. latitude-longitude; 4^e membre; Scinocca et al. 2008, Flato et al. 2000, Flato et Boer 2001), ou par une simulation du modèle allemand couplé de climat global (ECHAM5 à environ 1,87 deg latitude-longitude; 1^{er} membre; Jungclaus et al. 2006). Les simulations régionales (et leur pilotes MCG) ont été produites en suivant les scénarios projetés de gaz à effet de serre et d'aérosols du GIEC SRES A2 (Nakicenovic et al. 2000).

Les autres simulations proviennent de l'archive de la 3^e phase du *Coupled Model Intercomparison Project* (CMIP3, Meehl *et al.* 2007), qui met à la disposition des chercheurs un grand nombre de simulations de MCG produites par plusieurs centres de modélisation à travers le monde. Les données simulées sont disponibles pour 3 scénarios d'émission de gaz à effet de serre (GES) issus du rapport spécial sur les scénarios d'émissions (SRES, *Special report on emissions scenarios: A1B, A2 et B1*; Nakicenovic *et al.* 2000).

En pratique, il est toutefois impensable d'utiliser une à une les 81 simulations disponibles pour projeter le climat futur. Il est préférable de cibler d'abord les modèles et scénarios climatiques les plus appropriés, en fonction de la nature du projet, donc des variables climatiques d'intérêt. Les 8 variables climatiques qui entrent dans les modèles de transfert de l'une ou l'autre des 3 espèces étudiées ont donc été prises en considération. Les modèles partageant la même information climatique ont été regroupés en utilisant la méthode développée dans le cadre d'un projet de recherche portant sur la détermination des habitats futurs des espèces (Périé *et al.* 2014). Plus précisément, chacune des 81 simulations climatiques a été utilisée pour générer la valeur du climat futur pour les variables d'intérêt, après quoi les valeurs obtenues ont été regroupées en fonction de leur similitude par une analyse par grappes (*K-means clustering*). Un seul modèle représentatif a ensuite été retenu dans chaque groupe. La description détaillée de la procédure est présentée dans Logan *et al.* (2011). Les groupes ont été construits selon les variations projetées pour la période 2081-2099, c'est-à-dire la période où l'incertitude associée aux projections est la plus grande.

Les modèles et les scénarios climatiques retenus dans la présente étude ont permis de générer les données climatiques pour deux périodes dans le futur, soit 2046-2065 et 2081-2099. Le logiciel BioSIM a servi d'outil d'interpolation pour obtenir les données climatiques pour l'ensemble du territoire québécois.

1.3. Production des cartes du rendement futur en volume marchand des plantations

Pour évaluer l'effet d'un changement du climat sur le rendement futur en volume marchand des plantations, nous avons d'abord calculé la hauteur relative des arbres d'une source de semences par rapport à la source locale. Un pourcentage de correction (% de correction_(Modèle de transfert)) a ensuite été généré par les nouveaux modèles de

transfert, avec la hauteur dominante à un âge de référence donné (IQS) obtenue par les modèles d'IQS biophysique de Beaulieu *et al.* (2011). En d'autres mots, nous avons corrigé l'IQS prédit des sites (IQS_(Beaulieu et al. 2011)) en fonction de l'adaptation des populations évaluées dans les sites de plantation et avons exprimé cette adaptation sous forme de pourcentage de correction par rapport à la population locale. Nous avons ainsi obtenu une estimation corrigée de l'IQS (IQS_{corrigé}) dans les conditions résultant des changements climatiques :

$$IQS_{\text{corrigé}} = IQS_{\text{(Beaulieu et al. 2011)}} \times \% \text{ de correction}_{\text{(Modèle de transfert)}}$$

En utilisant les équations du tarif de cubage implantées dans le logiciel BioSIM, selon la séquence présentée à l'annexe E, on a ensuite calculé et cartographié le volume marchand attendu des plantations à différentes périodes dans le futur. L'âge de référence pour l'IQS des plantations est de 25 ans. Pour l'épinette noire et le pin gris, il s'agit de l'âge total des arbres (depuis la graine); pour l'épinette blanche, il s'agit plutôt de l'âge de la plantation (Prégent *et al.* 1996, 2010).

Une opération supplémentaire a été nécessaire dans le cas de l'épinette blanche. En effet, les équations d'IQS élaborées dans Beaulieu *et al.* (2011) étaient basées sur le modèle de Bolghari et Bertrand (1984), qui estimaient l'IQS à partir des 300 meilleures tiges par hectare, plutôt qu'avec les 100 meilleures. Or, Prégent *et al.* (2010) ont démontré que ceci surestimait la hauteur dominante à des âges plus jeunes que l'âge de référence (25 ans) et la sous-estimait pour les arbres plus vieux. Un modèle supplémentaire a donc été construit pour corriger l'IQS biophysique de l'épinette blanche (Prégent *et al.* 2010). Pour le verger d'Escourt par exemple, l'IQS biophysique est passé de 8,42 à 9,38 m à 25 ans, ce qui a fait passer le volume marchand de 187 à 270 m³/ha dans le climat actuel.

L'écart-type associé au volume marchand a été déterminé par la méthode de simulation de Monte-Carlo (Rubinstein et Kroese 2007). Cette méthode permet de tirer des nombres aléatoires de manière itérative, de façon à simuler les distributions des différentes variables dépendantes, les erreurs associées aux estimations des paramètres des différents modèles, ainsi que les erreurs résiduelles. Un million de simulations ont ainsi été réalisées.

Finalement, nous avons voulu quantifier, pour chaque horizon de temps, la contribution de chacune des sources de variation à l'erreur totale, c'est-à-dire les erreurs associées soit aux différents modèles de productivité (volume marchand,

volume total, surface terrière, hauteur dominante, IQS biophysique, % de correction_(Modèle de transfert), soit aux facteurs climatiques (qui incluent à la fois les variables climatiques, par exemple la température et les précipitations, et les modèles climatiques utilisés). Pour y arriver, nous avons fait varier une source d'erreur à la fois et avons mesuré la variance résultante du volume marchand, qui était donc associée à cette source d'erreur. La contribution de chaque source d'erreur correspond au rapport de cette variance sur la variance totale associée à l'ensemble des sources d'erreur.

Deux types de cartes ont été produites : d'abord, celles du rendement futur attendu (volume marchand, en m³/ha) des sources locales (sans déplacement), et ensuite, celles du rendement futur selon la source de semences utilisée (avec déplacements). Considérant que le reboisement se fait maintenant avec des graines récoltées presque

entièrement dans les vergers à graines (à l'exception de l'épinette noire dans le domaine de la pessière), nous avons préféré considérer que les vergers locaux représentaient la source de semence locale, plutôt que des peuplements naturels locaux qui, de toute manière, sont maintenant peu utilisés comme sources de semences pour le reboisement. Ces vergers locaux ont donc été utilisés pour simuler les rendements en volume marchand des plantations réalisées avec des sources locales; comme les arbres sélectionnés qui composent les vergers proviennent de plusieurs peuplements locaux, le climat associé au verger a été évalué à partir des coordonnées géographiques du centre pondéré des semenciers.

Le territoire couvert par les présentes simulations de rendement s'étend du sud du Québec à la limite nord du domaine de la pessière.

Chapitre deux

Résultats

2.1. Modèles de transfert de sources de semences

2.1.1. Épinette blanche

2.1.1.1. Estimation des hauteurs moyennes des arbres

L'analyse de variance réalisée sur les hauteurs d'arbres des épinettes blanches pour chaque site de plantation montre que dans chacun des 3 sites, la variance des hauteurs associée aux sources de semences ($p < 0,0085$) et celle associée aux familles qui les composent ($p < 0,0037$) sont significativement supérieures à zéro.

Comme nous l'avons mentionné précédemment, la source locale de semences n'était pas représentée dans les tests de provenances mis en place il y a une vingtaine d'années. Il nous a donc fallu estimer la hauteur moyenne à l'aide de la méthode de Carter (1996). L'annexe F présente un résumé des principales propriétés des 3 modèles de régression développés pour prévoir la hauteur moyenne de la source locale de semences d'épinette blanche dans chaque site de plantation. Les valeurs de R^2 des modèles varient de 50 % à 67 %.

Les résultats de la méthode de validation croisée montrent que les 3 modèles de régression ont des bonnes qualités d'ajustement et de prévision, ce qui permet donc de les considérer comme valables (non présenté).

2.1.1.2. Modèle de transfert retenu

Parmi l'ensemble des modèles de transfert testés, celui qui a été retenu inclut 3 variables, avec un effet simple et quadratique de l'écart (Δ) de l'indice d'aridité, un effet simple de l'écart de température maximale d'été et un autre de l'écart de température moyenne d'hiver (Équation 1). Il

inclut aussi des effets d'interaction double entre les écarts d'indice d'aridité et de température maximale d'été, de même qu'entre les écarts de température maximale d'été et de température moyenne d'hiver, et finalement, un effet d'interaction triple.

L'analyse des résidus respectait les hypothèses de base de la régression, mais révélait que la source de semences «Parc des Laurentides» avait une hauteur nettement supérieure aux autres sources. Cela nous a fait douter de la validité des mesures, d'autant plus que cet écart influençait légèrement les estimations des coefficients de régression. Nous avons jugé préférable d'enlever cette source de semences des analyses. Aucune colinéarité n'a été détectée entre les 3 variables explicatives. La méthode de validation croisée indique que le modèle de transfert possède de bonnes qualités d'ajustement et de prévision.

Parmi l'ensemble des modèles testés, d'autres avaient un AICc plus faible et une valeur de R^2 plus élevée, mais ils possédaient tous un effet quadratique pour des variables associées aux températures froides (Plus basse température minimale annuelle, Température minimale d'hiver ou Température minimale moyenne) qui entraînait des aberrations. Nous avons donc choisi de ne pas en tenir compte.

2.1.1.3. Influence des variables climatiques sur la croissance relative en hauteur des sources de semences

Les figures 2 à 4 illustrent l'influence des variables climatiques qui composent le modèle de transfert sur la croissance relative en hauteur des sources de semences par rapport à la source locale. Comme nous l'avons mentionné précédemment, nous attribuons une valeur de «0» à l'une des trois variables

ÉQUATION 1

Écart relatif prédit en hauteur (% p/r à la source locale de semences) = $1,13355 + 0,16853 (\Delta \text{ Indice d'aridité}) - 0,22752 (\Delta \text{ Indice d'aridité})^2 + 2,38863 (\Delta \text{ Température maximale d'été}) - 0,97395 (\Delta \text{ Température moyenne d'hiver}) + 0,37579 (\Delta \text{ Indice d'aridité} \times \Delta \text{ Température maximale d'été}) - 0,24013 (\Delta \text{ Température maximale d'été} \times \Delta \text{ Température moyenne d'hiver}) - 0,08115 (\Delta \text{ Indice d'aridité} \times \Delta \text{ Température maximale d'été} \times \Delta \text{ Température moyenne d'hiver})$

Ensemble des données :

RMSE = 3,78

$R^2 = 0,5618$

Validation croisée :

RMSE = 3,88

$R^2 = 0,5094$

explicatives (c'est-à-dire un écart de 0 par rapport à la source locale, donc une valeur identique à la valeur pour celle-ci), et faisons varier les deux autres variables. Sur les graphiques, la performance de la source locale de semences (écart de 0,0) est identifiée par un point sur la surface de réponse; un gain de hauteur est illustré par une trame bleue, et une perte, par une trame orangée. L'échelle attribuée à chaque variable climatique apparaît sur les axes du graphique en 3D, et son interprétation, à la droite du graphique. Dans ces figures, un graphique en 2D précise aussi les valeurs aux quatre coins de la surface de réponse 3D ainsi que l'écart relatif entre ceux-ci, exprimé en pourcentage (%).

2.1.1.3.1. *Lorsqu'on fait varier 2 des 3 variables climatiques qui entrent dans le modèle de transfert*

Lorsque l'indice d'aridité du site à reboiser est comparable à celui de la source de semences utilisée, il est recommandé de **favoriser les déplacements vers un milieu où la température maximale d'été est plus froide qu'à l'origine de la source utilisée**, ce qui procurera un gain de hauteur dans la majorité des cas (Figure 2, surface bleue). En de rares exceptions, par exemple lorsque la température moyenne d'hiver du site de reboisement est trop froide, ce déplacement vers un milieu plus froid l'été causera plutôt une perte de hauteur (Figure 2, point B); il sera alors préférable d'utiliser la source locale, mieux adaptée. Le gain maximal de croissance en hauteur (14,6 % par rapport à l'utilisation d'une source locale) est obtenu lorsqu'on déplace une source de semences vers un site où la température maximale d'été est plus froide de 2 °C, et où la température moyenne d'hiver est plus chaude de 6 °C par rapport à la source utilisée (Figure 2, point A).

Malgré cette tendance générale, on peut quand même transférer une source de semences vers un site plus chaud l'été et y obtenir un gain de croissance en hauteur. Pour ce faire, il faudra toutefois **limiter les déplacements aux sites où l'augmentation de la température maximale d'été ne dépasse pas 0 à 0,5 °C** (Figure 2, vue 2D). Au-delà de cette limite, la hauteur de la source de semences déplacée sera inférieure à celle de la source locale (Figure 2, surface orangée). La plus grande amplitude de transfert, soit du point A au point D, qui représente un réchauffement total de 6 °C, aura pour effet de réduire la croissance en hauteur des arbres de 22,9 %. Dans cet environnement plus chaud l'été, la température moyenne d'hiver influencera peu la croissance des plantations, quelle que soit la source de semences utilisée (variation de 0,2 % : figure 2, points C et D).

Quelle est maintenant l'influence de l'indice d'aridité sur la croissance? **Un déplacement vers un site où la température maximale d'été est inférieure à celle de la source de semences utilisée procurera un gain de croissance, comme nous l'avons observé précédemment, et dans la majorité des cas, l'aridité du site aura très peu d'effet. Le gain sera toutefois plus élevé sur les sites moins arides** (précipitations supérieures à l'évaporation : figure 3, point B).

Finalement, la figure 4 présente la relation entre les écarts de la température moyenne d'hiver et de l'indice d'aridité lorsque la température maximale d'été du site est comparable à celle de la source de semences utilisée. On y constate **qu'un déplacement vers un endroit où les hivers sont plus chauds, comparativement à la source locale, améliore la croissance des sources de semences dans la majorité des cas**. La plus grande amplitude de déplacement évaluée dans la présente étude améliorera la croissance relative de 11,7 % (du point A au point D et du point B au point C : passage d'une température moyenne d'hiver de 6 °C plus froide à une température de 6 °C plus chaude, par rapport au site de la source locale de semences). Sous ces 2 extrêmes de températures moyenne d'hiver, l'indice d'aridité a un effet semblable et peu marqué sur la croissance en hauteur (-1,7 % du point A au point B et du point D au point C : vue 2D).

2.1.1.3.2. *Lorsqu'on fait varier les 3 variables climatiques qui entrent dans le modèle de transfert*

Comme il est difficile d'illustrer graphiquement l'effet combiné des 3 variables climatiques, nous avons simplement généré, à partir du modèle de transfert, les valeurs minimale et maximale d'écart relatif de hauteur par rapport à la source locale de semences, afin d'observer les écarts climatiques associés et de dégager une tendance, s'il y en a une. Nous sommes restés encore ici à l'intérieur des intervalles observés de valeurs climatiques qui étaient associés aux sources de semences utilisées et aux sites de plantation. Le tableau 1 montre que les plus grands écarts relatifs prédits en hauteur sont obtenus pour un transfert de même amplitude de 2 des 3 variables climatiques, soit vers un site plus sec de 4 mm et plus chaud de 6 °C l'hiver. La température maximale d'été interagit très fortement avec la température moyenne d'hiver. C'est cependant la température maximale d'été qui fera la différence entre un gain (18,6 % sur un site plus froid de 2 °C par rapport à son environnement d'origine) ou une perte de hauteur (25,1 % sur un site plus chaud de 4 °C par rapport à son environnement d'origine).

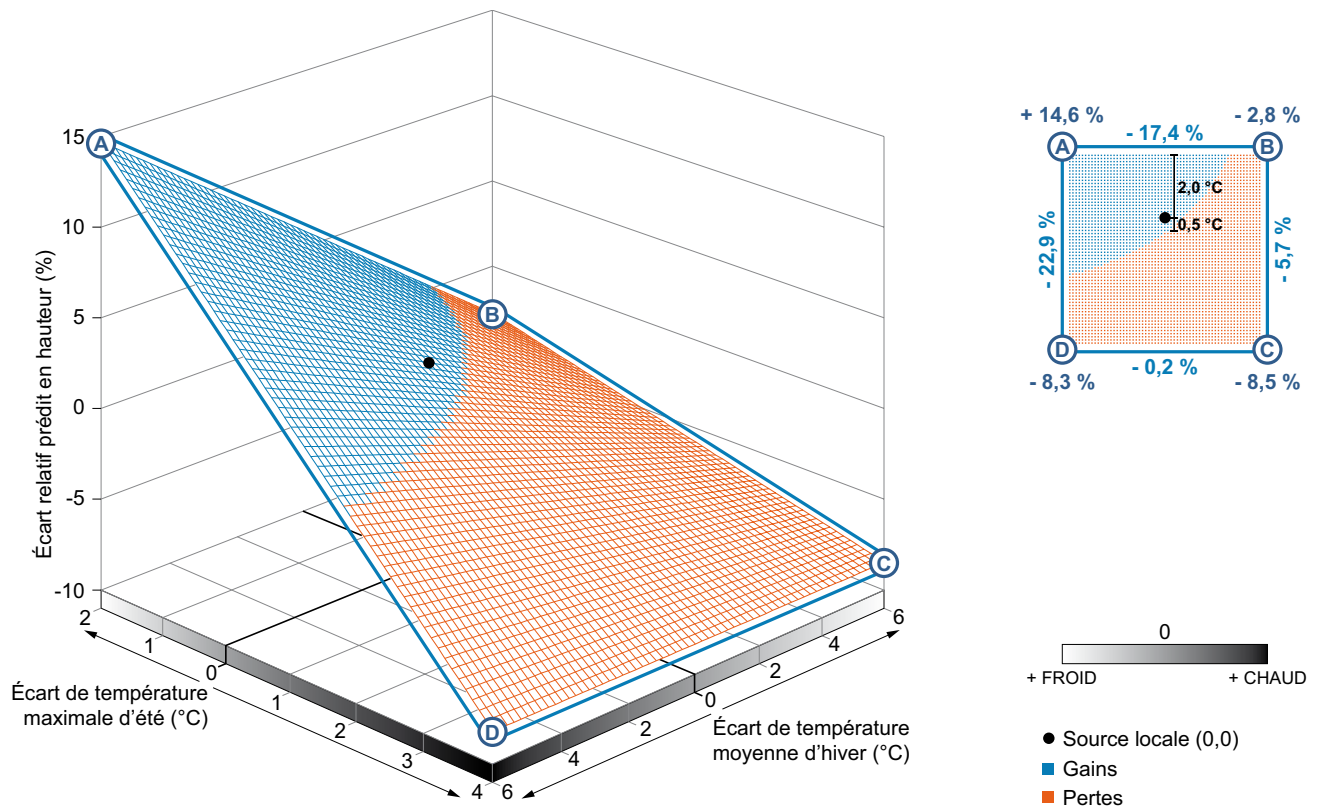


Figure 2. Écart relatif prédit en hauteur (par rapport à la source locale de semences) des plantations d'épinette blanche en fonction des écarts de la température maximale d'été et de la température moyenne d'hiver, lorsque l'indice d'aridité est maintenu constant.

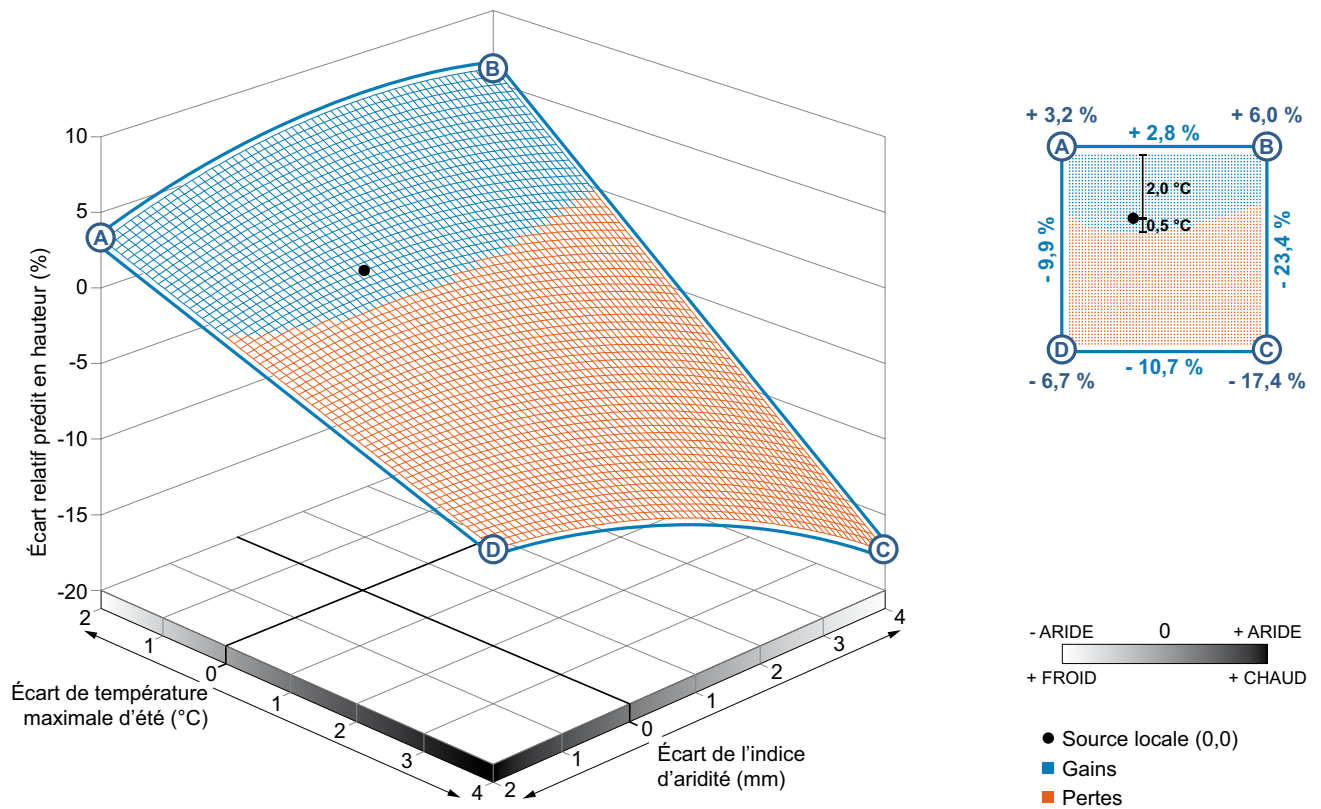


Figure 3. Écart relatif prédit en hauteur (par rapport à la source locale de semences) des plantations d'épinette blanche en fonction des écarts de la température maximale d'été et de l'indice d'aridité, lorsque la température moyenne d'hiver est maintenue constante.

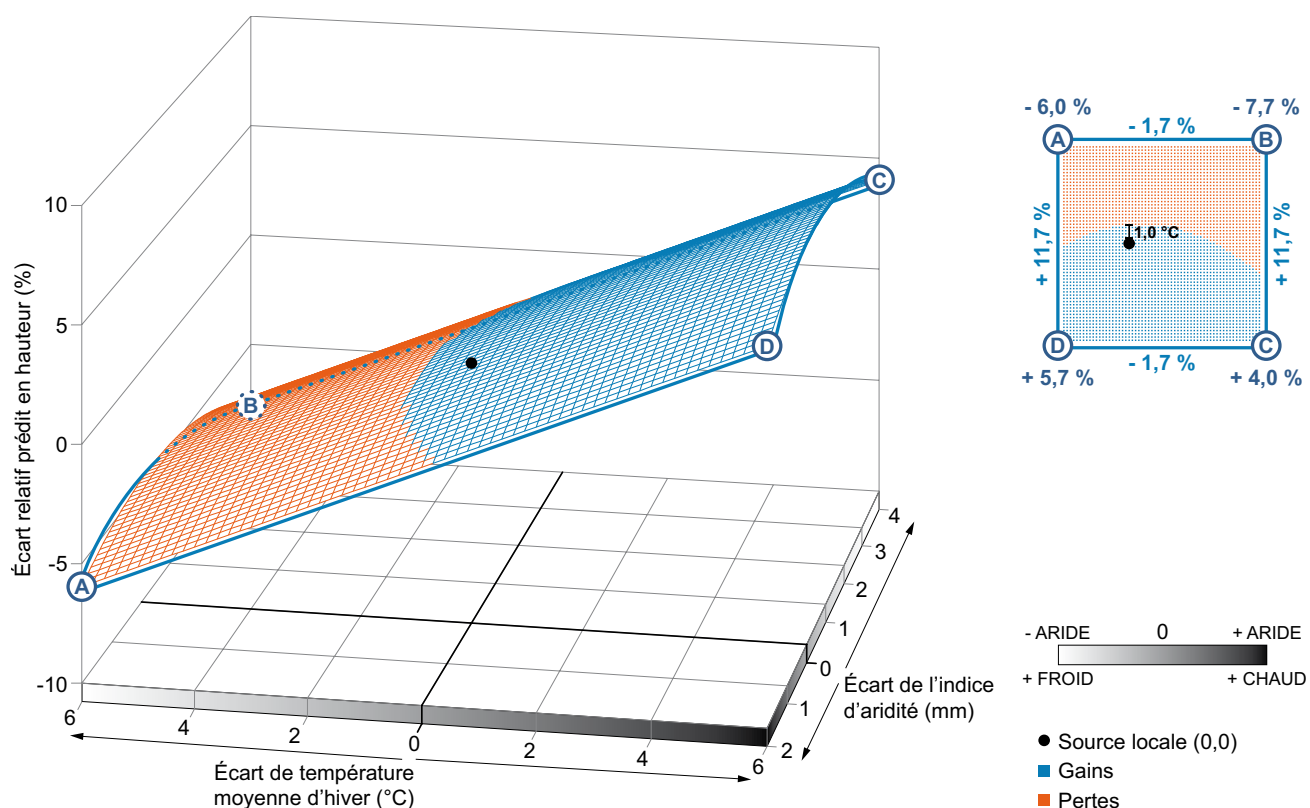


Figure 4. Écart relatif prédit en hauteur (par rapport à la source locale de semences) des plantations d'épinette blanche en fonction des écarts de la température moyenne d'hiver et de l'indice d'aridité, lorsque la température maximale d'été est maintenue constante.

Tableau 1. Minimum et maximum de l'écart relatif prédit en hauteur des plantations d'épinette blanche en fonction d'un écart de climat (source–plantation) pour les trois variables climatiques qui entrent dans le modèle de transfert.

Écart relatif prédit en hauteur (par rapport à la provenance locale)	Δ Indice d'aridité (source–plantation)	Δ Température maximale d'été (source–plantation)	Δ Température moyenne d'hiver (source–plantation)
Minimum -25,1 %	Site moins aride de 4 mm	Réchauffement de 4 °C	Réchauffement de 6 °C
Maximum +18,6 %	Site moins aride de 4 mm	Refroidissement de 2 °C	Réchauffement de 6 °C

2.1.2. Épinette noire

2.1.2.1. Estimation de la hauteur moyenne des arbres

Dans chacun des 4 sites de plantation, des différences significatives de hauteur ont été observées entre les sources de semences, entre autres. Les valeurs de R^2 des modèles de régression retenus pour la hauteur varient de 56 % à 72 % (Annexe G). Les résultats de la validation croisée montrent que ces 4 modèles de régression ont des bonnes qualités d'ajustement et de prévision (non présentés).

2.1.2.2. Modèle de transfert retenu

Pour l'épinette noire, le modèle de transfert retenu est composé des effets linéaires et quadratiques de l'écart des degrés-jours > 0 °C, des effets

linéaires simples de l'écart de la plus basse température minimale annuelle et de l'écart des précipitations totales annuelles, et des termes d'interaction double entre l'écart des degrés-jours > 0 °C et celui des précipitations totales annuelles, d'une part, et entre l'écart de la plus basse température minimale annuelle et celui des précipitations totales annuelles, d'autre part (Équation 2).

Même si l'écart des précipitations totales annuelles ne s'avère pas significatif dans l'analyse statistique, les précipitations jouaient un rôle indirect et important sur la croissance des plantations d'épinette noire, en raison de leur interaction avec les 2 autres facteurs climatiques. Parmi l'ensemble des modèles testés, celui qui a été retenu

ÉQUATION 2

Écart relatif prédit en hauteur (% p/r à la source locale de semences) = $-0,48705 + 0,01210 (\Delta \text{ Degrés-jours} > 0 \text{ } ^\circ\text{C}) - 0,00001021 (\Delta \text{ Degrés-jours} > 0 \text{ } ^\circ\text{C})^2 - 0,33058 (\Delta \text{ Plus basse température minimale annuelle} + 0,00305 (\Delta \text{ Précipitations totales annuelles}) + 0,00003150 (\Delta \text{ Degrés-jours} > 0 \text{ } ^\circ\text{C} \times \Delta \text{ Précipitations totales annuelles}) - 0,00063743 (\Delta \text{ Plus basse température minimale annuelle} \times \Delta \text{ Précipitations totales annuelles})$

Ensemble des données :

RMSE = 3,41

R² = 0,7110Validation croisée :

RMSE = 3,50

R² = 0,6826

présente les plus faibles valeurs d'AICc et de la statistique PRESS, ainsi qu'un R² de 68,3 % avec la validation croisée. Cette dernière indique que le modèle de transfert retenu possède de bonnes qualités d'ajustement et de prévision et a donc été considéré comme valable.

2.1.2.3. Influence des variables climatiques sur la croissance relative en hauteur des sources de semences

Les figures 5 à 7 illustrent l'influence des variables climatiques qui composent le modèle de transfert sur la croissance relative en hauteur des arbres issus des sources de semences d'épinette noire par rapport à la source locale. Elles suivent les mêmes conventions que celles expliquées à la section 2.1.1.3 pour les figures 2 à 4.

2.1.2.3.1. Lorsqu'on fait varier 2 des 3 variables climatiques qui entrent dans le modèle de transfert

Pour obtenir un gain de croissance des plantations d'épinette noire, **il est préférable de déplacer les sources de semences vers des sites plus secs et plus froids durant la saison de croissance** (où à la fois les précipitations totales annuelles et la somme des degrés-jours > 0 °C des sites de plantation sont inférieures à celles du site d'origine de la source utilisée : figure 5, surface bleue). **Il n'est pas recommandé de transférer une source de semences d'épinette noire vers un site plus chaud (où les degrés-jours > 0 °C sont supérieurs à ceux du site d'origine de la source utilisée). En effet, dans la majorité des cas, on aura alors une perte de croissance par rapport à la source locale** (Figure 5, vue 2D, surface orangée sous le point 0,0). **L'épinette noire semble donc plus sensible que l'épinette blanche à une plus grande accumulation de chaleur durant la saison de croissance.** Un déplacement vers un site plus froid durant la saison de croissance sera bénéfique à la croissance de l'épinette noire, à condition que ce site soit aussi plus sec que le site d'origine. Par

exemple, dans les tests qui ont été utilisés pour développer le modèle, la hauteur relative maximale a été obtenue lors d'un transfert vers un milieu plus froid (réduction de 750 DJ), et recevant 200 mm de précipitations en moins (Figure 5, point B). Un déplacement équivalent en degrés-jours, mais cette fois vers un site plus humide (recevant plus de précipitations totales annuelles) devra se faire avec discernement : selon la valeur des degrés-jours, il faut limiter ce déplacement aux sites où l'augmentation des précipitations totales annuelles ne dépasse pas 175 mm (Figure 5, vue 2D, surface orangée sous la valeur 175 mm). Si les précipitations augmentaient davantage, il y aurait une perte relative de hauteur. L'interaction entre les degrés-jours > 0 °C et les précipitations totales annuelles est d'ailleurs très significative ($p < 0,0001$) dans la régression.

Quelle est maintenant l'influence de la plus basse température minimale annuelle sur la croissance de l'épinette noire? Même si des gains de hauteur peuvent généralement être attendus du transfert d'une source de semences vers un site où l'hiver est moins rude (c.-à-d. où la plus basse température minimale annuelle est moins élevée), l'épinette noire semble tolérer des températures minimales annuelles beaucoup plus froides que l'épinette blanche. En effet, si les précipitations totales annuelles demeurent constantes, le transfert d'une source de semences vers un site où la température minimale annuelle est jusqu'à 9 °C plus froide qu'au site d'origine pourra quand même procurer un gain de croissance (Figure 6, vue 2D), à condition que le site de transfert soit aussi plus froid durant la saison de croissance (somme des degrés-jours > 0 °C inférieure à celle du site d'origine). On peut aussi espérer obtenir un gain de croissance si le déplacement se fait vers un site plus chaud durant la saison de croissance, à condition que la température minimale annuelle soit plus chaude elle aussi, et que les 2 sites aient un écart maximal de 200 DJ durant la saison de croissance (Figure 6, vue 2D, surface hachurée).

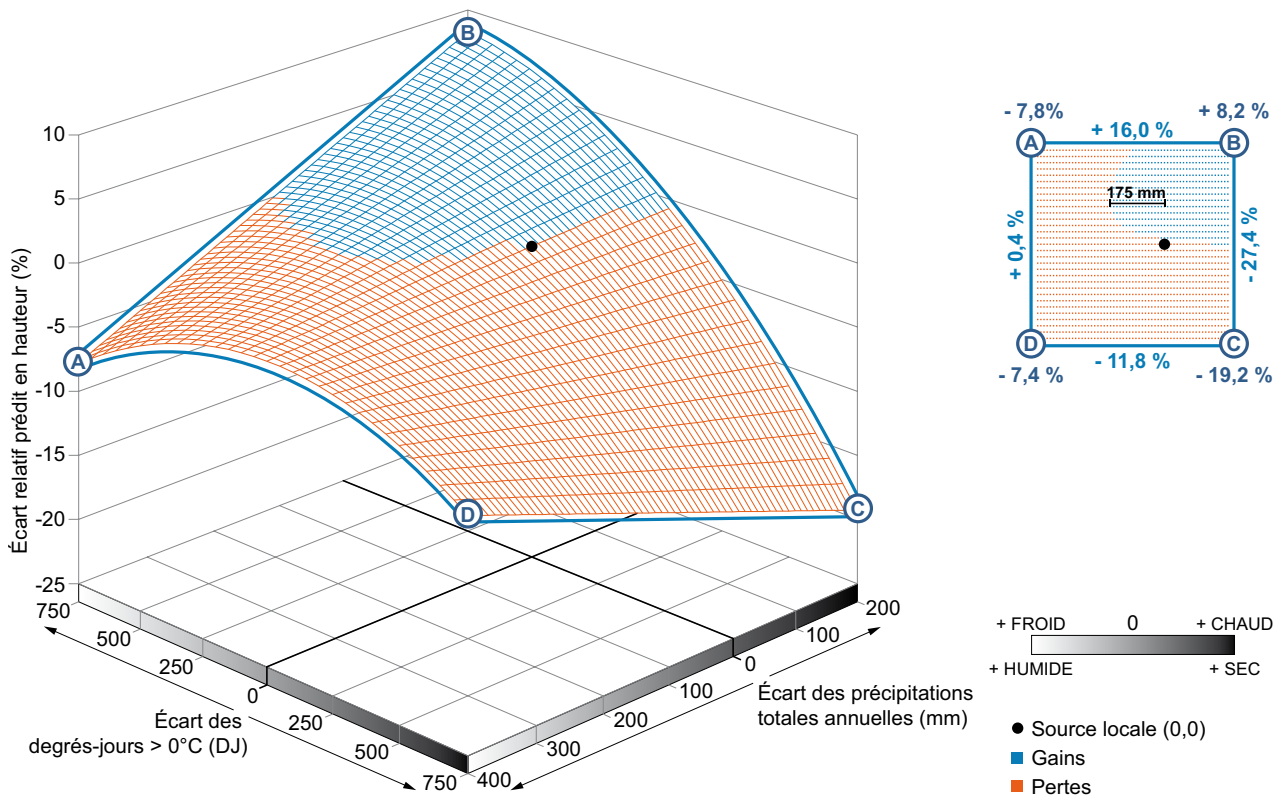


Figure 5. Écart relatif prédit en hauteur (par rapport à la source locale de semences) des plantations d'épinette noire en fonction des écarts des degrés-jours > 0 °C et des précipitations totales annuelles, lorsque la plus basse température minimale annuelle est maintenue constante.

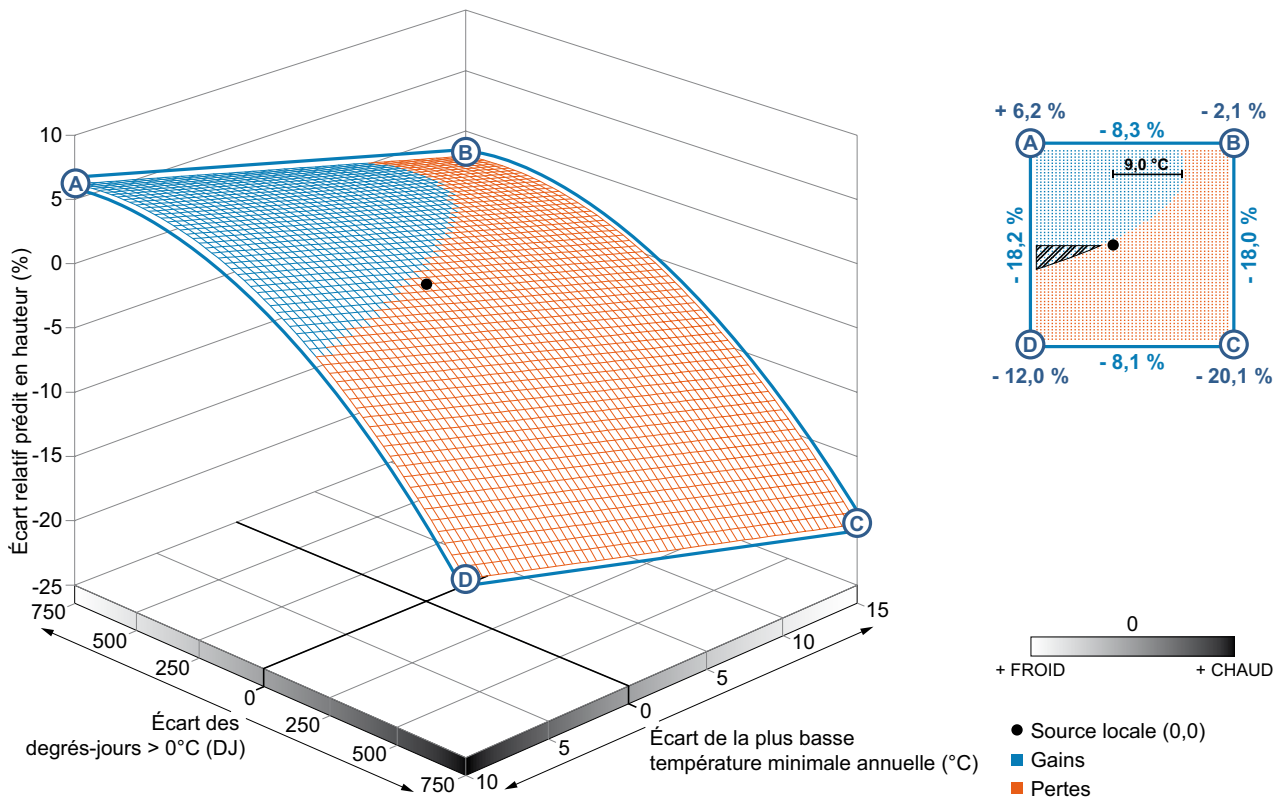


Figure 6. Écart relatif prédit en hauteur (par rapport à la source locale de semences) des plantations d'épinette noire en fonction des écarts des degrés-jours > 0 °C et de la plus basse température minimale annuelle, lorsque les précipitations totales annuelles sont maintenues constantes.

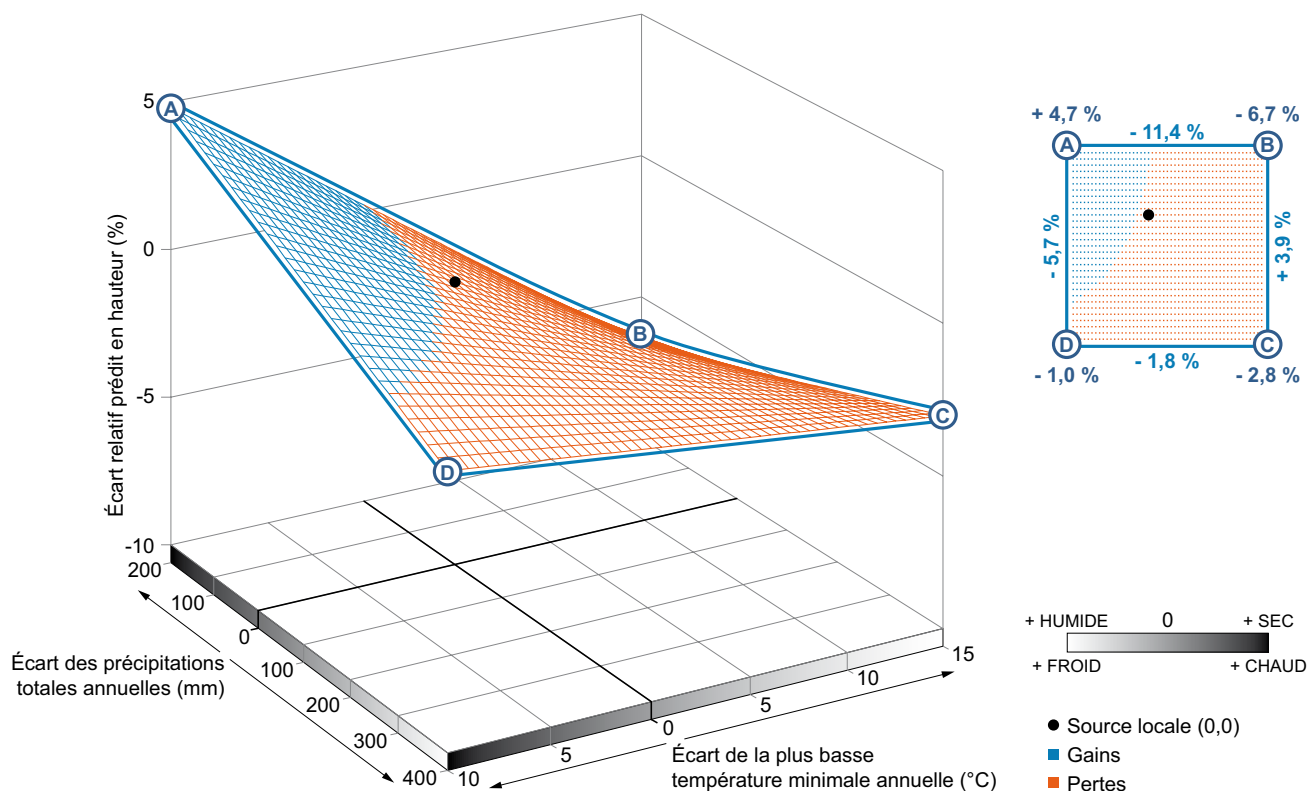


Figure 7. Écart relatif prédit en hauteur (par rapport à la source locale de semences) des plantations d'épinette noire en fonction des écarts des précipitations totales annuelles et de la plus basse température minimale annuelle, lorsque les degrés-jours $> 0^{\circ}\text{C}$ sont maintenus constants.

La figure 7 présente l'écart relatif prédit en hauteur (par rapport à la source locale de semences) des plantations d'épinette noire en fonction des écarts des précipitations totales annuelles et de la plus basse température minimale annuelle, lorsque les degrés-jours $> 0^{\circ}\text{C}$ sont maintenus constants. On constate qu'il est préférable de favoriser les transferts vers des sites plus chauds l'hiver (où la plus basse température minimale annuelle est supérieure à celle du site d'origine de la source utilisée) mais aussi plus secs (Figure 7, vue 2D). La plus basse température minimale annuelle influence fortement la croissance de l'épinette noire, puisque même si l'on plante l'espèce sur un site plus sec, la perte rapide de croissance sera fonction de la baisse de la plus basse température minimale annuelle (perte de 11,4 % pour une différence de 25°C entre les points A et B : figure 7). Par contre, lorsque les précipitations totales annuelles sont plus abondantes, la plus basse température minimale annuelle influence moins la croissance (perte de 1,8 % pour une différence de 25°C entre le point D et le point C). Globalement, l'interaction entre les 2 variables n'est significative qu'au seuil de 5 %.

2.1.2.3.2. Lorsqu'on fait varier les 3 variables climatiques qui entrent dans le modèle de transfert

Comme pour l'épinette blanche, nous avons généré, à partir du modèle de transfert de l'épinette noire, les valeurs minimale et maximale d'écart relatif de hauteur par rapport à la source locale de semences, afin de dégager des tendances parmi les écarts climatiques observés (Tableau 2). Contrairement à l'épinette blanche, chez laquelle les deux plus grands écarts relatifs prédits en hauteur sont obtenus par un transfert de même amplitude pour 2 des 3 variables climatiques, on observe que pour l'épinette noire, 2 des 3 facteurs climatiques présentent des variations de sens opposé (variation de -750 à $+750$ DJ de Δ Degrés-jours $> 0^{\circ}\text{C}$, et variation de $+15$ à -10°C de Δ Plus basse température minimale annuelle). À l'intérieur des limites climatiques de la présente étude, le gain relatif maximal espéré pour l'épinette noire serait obtenu lorsqu'on transfère une source de semences vers un site plus froid durant la saison de croissance, mais où la somme des degrés-jours est inférieure de 750 DJ et où la plus basse température minimale annuelle est supérieure de 10°C à celle de l'origine de la source de semences utilisée. Dans de telles conditions, l'épinette noire aura une bonne croissance sur les

Tableau 2. Minimum et maximum de l'écart relatif prédit en hauteur des plantations d'épinette noire en fonction d'un écart de climat (source-plantation) pour les trois variables climatiques qui entrent dans le modèle de transfert.

Écart relatif prédit en hauteur (par rapport à la provenance locale)	Δ Degrés-jours $> 0^{\circ}\text{C}$ (source-plantation)	Δ Plus basse température minimale annuelle (source-plantation)	Δ Précipitations totales annuelles (source-plantation)
Minimum -26,3 %	Réchauffement de 750 DJ	Refroidissement de 15°C	Site plus sec de 200 mm
Maximum +12,8 %	Refroidissement de 750 DJ	Réchauffement de 10°C	Site plus sec de 200 mm

sites plus secs (diminution de 200 mm des précipitations totales annuelles). Ce gain de croissance maximal (12,8 %) semble toutefois moins élevé que celui obtenu pour l'épinette blanche (18,6 %, tableau 1). En contrepartie, la plus grande perte de croissance serait obtenue lorsqu'on transfère une source de semences d'épinette noire vers un site où les degrés-jours $> 0^{\circ}\text{C}$ sont plus élevés de 750 DJ que ceux du lieu d'origine de la source utilisée, et où la température minimale annuelle y est plus basse de 15°C . L'interaction très significative entre l'écart des degrés-jours $> 0^{\circ}\text{C}$ et l'écart des précipitations totales annuelles suggère que des précipitations plus faibles durant la saison de croissance viendraient accentuer le stress causé par un transfert vers un site plus chaud. Dans ces conditions, la plus grande perte relative en hauteur serait semblable à celle de l'épinette blanche (Tableau 1 : -25,1 % pour l'épinette blanche; tableau 2 : -26,3 % pour l'épinette noire).

2.1.3. Pin gris

2.1.3.1. Estimation de la hauteur moyenne des sources de semences et des sources locales de semences

L'annexe H présente un résumé des principales propriétés des 3 modèles qui ont servi à prévoir la hauteur des arbres issus des sources locales de semences et les tables d'analyse de variance. Les valeurs de R^2 des modèles retenus varient de 64 % à 75 %. Les résultats de la validation croisée

montrent que les 3 modèles de régression ont de bonnes qualités d'ajustement et de prévision (non présenté).

2.1.3.2. Modèle de transfert retenu

Parmi l'ensemble des variables climatiques analysées dans les modèles de transfert, l'écart de la température minimale d'hiver s'est avéré la seule variable qui soit très significative en effet simple dans la régression. Elle interagit également de manière très significative avec 2 autres variables qui entraînent dans le modèle de transfert, soit l'écart de la quantité de neige convertie en eau et l'écart de la température maximale d'été. Ainsi, le modèle de transfert retenu pour le pin gris est composé des effets linéaires de l'écart de la température minimale d'hiver, de l'écart de la quantité de neige convertie en eau et de l'écart de la température maximale d'été, en plus de termes d'interaction double entre les écarts de la température minimale d'hiver et de la quantité de neige convertie en eau, d'une part, et entre les écarts de la température minimale d'hiver et de la température maximale d'été, d'autre part, et finalement, du terme d'interaction triple (Équation 3).

L'analyse des résidus du modèle a fait ressortir la présence de 2 données aberrantes; il s'agit des valeurs de la variable réponse de la source de semences numéro 3 aux sites de plantation 1 et 2, qui provient de l'est de la Nouvelle-Écosse; la hauteur moyenne des arbres de cette source au site

ÉQUATION 3

Écart relatif prédit en hauteur (% p/r à la source locale de semences) = $0,69898 - 1,18735 (\Delta \text{ Température minimale d'hiver}) + 0,02028 (\Delta \text{ Quantité de neige convertie en eau}) + 0,41316 (\Delta \text{ Température maximale d'été}) - 0,00754 (\Delta \text{ Température minimale d'hiver} \times \Delta \text{ Quantité de neige convertie en eau}) + 0,38870 (\Delta \text{ Température minimale d'hiver} \times \Delta \text{ Température maximale d'été}) + 0,00187 (\Delta \text{ Quantité de neige convertie en eau} \times \Delta \text{ Température minimale d'hiver} \times \Delta \text{ Température maximale d'été})$

Ensemble des données :

RMSE = 11,73

$R^2 = 0,3371$

Validation croisée :

RMSE = 12,30

$R^2 = 0,2432$

de Sainte-Christine (1) était l'une des plus élevées, tandis qu'au site de Chouart (2), elle était de loin la plus faible de toutes les hauteurs moyennes observées. La hauteur d'arbre la plus faible observée au site de Fontbrune (3) était aussi celle de la provenance numéro 3. Le modèle sous-estime donc fortement l'écart relatif de hauteur de cette source de semences au site 1. Au contraire, il surestime son écart relatif par rapport à la source locale au site 2. Cependant, en retirant de l'analyse cette source de semences, la forme du modèle est restée la même, et la valeur des coefficients a peu varié. En conséquence, cette source de semences a été conservée dans l'analyse.

Le graphique des résidus du modèle en fonction des valeurs prédites (non présenté) montrait que le nuage de points n'était pas centré verticalement sur 0. En effet, pour plusieurs sources de semences au site de Chouart (2), la hauteur des arbres était très faible par rapport à celle observée dans les autres sites, et la distribution des hauteurs moyennes des sources de semences et des écarts relatifs par rapport à la source locale était asymétrique vers la droite. L'un des postulats de base de la modélisation par régression linéaire n'était vraisemblablement pas respecté ($E(e_{ij})=0$), ce qui indique que la forme de la relation entre la variable réponse et les variables indépendantes n'aurait pas été correctement spécifiée. Cependant, l'ajout d'une quatrième variable indépendante ou d'autres termes dans le modèle n'a pas permis d'améliorer la qualité du modèle. De plus, des tentatives de transformation des variables (logarithmique et racine carrée, entre autres) n'ont pu corriger la distribution des résidus pour qu'ils respectent parfaitement les postulats d'un modèle de régression linéaire.

La validation croisée indique que le modèle de transfert retenu possédait une bonne qualité d'ajustement et une certaine qualité de prévision. Le modèle a donc été considéré comme valable, malgré les faiblesses décrites ci-dessus. Parmi l'ensemble des modèles testés avec 3 variables, le modèle de transfert proposé n'est pas celui qui a présenté les meilleures caractéristiques de coefficient de détermination ($R^2 = 0,337$), d'AICc et de la statistique PRESS. Cependant, tous les modèles ayant de meilleures caractéristiques présentaient soit un problème de colinéarité, de coefficient quadratique estimé supérieur à 0 ou une ordonnée à l'origine estimée à une valeur très différente de 0. Nous avons donc utilisé le modèle retenu pour simuler les écarts relatifs prédits de hauteur, tout en sachant très bien qu'il faudra porter un regard très critique sur les résultats obtenus.

2.1.3.3. Influence des variables climatiques sur la croissance relative en hauteur des sources de semences

2.1.3.3.1. Lorsqu'on fait varier 2 des 3 variables climatiques qui entrent dans le modèle de transfert

Les figures 8 à 10 suivent les mêmes conventions que celles expliquées à la section 2.1.1.3 pour les figures 2 à 4. Comme pour les 2 espèces précédentes, le transfert d'une source de semences de pin gris vers un milieu où la température minimale d'hiver y est plus chaude lui procurera un gain de croissance en hauteur par rapport à la source locale, lorsque la quantité annuelle de neige convertie en eau est maintenue constante (Figure 8). Ce qui est particulier au pin gris toutefois, c'est que dans ces conditions, il y aura un gain de croissance, quelle que soit la température maximale d'été (Figure 8, points A et D et vue 2D, surface hachurée). Par contre, sur un site où la température maximale d'été est plus chaude, le gain sera plus grand si les hivers sont aussi plus chauds. Toutefois, un déplacement vers un site où la température maximale d'été est plus chaude ne sera pas toujours bénéfique; lorsque la température minimale d'hiver se refroidit de plus de 1 °C par rapport au site d'origine, le pin gris présentera une croissance en hauteur plus faible que la source locale de semences (vue 2D).

Quand la température minimale d'hiver est maintenue constante, les variations de la température maximale d'été et de la quantité annuelle de neige convertie en eau influencent beaucoup moins la croissance relative en hauteur du pin gris (Figure 9, vue 2D : de -2,1 % au point D à +4,7 % au point B) que les combinaisons de la température minimale d'hiver et de la température maximale d'été (Figure 8, vue 2D : de -27,7 % au point B à +16,5 % au point A). Ceci signifie que la température minimale d'hiver, seule et en interaction avec les 2 autres facteurs, explique une plus grande part de la croissance relative en hauteur du pin gris. La variation de la quantité de neige convertie en eau a plus d'influence sur la croissance relative en hauteur des plantations de pin gris (de 5,4 à 5,5 %) que la température maximale d'été (de 1,3 à 1,4 %).

La figure 10 vient également confirmer l'importance de la quantité de neige sur la croissance relative des plantations de pin gris. En effet, quand on transfère une source de semences vers un environnement recevant 100 mm de neige en moins que son environnement d'origine, sa croissance sera alors grandement tributaire de la température minimale d'hiver. Par exemple, si cet environnement présente une température minimale d'hiver plus

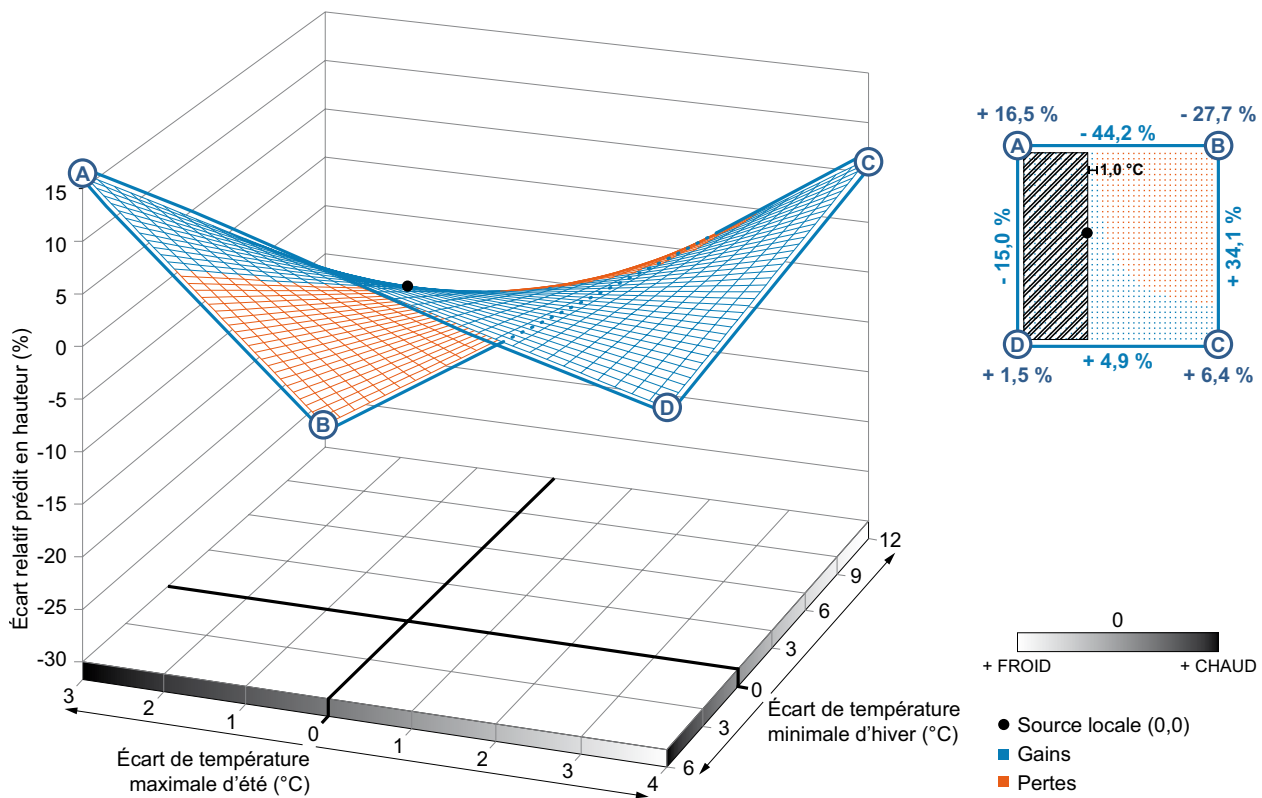


Figure 8. Écart relatif prédit en hauteur (par rapport à la source locale de semences) des plantations de pin gris en fonction des écarts de la température maximale d'été et de la température minimale d'hiver, lorsque la quantité de neige convertie en eau est maintenue constante.

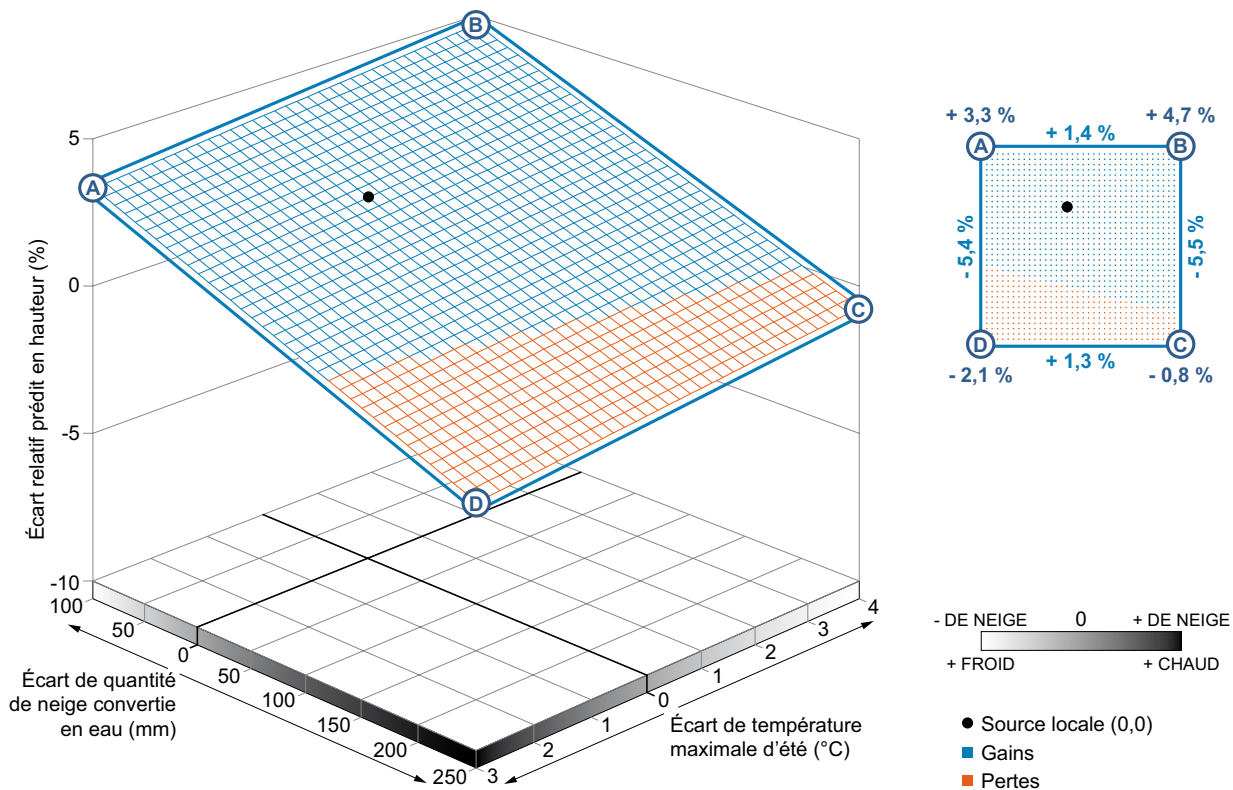


Figure 9. Écart relatif prédit en hauteur (par rapport à la source locale de semences) des plantations de pin gris en fonction des écarts de la quantité de neige convertie en eau et de la température maximale d'été, lorsque température minimale d'hiver est maintenue constante.

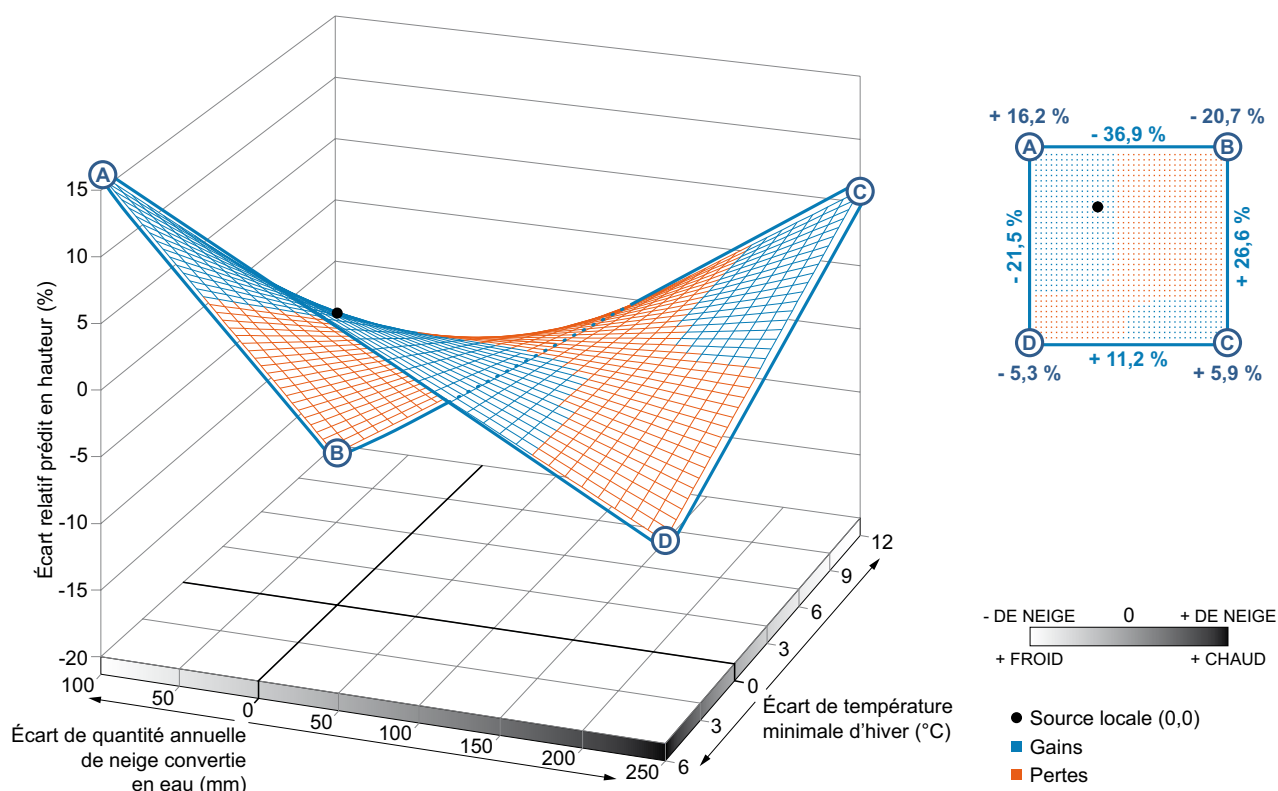


Figure 10. Écart relatif prédit en hauteur (par rapport à la source locale de semences) des plantations de pin gris en fonction des écarts de la température minimale d’hiver et de la quantité annuelle de neige convertie en eau, lorsque la température maximale d’été est maintenue constante.

froide de 12 °C par rapport à l’origine de la source transférée, cette source aura une croissance en hauteur de 20,7 % moindre que la source locale (point B). Au contraire, si la température minimale d’hiver y est plus chaude de 6 °C, la croissance en hauteur de la source déplacée dépassera celle de la source locale de semences par 16,2 % (point A). L’influence de la température minimale d’hiver sera moins importante lorsque le transfert se fait vers un environnement où la neige est plus abondante. En effet, si l’on déplace une source de semences vers un endroit avec 250 mm de plus de neige, la croissance relative augmentera de 5,9 % par rapport à la source locale si la température minimale d’hiver est plus froide de 12 °C (point C), mais elle diminuera de 5,3 % si la température minimale d’hiver est plus chaude de 6 °C (point D).

2.1.3.3.2. Lorsqu’on fait varier les 3 variables climatiques qui entrent dans le modèle de transfert

Les valeurs minimale et maximale d’écart relatif de hauteur par rapport à la source locale de semences apparaissent au tableau 3. Le plus grand et le plus petit écart relatif prédit de croissance en hauteur sont tous deux obtenus pour des déplacements de même amplitude, quant à l’écart de la quantité de neige convertie en eau et celui de la température maximale d’été. C’est donc la température minimale d’hiver qui joue un rôle majeur dans l’adaptation et la performance relative des sources de semences de pin gris.

Tableau 3. Minimum et maximum de l’écart relatif prédit en hauteur des plantations de pin gris en fonction d’un écart de climat (source–plantation) pour les trois variables climatiques qui entrent dans le modèle de transfert.

Écart relatif prédit en hauteur (par rapport à la provenance locale)	Δ Quantité de neige convertie en eau (source–plantation)	Δ Température maximale d’été (source–plantation)	Δ Température minimale d’hiver (source–plantation)
Minimum -42 %	Neige moins abondante de 100 mm	Réchauffement de 3 °C	Refroidissement de 12 °C
Maximum +26 %	Neige moins abondante de 100 mm	Réchauffement de 3 °C	Réchauffement de 6 °C

2.2. Climat futur

Les 81 simulations climatiques disponibles ont été classées en groupes homogènes partageant la même information climatique. La figure 11 établit la relation entre la proportion expliquée de la variance

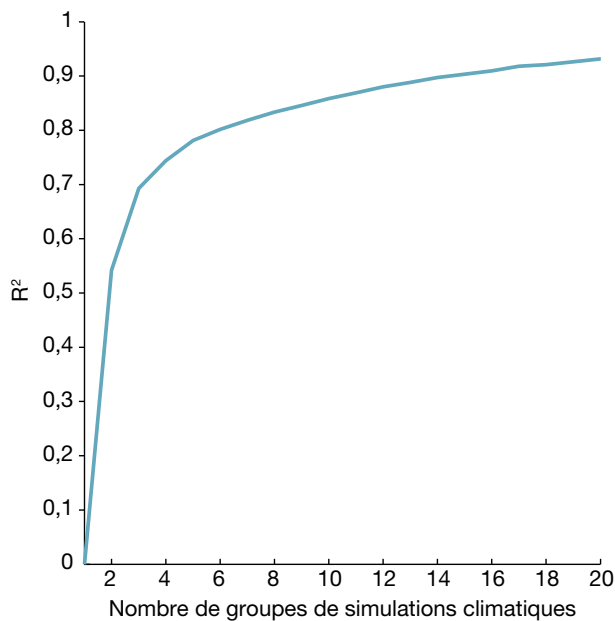


Figure 11. Relation entre la proportion expliquée de la variance totale (R^2) et le nombre de groupes de simulations climatiques, pour les 8 variables climatiques des modèles de transfert.

totale (R^2) et le nombre de groupes de simulations, pour les 8 variables climatiques utilisées dans les modèles de transfert. On y constate que la variance expliquée plafonne aux alentours de 8 groupes. Les graphiques à l'annexe I comparent un sous-ensemble de 4, de 8 et de 12 modèles climatiques par rapport aux 81 modèles possibles, pour la période 2081-2099; ils confirment que la couverture de l'ensemble des scénarios climatiques peut être rendue fidèlement en utilisant 8 groupes de modèles climatiques. L'utilisation de 8 groupes est aussi valable pour l'horizon 2046-2065 (annexe J). L'ensemble des valeurs climatiques futures a donc été généré en utilisant un seul modèle représentatif par groupe pour chacun des 8 groupes. La liste des modèles climatiques utilisés apparaît au tableau 4.

La figure 12 présente la couverture de l'incertitude dans les changements projetés standardisés (Δ) pour l'horizon 2081-2099 par rapport à la période 1971-2000, en lien avec les 8 simulations climatiques utilisées pour chacune des 8 variables climatiques qui font partie des modèles d'IQS et des modèles de transfert. Pour la plupart des variables, les 8 simulations retenues (points colorés) semblent bien couvrir l'étendue des écarts de l'ensemble des 81 simulations (points gris; $N=81$).

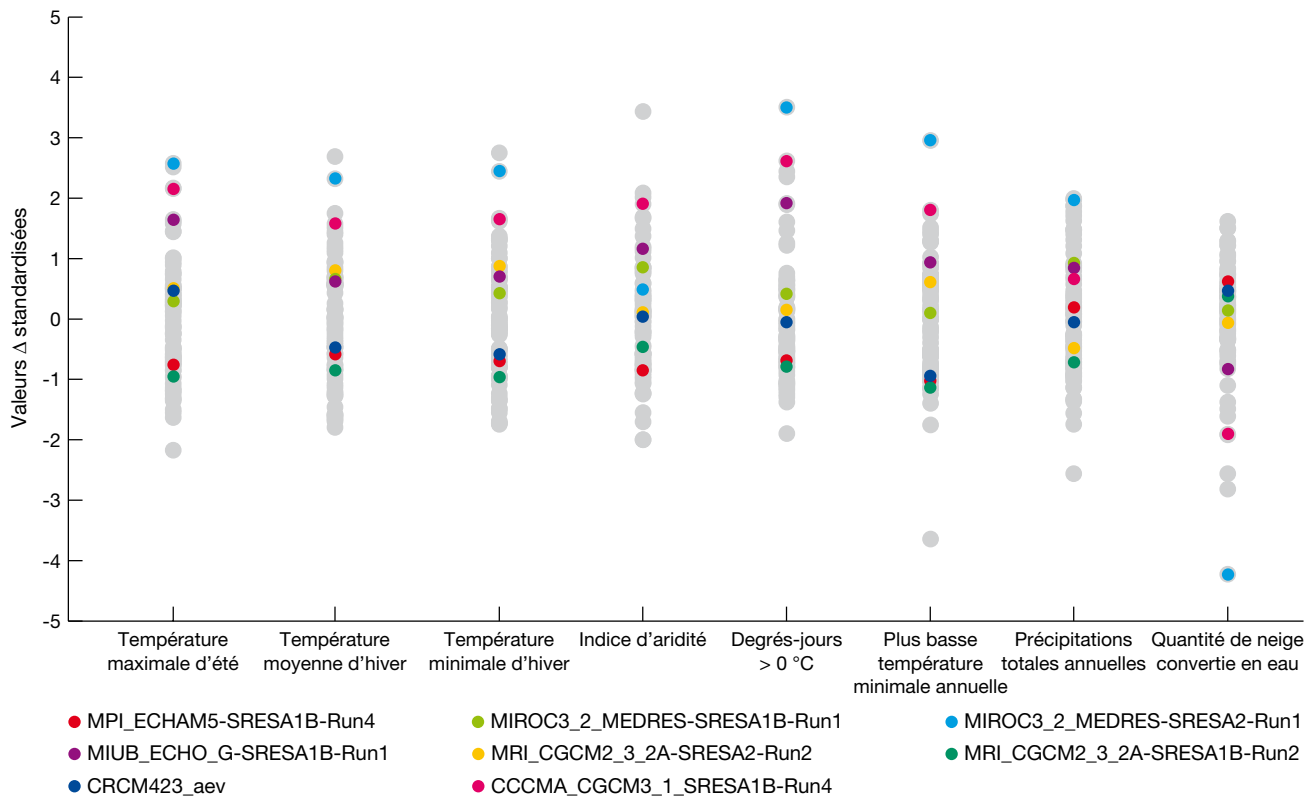


Figure 12. Couverture de l'incertitude dans les changements projetés (Δ) liée aux 8 simulations climatiques utilisées (points colorés) par rapport à l'ensemble des 81 simulations disponibles (points gris).

Tableau 4. Liste des modèles climatiques utilisés pour générer les valeurs futures des variables climatiques.

Simulation	Pays	Centre	Type	Modèle	Membre	SRES*
CRCM423_aev	Canada	Ouranos	régional	MRCC 4.2.3	Piloté CCCMA_CGCM3_1 Run 5	A2
CCCMA_CGCM3_1-SRE-SA1B-Run4	Canada	Centre canadien de la modélisation et de l'analyse climatique	global	CCCMA_CGCM3_1	Run4	A1B
MPI_ECHAM5-SRESA1B-Run4	Allemagne	Max Planck Institute for Meteorology	global	MPI_ECHAM5	Run4	A1B
MRI_CGCM2_3_2A-SRE-SA2-Run2	Japon	Meteorological Research Institute	global	MRI_CGCM2_3_2A	Run2	A2
MIROC3_2_MEDRES-SRESA2-Run1	Japon	Center for Climate System Research (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, et Frontier Research Center for Global Change (JAMSTEC)	global	MIROC3_2_MEDRES	Run1	A2
MRI_CGCM2_3_2A-SRE-SA1B-Run2	Japon	Meteorological Research Institute	global	MRI_CGCM2_3_2A	Run2	A1B
MIROC3_2_MEDRES-SRESA1B-Run1	Japon	Center for Climate System Research (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, et Frontier Research Center for Global Change (JAMSTEC)	global	MIROC3_2_MEDRES	Run1	A1B
MIUB_ECHO_G-SRESA1B-Run1	Allemagne/ Corée	Meteorological Institute of the University of Bonn, Meteorological Research Institute of KMA, et Model and Data group	global	MIUB_ECHO_G	Run1	A1B

* SRES : Scénario d'émission de gaz à effet de serre.

2.3. Rendement futur des plantations

2.3.1. Épinette blanche

2.3.1.1. Volume marchand des sources locales de semences (sans déplacement)

Les cartes du rendement attendu en volume marchand (m^3/ha) des plantations d'épinette blanche issues de semences locales, donc sans déplacement de sources, sont présentées à l'annexe K pour 3 périodes dans le temps, soit les périodes actuelle (1971-2000), de 2046-2065 et de 2081-2099. Il est bon de rappeler que ce sont les vergers à graines de première génération qui ont été retenus comme sources locales de semences, et non les peuplements naturels locaux, puisque la majorité des plantations actuelles sont faites à partir de semences de vergers à graines.

Pour quantifier plus précisément les rendements attendus des plantations d'épinette blanche issues de sources locales de semences dans les 3 domaines bioclimatiques, nous avons choisi 3 exemples de vergers (1 par domaine bioclimatique : Wendover 05 pour le domaine de l'érablière, Estcourt pour celui de la sapinière et Desroberts pour celui de la pessière), et avons simulé leur rendement sous l'influence du climat actuel et futur (Figure 13).

Comparons d'abord le rendement des plantations faites à l'aide de sources locales dans les 3 domaines bioclimatiques. Nous constatons que les plantations d'épinette blanche faites dans le domaine de l'érablière procurent actuellement un rendement de 9 % supérieur à celui obtenu dans le domaine de la sapinière, et de 21 % supérieur au rendement dans le domaine de la pessière. Les plantations d'épinette blanche sont donc actuellement plus productives dans le domaine de l'érablière que dans ceux de la sapinière et de la pessière (Figure 13).

Pour la période 2046-2065, les rendements augmenteraient de manière globale et deviendraient sensiblement équivalents dans les 3 domaines. Cela signifie que le rythme d'augmentation, par rapport aux rendements actuels, serait le plus rapide dans le domaine de la pessière (22 %), suivi de celui dans la sapinière (13 %) et de celui dans l'érablière (3 %).

Pour la période 2081-2099, cependant, les plantations faites dans le domaine de l'érablière à l'aide de semis issus de sources locales auraient un rendement plus faible de 4,3 % au rendement actuel (1971-2000), et même plus faible que celui des plantations situées dans les domaines de la

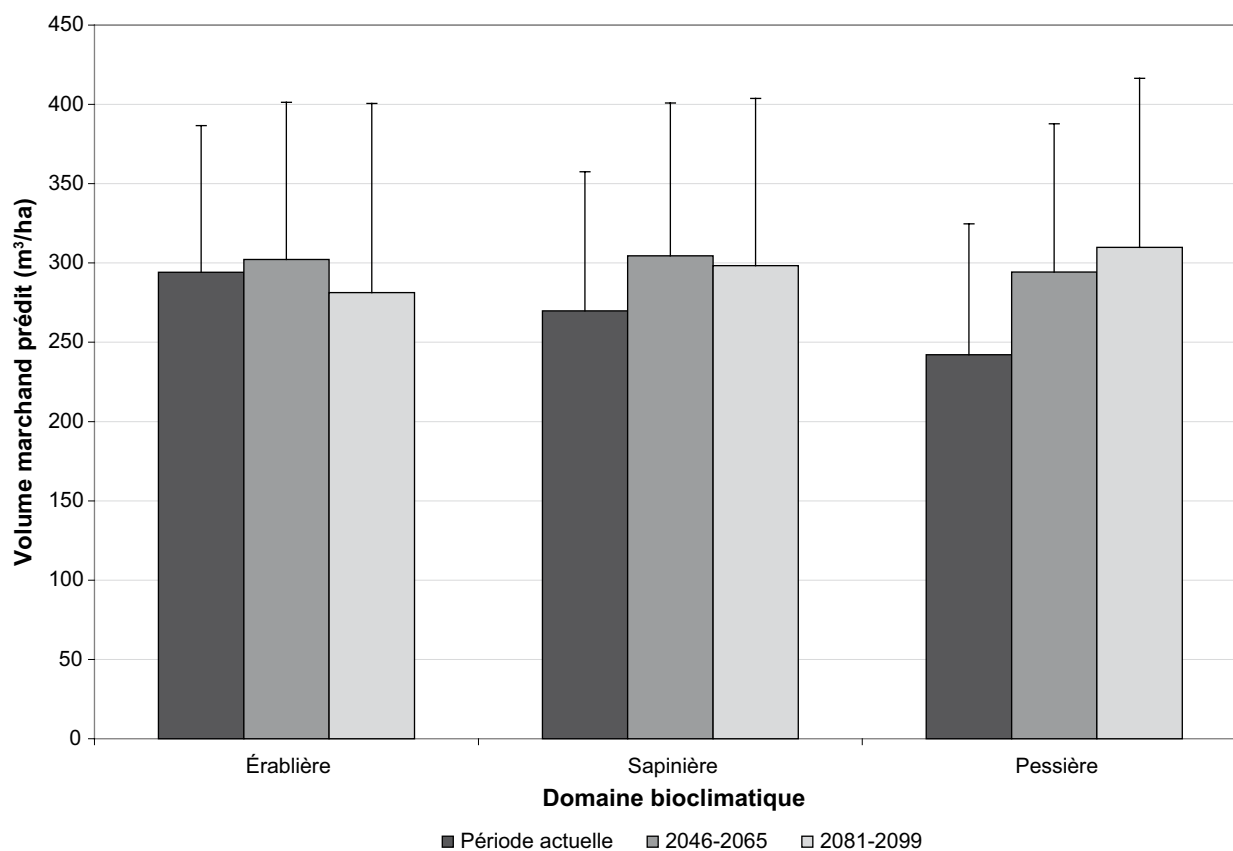


Figure 13. Rendements actuels et futurs prédits (volume marchand en m^3/ha) des plantations d'épinette blanche, issues de sources de semences locales, dans les domaines bioclimatiques de l'érablière, de la sapinière et de la pessière.

sapinière (écart de 5,7 %) et de la pessière (écart de 9,2 %). Dans le domaine de la sapinière, le rendement diminuerait de 2 % par rapport à la période précédente, alors que celui de la pessière, le rendement continuerait à augmenter (de 5 %).

Les écarts-types et coefficients de variation (CV) reliés à ces volumes marchands moyens sont présentés au tableau 5. Les écarts-types représentent les variations dues entre autres aux modèles d'IQS biophysique et de transfert, tous deux basés sur les variables climatiques, mais aussi celles associées aux différents modèles de rendement des plantations (hauteur dominante, surface terrière, volume total, volume marchand). On y constate que la variation associée aux moyennes de rendement est généralement élevée (CV allant de 0,31 à 0,42) mais assez uniforme, à la fois dans le temps et entre les 3 domaines bioclimatiques.

Quelles sont maintenant les contributions des variables et des modèles climatiques à l'erreur totale prédite des modèles de productivité? Puisqu'un million de simulations doivent être réalisées en faisant varier une source d'erreur à la fois pour obtenir la réponse, nous avons fait l'exercice en prenant comme modèle un seul verger à graines, soit celui d'Estcourt. La figure 14 démontre que les erreurs attribuables à l'estimation du climat, aussi bien celles liées aux variables climatiques retenues que celles associées aux modèles climatiques, représentent une faible proportion de l'erreur totale

Tableau 5. Rendement attendu en volume marchand des plantations d'épinette blanche, issues de sources locales, pour différentes périodes (moyenne, écart-type et coefficient de variation [CV]), en fonction du domaine bioclimatique.

Domaine bioclimatique et période	Moyenne (m ³ /ha)	Écart-type (m ³ /ha)	CV
Érablière			
Période actuelle	294,13	91,78	0,31
2046-2065	302,32	98,27	0,33
2081-2099	281,38	118,81	0,42
Sapinière			
Période actuelle	269,80	87,07	0,32
2046-2065	304,62	95,53	0,31
2081-2099	298,33	104,87	0,35
Pessière			
Période actuelle	242,16	81,87	0,34
2046-2065	294,36	92,69	0,31
2081-2099	309,89	105,99	0,34

prédite liée au rendement moyen prédit des plantations d'épinette blanche, même si leur contribution augmente avec le temps (4,5 % actuellement, 8,3 % pour la période 2046-2065 et 22,9 % durant la période 2081-2099).

2.3.1.2. Volume marchand selon la source de semences utilisée (avec déplacements)

Selon l'endroit dans la province, la source locale de semences (c.-à-d. le verger local), n'est pas toujours la source de semences et de plants qui permettrait de maximiser le rendement futur en volume marchand des plantations d'épinette blanche. À titre d'exemple, l'utilisation de plants issus du verger de Duchesnay pour reboiser un site situé à Cabano nous procurerait, pour la période 2081-2099, un volume marchand supplémentaire de 11,8 % par rapport à l'utilisation de la source locale (verger d'Estcourt, figure 15). Comme nous l'avons vu précédemment, le rendement attendu de la source locale de semences dans la période 2081-2099 devrait être supérieur de 10,6 % au rendement actuel, ce qui signifie que l'utilisation des semences du verger de Duchesnay pour produire des semis à planter à Cabano donnerait potentiellement, au total, un volume marchand supérieur de plus de 22 % à la valeur actuelle. On ne peut toutefois pas établir

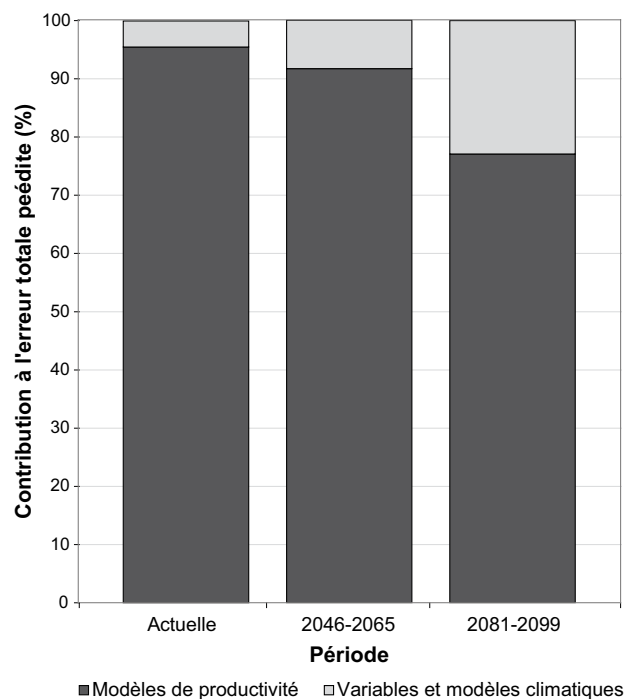


Figure 14. Contribution relative (% de l'erreur totale prédite) des modèles de productivité d'une part, et des variables et modèles climatiques retenus d'autre part, dans le calcul du volume marchand des plantations d'épinette blanche pour trois périodes de temps (actuelle, 2046-2065 et 2081-2099).

de règle générale et affirmer que les semences d'un verger du sud, plantées plus au nord, donneront un rendement plus élevé que celles d'un verger local. Par exemple, l'utilisation de semences des vergers de Cleveland et de Verchères, situés dans le domaine de l'érablière, ne permettraient pas de maximiser le rendement futur des plantations à Cabano, puisqu'il y aurait une perte de volume marchand par rapport au verger local (2,7 % et 3,7 %, respectivement, pour la période 2081-2099).

2.3.2. Épinette noire

2.3.2.1. Volume marchand des sources locales de semences (sans déplacement)

Les cartes du rendement attendu en volume marchand des plantations d'épinette noire issues de sources locales de semences pour les 3 périodes sont présentées à l'annexe L. Comme pour l'épinette blanche, ces rendements ont été simulés en utilisant les vergers à graines de première génération comme sources locales de semences, et non les peuplements naturels locaux.

Pour obtenir une estimation plus précise des rendements attendus des plantations issues de sources locales de semences dans les 3 domaines bioclimatiques, nous avons retenu certains vergers

à graines dans chaque domaine et avons simulé leur rendement sous l'influence du climat actuel et futur (2046-2065 et 2081-2099). Ces vergers sont celui de Watford pour le domaine de l'érablière, une moyenne des vergers de Ragueneau et de Dolbeau pour la sapinière, et le verger de Lévy pour la pessière.

Actuellement, dans le domaine de l'érablière, le rendement des plantations d'épinette noire issues de sources locales de semences est de 35 % plus élevé que dans le domaine de la sapinière, et de 44 % plus élevé que dans le domaine de la pessière (Figure 16). Ici encore, les conditions de croissance plus favorables dans le domaine de l'érablière expliqueraient cette situation.

Pour la période 2046-2065, c'est dans le domaine de l'érablière que le rendement des plantations d'épinette noire serait le plus faible; l'espèce y perdrait donc 32 % de son rendement en volume marchand d'ici 2046-2065. À l'opposé, le rendement des plantations d'épinette noire augmenterait de 2 % dans le domaine de la sapinière et de 7 % dans celui de la pessière durant la même période.

Le climat qui prévaudrait ensuite 30 ans plus tard (période 2081-2099) ne serait pas vraiment

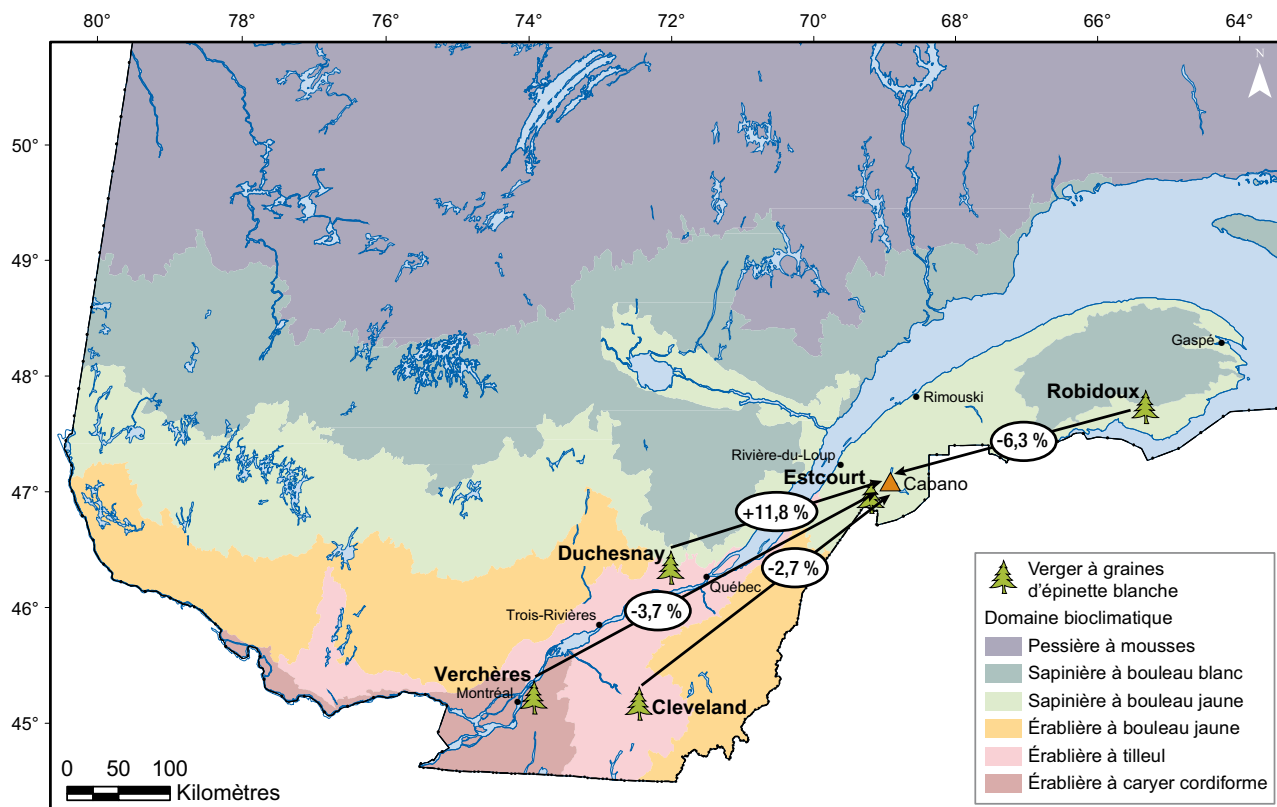


Figure 15. Rendement futur (2081-2099) attendu en volume marchand des plantations d'épinette blanche à Cabano, selon la source de semences utilisée (verger à graines) (exprimé en % par rapport à la source locale, soit le verger d'Estcourt).

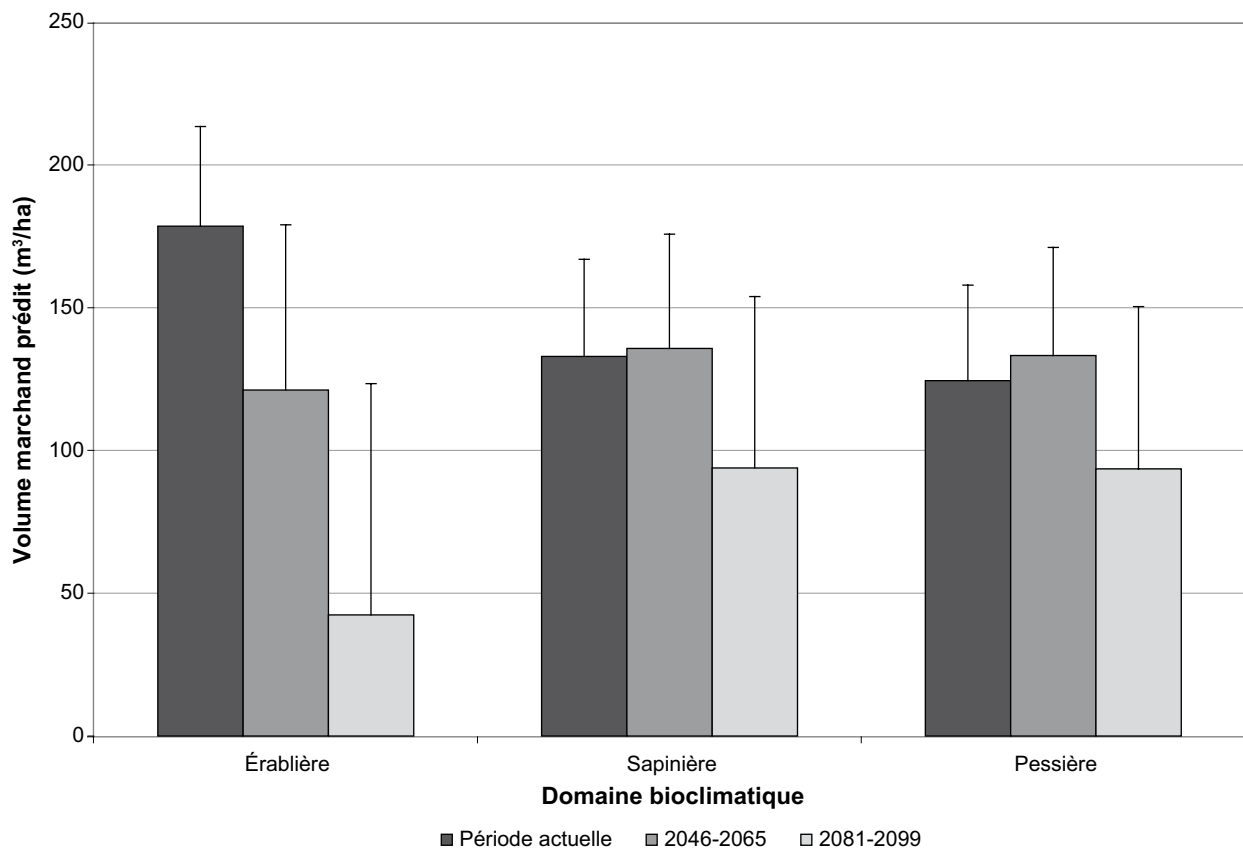


Figure 16. Rendements actuels et futurs prédits (volume marchand en m³/ha) des plantations d'épinette noire, issues de sources de semences locales, dans les domaines bioclimatiques de l'érablière, de la sapinière et de la pessière.

favorable aux plantations d'épinette noire dans la province, peu importe le domaine. En effet, par rapport à la période précédente, les rendements en volume marchand diminueraient de 65 % dans le domaine de l'érablière, de 31 % dans celui de la sapinière et de 30 % dans celui de la pessière. Les rendements des plantations d'épinette noire seraient même nettement inférieurs aux rendements actuels (baisses de 76 %, de 29 % et de 25 %, respectivement, dans les domaines de l'érablière, de la sapinière et de la pessière).

Les écarts-types et les coefficients de variation du volume marchand moyen sont présentés au tableau 6. Encore ici, ces écarts-types représentent les variations dues aux variables et modèles climatiques utilisés, mais aussi celles associées aux différents modèles qui servent à calculer le rendement des plantations (hauteur, surface terrière, volume total, volume marchand). On y constate qu'actuellement, l'écart-type associé aux moyennes de rendement des plantations est faible, et qu'il est semblable dans les 3 domaines (CV variant de 0,19 à 0,26). Dans le domaine de l'érablière, il augmente toutefois considérablement pour les 2 périodes suivantes, jusqu'à atteindre presque le double de la

Tableau 6. Rendement attendu en volume marchand des plantations d'épinette noire, issues de sources locales, pour différentes périodes (moyenne, écart-type et coefficient de variation [CV]), en fonction du domaine bioclimatique.

Domaine bioclimatique et période	Moyenne (m ³ /ha)	Écart-type (m ³ /ha)	CV
Érablière			
Période actuelle	179,5	34,58	0,19
2046-2065	121,5	57,72	0,48
2081-2099	42,56	79,90	1,88
Sapinière			
Période actuelle	133,15	33,1	0,25
2046-2065	136,05	39,26	0,29
2081-2099	93,99	59,68	0,63
Pessière			
Période actuelle	124,6	32,43	0,26
2046-2065	133,5	36,95	0,28
2081-2099	93,61	56,43	0,60

moyenne pour la période 2081-2099. Il augmente aussi dans les 2 autres domaines, pour atteindre 60 % de la moyenne pour la période 2081-2099.

Quelle est maintenant la répartition de l'erreur totale prédite associée à la moyenne de rendement calculée? De manière générale, **l'erreur liée aux facteurs climatiques est beaucoup plus importante qu'elle ne l'était pour l'épinette blanche**, et elle augmente rapidement dans le futur (Figure 17). Elle passe de 44,3 % pour la période actuelle, à 63,5 % en 2046-2065 et à 90,3 % pour la période 2081-2099.

2.3.2.2. Volume marchand selon la source de semences utilisée (avec déplacements)

La figure 18 illustre l'effet de l'utilisation de semences issues de vergers situés plus au sud, soit ceux de Laviolette et de Ditton, sur le rendement futur (2081-2099) des plantations d'épinette noire à Chibougamau. On y constate que des gains de rendement en volume marchand de 9,3 % et de 15,6 % pourraient être obtenus, selon le verger, par rapport à l'utilisation de la source locale de semences (le verger de Lévy). Ce gain pourrait donc atténuer en partie la perte attendue de 25 % du rendement des plantations d'épinette noire par rapport à la période actuelle dans le domaine de la

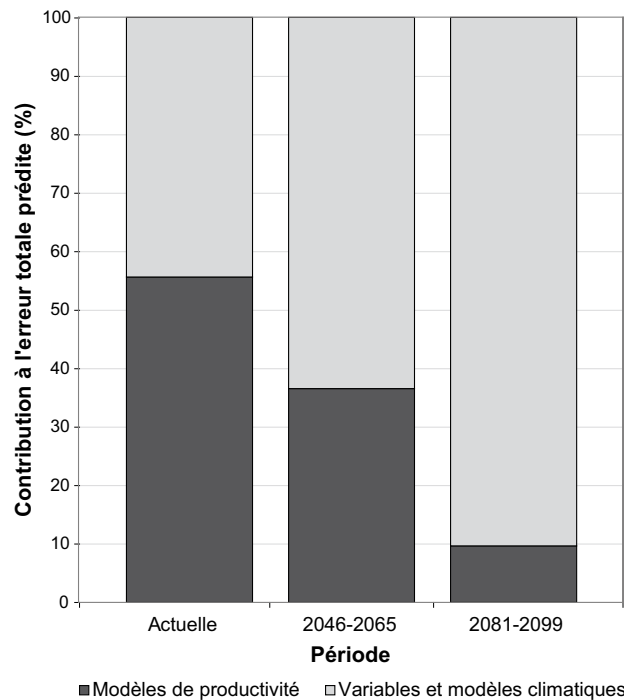


Figure 17. Contribution relative (% de l'erreur totale prédite) des modèles de productivité d'une part, et des variables et modèles climatiques retenus d'autre part, dans le calcul du volume marchand des plantations d'épinette noire pour trois périodes de temps (actuelle, 2046-2065 et 2081-2099).

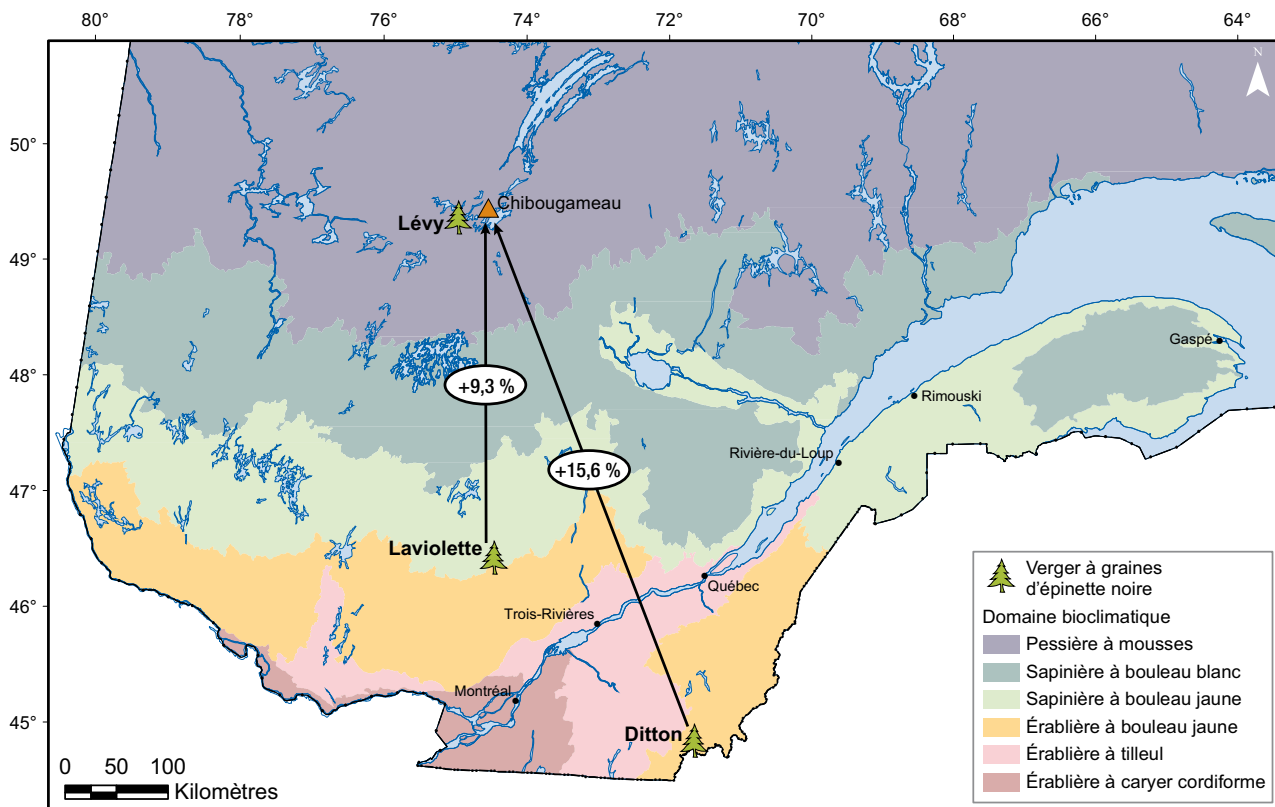


Figure 18. Rendement futur (2081-2099) attendu en volume marchand des plantations d'épinette noire à Chibougamau, selon la source de semences utilisée (verger à graines) (exprimé en % par rapport à la source locale, soit le verger de Lévy).

pessière, en raison du changement de climat dans le temps. Au bilan, les plantations d'épinette noire soumises aux changements climatiques devraient donc être moins productives dans l'avenir qu'elles ne le sont actuellement.

2.3.3. Pin gris

Considérant le faible coefficient de détermination du modèle proposé, nous ne présenterons pas de cartes du rendement futur en volume marchand des plantations de pin gris. En effet, les tentatives de produire ces cartes ont permis de constater que le nouveau modèle prévoyait une très forte

augmentation du rendement de l'espèce d'ici la fin du siècle dans l'ensemble de la province, ce qui est considéré comme très improbable. En effet, Périé *et al.* (2014) prévoient des conditions très défavorables au maintien du pin gris (risque de dépérissement sévère sur plus de 60 % de son aire de répartition actuelle au Québec) dans tous les domaines bioclimatiques du Québec, sauf dans le domaine 6 ouest, où Bergeron (2011) prédit aussi que le pin gris est l'espèce qui bénéficierait le plus des conditions climatiques favorables prévues durant la saison de croissance.

Chapitre trois

Discussion

3.1. Modèles de transfert de sources de semences

3.1.1. Comparaison avec les méthodes utilisées ailleurs

O'Neill et Nigh (2011) ont conçu un modèle de transfert général semblable à celui développé au Québec, mais dans lequel ils proposent un raffinement qui permet de prendre en compte l'impact graduel des changements climatiques, plutôt que de le mesurer uniquement en fin de rotation. En ajustant annuellement la hauteur des plantations, ils peuvent quantifier les impacts cumulatifs des changements de climat sur la productivité en volume marchand. Un des avantages de cette méthode est qu'elle tient compte du fait qu'au cours des premières décennies, les changements de climat et les problèmes de mésadaptation seront mineurs. Cette méthode a aussi l'avantage de tempérer les pertes et les gains prévus de rendement en volume marchand. Ainsi, alors que l'impact prévu des changements climatiques sur la croissance est souvent grand et très variable selon le modèle utilisé, la variable de croissance analysée, la région ou l'espèce concernée (de -40 % à +80 % : Andalo *et al.* 2005, Crookston *et al.* 2010, O'Neill *et al.* 2008, Rehfeldt *et al.* 1999a, 2002, Savolainen *et al.* 2007, Savva *et al.* 2007, Wang *et al.* 2006), les prévisions faites en utilisant le modèle de O'Neill et Nigh (2011) pour le pin lodgepole correspondent plutôt à des pertes de rendement modérées de 7 à 13 % d'ici la fin du siècle. Cette différence peut avoir des implications importantes, non seulement pour les calculs de la possibilité forestière, mais également dans les modèles de séquestration du CO₂, de biodiversité, de succession et de répartition future des espèces (Loehle 2003, Purves et Pacala 2008).

Bien que la méthode de raffinement proposée par O'Neill et Nigh (2011) constitue une avenue à explorer pour améliorer les modèles de transfert de l'épinette blanche et de l'épinette noire au Québec, les modèles proposés dans la présente étude ont une valeur prévisionnelle semblable et même supérieure à celle de O'Neill et Nigh (2011) (valeurs moyennes de R² de 0,56 et de 0,71 pour l'épinette blanche et l'épinette noire, respectivement, par comparaison avec 0,60 pour le pin lodgepole). Pour l'épinette blanche, cette valeur est également meilleure que l'ancien modèle de transfert conçu

au Québec (R² de 0,34 dans Andalo *et al.* 2005). La raison probable de cette amélioration, qui expliquerait aussi le fort R² du modèle de l'épinette noire, réside dans l'utilisation de données climatiques plus anciennes pour les sources de semences transférées dans les tests de provenances (1941-1970). En effet, comme nous l'avons mentionné précédemment, la période la plus récente (1971-2000) correspond à celle où les changements climatiques étaient entamés. L'augmentation des températures a été beaucoup plus rapide qu'au début du siècle, ce qui est corroboré par l'observation de symptômes observés en peuplements forestiers, aussi bien dans le sud de l'aire de répartition des espèces qu'à la limite nordique des arbres (Gamache et Payette 2005). Dans ces conditions, il est problématique de concevoir des modèles de transfert qui relient la croissance des espèces à des écarts climatiques, puisque le climat actuel, déjà altéré, ne reflète pas les conditions de croissance des sources de semences (adaptation sur plusieurs générations). L'utilisation de données climatiques plus anciennes (1941-1970) aura donc permis d'établir un lien plus significatif entre la croissance et le climat, et de refléter ainsi l'adaptation inscrite dans le pool génétique des provenances, conséquence d'une évolution sur plusieurs générations.

Une seconde avenue à explorer dans le futur consiste à jumeler les modèles d'enveloppes climatiques ou de niches écologiques, qui prédisent l'aire de répartition potentielle des espèces (Hamann et Wang 2006, Rehfeldt *et al.* 2006), avec les modèles de transfert qui prennent en compte les différences entre les populations d'une même espèce, en ce qui a trait à l'adaptation au climat (Joyce et Rehfeldt 2013).

3.1.2. Modèle de transfert pour le pin gris : variables utilisées et limites

Le modèle de transfert de sources de semences développé pour le pin gris au Québec fait intervenir la température minimale d'hiver et la quantité de neige convertie en eau. En Ontario et dans les États des Grands Lacs, les variables qui ont permis de prévoir le rendement des plantations de pin gris dans la majorité des tests de provenances utilisés sont plutôt la température minimale de décembre et les précipitations du printemps (Thomson et Parker 2008). Les précipitations du mois de mars se

sont d'ailleurs avérées meilleures que la température pour expliquer la croissance du pin gris (R^2 de 0,23 à 0,41; Thomson et Parker 2008). Dans leurs travaux antérieurs, ces auteurs avaient démontré que les précipitations représentaient un bon indice explicatif de la croissance du pin gris en Ontario (Thomson et Parker 2008). **Il semble donc que la croissance des plantations de pin gris soit fortement influencée par la température hivernale et par la quantité d'eau disponible au printemps.** En plus de ces 2 variables, le modèle québécois intègre la température maximale d'été. Même si celle-ci n'a pas d'influence directe (en effet simple) sur la croissance, comme le révèle la régression, cette variable interagit très significativement avec la température minimale d'hiver (Figure 8).

Nous estimons que le faible coefficient de détermination du modèle de transfert de pin gris conçu au Québec ($R^2 = 0,337$) peut être attribuable à 2 facteurs. Le premier est l'emplacement des sites de plantation eux-mêmes. En effet, bien qu'un nombre représentatif de sources de semences de toute l'aire de répartition de l'espèce ait été présent dans ces tests de provenances (66 sources provenant de la majorité des provinces au Canada et des États-Unis), les 3 tests de provenances étaient rapprochés géographiquement (distants de 1° de latitude et 4° de longitude) et ne présentaient que de faibles écarts climatiques (Annexe D). En comparaison, le modèle de transfert du pin lodgepole (une espèce apparentée au pin gris), qui a été développé en Colombie-Britannique en utilisant 173 populations plantées dans 44 sites, a un R^2 de 0,60 (O'Neill et Nigh 2011).

Le second facteur expliquant le faible coefficient de détermination du modèle de transfert pour le pin gris, et probablement le plus crucial, est que la hauteur individuelle des arbres a dû être estimée pour 2 des 3 sites, faute de connaître la hauteur moyenne totale de chaque source de semences sur chaque site, ainsi que le nombre d'arbres dans chaque bloc. Bien que peu probable, une troisième cause du comportement erratique du modèle pour le pin gris pourrait être la présence de provenances de l'extérieur du Québec, contrairement aux 2 autres espèces; comme celles-ci représentent un grand territoire, leur performance mesurée dans les tests pourrait avoir été conditionnée par d'autres facteurs que le climat, par exemple, par les différences édaphiques.

Il serait sans doute possible d'améliorer le modèle applicable au Québec en y incluant les mesures prises dans les tests de provenances installés dans la même période dans les provinces voisines (Ontario et Nouveau-Brunswick).

3.2. Rendements futurs des plantations

Déjà en 1975, Saamisto (1975) avait observé que l'abondance du genre *Picea* diminuait lorsque le climat se réchauffait. L'avènement des changements climatiques a stimulé l'intérêt des chercheurs à prévoir l'impact d'un changement rapide du climat sur la croissance des espèces forestières. Les impacts prévus d'ici la fin du siècle sont souvent grands et très variables (c.-à-d. de +40 à -80 %) selon les caractères de croissance mesurés, le type de modèle de transfert utilisé, la région et l'espèce étudiées (Andalo *et al.* 2005, Crookston *et al.* 2010, O'Neill *et al.* 2008, Rehfeldt *et al.* 1999b, 2002, Savolainen *et al.* 2007, Savva *et al.* 2007, Wang *et al.* 2006). Malgré ces variations, on prévoit généralement, pour la plupart des espèces, une diminution ou une légère augmentation de la croissance pendant quelques décennies, suivie d'une diminution (Beaulieu *et al.* 2004, Rehfeldt *et al.* 1999b, Reich et Oleksyn 2008, St Clair et Howe 2007). Les prévisions de rendement moyen en volume marchand des plantations d'épinettes obtenues dans la présente étude suivent la tendance générale de la littérature scientifique. Ces prévisions seront détaillées ci-dessous pour chacun des grands domaines bioclimatiques. Il faut cependant préciser que les rendements prédits ont été calculés à partir de la situation géographique des vergers et ne tiennent pas compte du gain génétique rattaché à ceux-ci, en comparaison avec un peuplement naturel. Dans ce sens, les rendements des plantations sont sous-estimés. Par ailleurs, les vergers sont constitués d'arbres sélectionnés représentant plusieurs peuplements, et parfois même une grande diversité de provenances; ils ont donc une capacité d'adaptation (ou plasticité) supérieure à celle des peuplements naturels.

Au-delà des rendements moyens, la variabilité autour des moyennes démontre des tendances différentes entre l'épinette blanche et l'épinette noire. Pour l'épinette blanche, le coefficient de variation associé au rendement en volume marchand projeté dans le futur est semblable à la valeur actuelle prévue par les modèles de productivité des plantations. Celui-ci demeure relativement stable d'une période à l'autre (2046-2065 et 2081-2099) et varie peu entre les 3 domaines bioclimatiques (Tableau 5). Ces observations font penser que l'incertitude associée aux projections climatiques n'a pas beaucoup augmenté l'erreur totale prédite associée au volume marchand estimé des plantations d'épinette blanche; l'exemple du verger d'Estcourt appuie cette hypothèse (Figure 14). **Pour l'épinette blanche, les projections des rendements estimés d'ici la fin du siècle pour les plantations réalisées dans les 3 domaines bioclimatiques pourraient**

être considérés comme suffisamment précises pour guider des décisions à propos des orientations sylvicoles.

Pour l'épinette noire, le coefficient de variation associé au rendement projeté en volume marchand pour la période la plus lointaine que nous avons simulée est très élevé (de 0,60 à 1,88 en 2081-2099, tableau 6). De plus, les facteurs climatiques contribuent beaucoup à l'erreur totale (90,3 %, figure 17). Cela nous incite à **limiter nos projections à une période plus courte, afin de réduire l'erreur liée à l'estimation du rendement futur en volume marchand des plantations d'épinette noire.** De nouveaux dispositifs pourraient éventuellement être mis en place pour développer de meilleurs modèles, mais cette grande variabilité pourrait aussi être un résultat propre à l'espèce.

3.2.1. Domaine de l'érablière

Au sud du Québec, dans le domaine de l'érablière, le volume marchand des plantations d'épinette blanche connaîtrait d'abord une faible augmentation de 2,8 % pour la période 2046-2065, puis une diminution de 6,9 % au cours de la période 2081-2099. Au global, le rendement de l'espèce diminuerait donc de 4,3 % par rapport aux valeurs actuelles. Ces prévisions rejoignent mais portent moins à conséquence que celles de Périé *et al.* (2014) qui, dans une étude visant à déterminer l'aire de répartition future des espèces à l'aide de modèles d'habitats, prévoient des conditions défavorables à l'épinette blanche sur la majeure partie de son territoire dans le sud du Québec (c.-à-d. le domaine de l'érablière) d'ici la fin du 21^e siècle. Cette différence pourrait s'expliquer par la variabilité intraspécifique qui existe entre les arbres d'un même peuplement et entre les peuplements, et qui confère une grande capacité d'adaptation aux espèces forestières ainsi qu'une forte plasticité de réponse aux changements. Cette variabilité n'est généralement pas considérée dans les modèles d'habitats.

L'épinette noire, qui atteint actuellement son seuil de rendement optimal au sud et au centre de son aire de répartition (Thomson *et al.* 2010), connaîtrait une importante perte de rendement dans le domaine de l'érablière à cause du réchauffement climatique. En effet, une forte diminution de 32 % de son volume marchand est prévue au cours de la période 2046-2065, suivie d'une perte encore plus importante (65 %) au cours de la période 2081-2099. L'important coefficient de variation des valeurs projetées au cours de la seconde période (1,88 pour 2081-2099, tableau 6), qui représente près du double de la moyenne et qui est 3 fois plus élevé dans le domaine de l'érablière que dans les

autres, pourrait s'expliquer par la présence des 2 modèles MIROC parmi les 8 modèles climatiques utilisés pour les calculs de rendement. Ces derniers prévoient une température supérieure aux 6 autres modèles pour la période de 2081-2099, et conséquemment, un rendement en volume marchand nettement inférieur, ce qui cause de grands écarts dans les prédictions du rendement. Ces modèles ont tout de même été conservés dans les simulations climatiques, puisqu'ils représentent des possibilités réelles. Il faut cependant être conscient qu'ils introduisent une grande variation dans l'estimation des volumes marchands futurs. Bien qu'entachées d'une grande variation, les projections de rendement pour l'épinette noire rejoignent les résultats de Périé *et al.* (2014) qui prévoient que les conditions deviendraient défavorables à l'épinette noire d'ici la fin du 21^e siècle sur 50 à 60 % du territoire actuel dans le sud du Québec (c.-à-d. le domaine de l'érablière). Des conditions climatiques qui dépassent les limites d'adaptation des espèces pourraient expliquer leur déclin futur sur une portion de leur territoire (Thomson *et al.* 2010).

3.2.2. Domaine de la sapinière

Dans le domaine de la sapinière, les projections de rendement montrent que les plantations d'épinette blanche deviendraient aussi productives que celles établies dans le domaine de l'érablière au cours de la période 2046-2065. Par rapport à la période actuelle, le volume marchand moyen des plantations augmenterait davantage dans la sapinière (13 %) que dans l'érablière (3 %). Par contre, au cours de la période 2081-2099, il diminuerait légèrement (de 2 %) tout en restant supérieur à celui prévu dans l'érablière (réduction de 6 %). Le coefficient de variation associé à ces moyennes est comparable à celui observé dans l'érablière (de 0,31 à 0,35, tableau 5), et reste stable dans le temps. Les 2 groupes de modèles, soit les modèles de productivité (volume marchand, volume total, surface terrière, hauteur dominante) et les modèles qui utilisent les variables climatiques (IQS biophysique, modèles de transfert, climat et modèle climatique), contribuent autant l'un que l'autre à l'erreur totale. Cela démontre que **pour l'épinette blanche, l'erreur attribuable aux prévisions de climat est faible (8,3 % pour 2046-2065 et 22,9 % pour 2081-2099); l'imprécision associée aux rendements en volume marchand projetés dans le futur vient donc surtout des modèles de productivité des plantations, la plupart desquels sont aussi utilisés pour les calculs de la possibilité forestière.**

Dans le domaine de la sapinière, l'épinette noire bénéficierait tout de même d'un réchauffement moins important que dans le domaine de

l'érablière, et connaîtrait ainsi une faible augmentation de volume marchand moyen de 2 % au cours de la période 2046-2065. Le climat qui prévaudrait ensuite pendant la période 2081-2099 ne serait pas vraiment favorable aux plantations d'épinette noire dans le domaine de la sapinière, puisque l'espèce y perdrait 31 % de son volume marchand par rapport à la période précédente, pour atteindre des rendements inférieurs de 29 % aux valeurs actuelles.

3.2.3. Domaine de la pessière

Selon la littérature, la forêt continue dans la partie nord de l'aire de répartition des espèces connaîtrait, au cours de la période 2041-2070, des conditions climatiques plus favorables aussi bien à la croissance de l'épinette blanche (Crowe et Parker 2008, Rweyongeza *et al.* 2007) que de l'épinette noire (Thomson *et al.* 2009), principalement à cause d'une augmentation des températures; les projections de rendement ne vont pas plus loin dans le temps. Dans la présente étude, pour le domaine de la pessière, les projections de rendement prévoient des augmentations de la croissance des plantations d'épinette blanche et d'épinette noire, associées aux conditions climatiques au cours de la période 2046-2065. L'augmentation de volume marchand serait plus importante pour les plantations d'épinette blanche (22 %) que pour celles d'épinette noire (7 %). L'épaisseur de la couche organique n'ayant que peu d'effet sur les relations entre la croissance et le climat pour l'épinette noire (Gewehr 2011), cette espèce aura probablement une réaction relativement uniforme aux changements climatiques dans le nord du Québec. Le climat qui prévaudrait ensuite sur un horizon plus lointain (2081-2099) continuerait à avantager la croissance de l'épinette blanche dans le domaine de la pessière (augmentation du volume marchand de 5 %) mais ne serait plus du tout favorable aux plantations d'épinette noire, dans l'ensemble de la province. Ainsi, dans le domaine de la pessière, notamment, le volume marchand des plantations d'épinette noire diminuerait de 30 % par rapport à la période précédente, pour atteindre une valeur 25 % moindre que les valeurs actuelles dans ce domaine.

Il faut toutefois être prudent en utilisant le modèle de transfert de l'épinette blanche dans le domaine de la pessière. D'abord, celui-ci est basé sur des mesures de croissance prises dans des tests de provenances établis uniquement dans les domaines de l'érablière et de la sapinière; aucun test n'était situé dans le domaine de la pessière. Ensuite, le modèle de transfert prévoit un écart relatif de croissance en fonction d'écart climatiques entre 2 périodes de temps ou entre 2 sites; le rendement est donc uniquement projeté en

fonction des variables climatiques. Or, l'épinette blanche est reconnue comme une espèce relativement exigeante sur le plan nutritionnel (Quesnel et Côté 2009). Le suivi des parcelles d'échantillonnage des plantations d'épinette blanche du Ministère nous montre que, dans le domaine de la pessière, la croissance annuelle moyenne des arbres dominants est de 18 cm à 19 ans d'âge moyen, ce qui est moins que la moitié de la croissance réalisée dans les domaines méridionaux. En effet, la croissance atteint 35,5 cm dans la sapinière à 20 ans, et 39,5 cm dans l'érablière à 26 ans (Guy Prigent, comm. pers.). Ainsi, même si le modèle de transfert prévoit un fort gain relatif de hauteur (en pourcentage) pour les plantations d'épinette blanche situées dans la pessière, ce pourcentage ne se traduira pas par un fort gain absolu de rendement en volume marchand, puisque la croissance des plantations d'épinette blanche dans la pessière est beaucoup moindre que celle des plantations établies dans les domaines bioclimatiques méridionaux. Si, malgré ces faibles rendements, on décide de favoriser la plantation de l'épinette blanche dans le domaine de la pessière, il faudrait planter l'espèce uniquement sur les stations les plus fertiles, qui couvrent une faible proportion du territoire de ce domaine (selon Jean-Pierre Saucier, comm. pers., ces sites couvriraient environ 5 % du domaine 6 et représentent le type écologique MS2).

3.3. Effet des variations climatiques sur le rendement futur des plantations

Actuellement, le rendement des plantations au Québec est calculé à l'aide des tables produites pour différentes essences forestières sur la base des mesures récoltées dans des plantations réparties dans la plupart des régions administratives. À partir des espacements initiaux et des indices de qualité de station (IQS, ou hauteur des arbres dominants d'une plantation à un âge de référence), ces tables permettent de calculer, entre autres, le volume marchand attendu des plantations à différents âges de récolte. Le volume marchand estimé dans la présente étude fait plutôt appel à des IQS biophysiques, qui prévoient la productivité des plantations en fonction des variables climatiques des sites où elles sont installées. Les volumes marchands ainsi prédits présentent des coefficients de corrélation élevés avec les volumes marchands réels mesurés dans les plantations (> 0,9 dans Beaulieu *et al.* 2011). Comme ces estimations permettent de faire des projections dans toutes les conditions environnementales rencontrées au Québec, elles peuvent aussi servir dans un contexte de changements climatiques. Toutefois, pour projeter les rendements des plantations dans des conditions climatiques différentes, qu'elles

découlent d'un transfert de matériel sur le territoire ou d'un changement rapide du climat, nous avons combiné les modèles d'IQS biophysique avec les modèles de transfert, qui sont également fonction des variables climatiques. Considérant que ces 2 modèles servent d'intrants à tous les calculs subséquents (surface terrière, volume total et volume marchand), il apparaît évident que les rendements simulés pour différentes périodes dans le futur sont attribuables aux variations du climat, dans la mesure où les autres facteurs (fertilité des sols, compétition, etc.) restent constants. Sans en faire une analyse approfondie, nous expliquons brièvement ci-dessous l'effet possible des variables climatiques qui composent les modèles de transfert et les modèles d'IQS biophysique des épinettes sur la productivité des plantations. D'un point de vue mathématique, il aurait été préférable d'évaluer l'effet individuel de chaque variable climatique sur le rendement des plantations, par exemple en gardant constantes toutes les variables climatiques pour n'en faire varier qu'une seule à la fois dans les modèles. Cette approche n'a pas pu être utilisée, puisque les variables climatiques sont corrélées entre elles.

3.3.1. Facteurs liés à la disponibilité en eau (indice d'aridité, précipitations totales et utiles)

De manière générale, les forêts boréales sont un élément clé du système climatique terrestre. On croit qu'elles sont plus sensibles à la sécheresse que les autres types de forêts (Lenton et al. 2008). Les observations sur la croissance des 4 espèces les plus importantes de la forêt boréale, soit l'épinette noire, le pin gris, l'épinette blanche et le peuplier faux-tremble, compilées à partir des placettes d'échantillonnage permanentes réparties à la grandeur du Canada, ont permis de constater que le stress hydrique provoqué par des sécheresses régionales semble avoir été la cause principale de l'augmentation importante (4,7 % par année en moyenne) du taux de mortalité des arbres durant la période 1963-2008 (Peng et al. 2011). L'ouest du pays est toutefois plus affecté que l'est. Au Québec, Logan et al. (2011) ont simulé l'indice de sécheresse, qui est un bon estimateur de l'effet du changement de l'évapotranspiration et des précipitations sur la diminution de la teneur en eau du sol. Cet indice est fortement corrélé avec le métabolisme et les variations annuelles de croissance des arbres (Bergeron et Archambault 1993, Girardin et Mudelsee 2008 dans Logan et al. 2011, Tardif et Bergeron 1997). Les modèles de circulation générale montrent que l'indice de sécheresse devrait augmenter légèrement sur l'ensemble du Québec en 2090, et ce, malgré une augmentation générale des précipitations plus importante au centre et

au nord du Québec (de 5 à 15 %) qu'au sud de la province (de 0 à 5 %) (Logan et al. 2011). Toutefois, Morin et al. (2012) ont démontré que l'épinette noire pouvait s'adapter rapidement à des conditions extrêmes de sécheresse à court terme, et retrouver rapidement, dans la même année, sa croissance initiale en diamètre après un stress hydrique.

3.3.2. Facteurs liés à la température

Les performances de l'épinette blanche et de l'épinette noire en plantation sont influencées non seulement par la température durant la saison de croissance, mais également par la température hivernale, même si celle-ci ne se traduit pas exactement par la même variable explicative.

Durant la saison de croissance, des températures plus élevées sur une longue période auront pour conséquence de réduire la croissance de l'épinette blanche et de l'épinette noire, surtout sur les sites où la disponibilité en eau représente un facteur limitant. L'épinette blanche semble toutefois plus sensible que l'épinette noire aux chaleurs extrêmes, reflétées par la température maximale d'été. Ce résultat corrobore ceux de Thomson et al. (2010), qui ont aussi démontré que la température maximale des mois de mai, juin et juillet permettait non seulement de prévoir la performance de l'épinette blanche (hauteur totale, pousse annuelle et diamètre), mais aussi son taux de survie et ses dates de débourrement et d'aoûtement.

La croissance de l'épinette noire, quant à elle, est plus fortement influencée par la somme des degrés-jours supérieurs à 0 °C durant la saison de croissance. Bergeron (2011) a observé que la productivité de l'épinette noire était étroitement reliée aux degrés-jours de croissance et à la température. Une plus grande activité photosynthétique au printemps et en été augmente sa croissance. À la limite des arbres au nord au Québec, c'est plutôt la température estivale qui influencerait davantage la largeur du bois initial et du bois final (Wang 2000) ainsi que la croissance en hauteur des épinettes noires (Gamache et Payette 2005), par rapport à des épinettes noires établies plus au sud.

Un aspect surprenant de nos résultats est que la performance des plantations d'épinette blanche et d'épinette noire soit influencée par les températures hivernales. Chez l'épinette blanche, des températures hivernales plus chaudes (température moyenne des mois d'hiver) seraient bénéfiques à la croissance des plantations. Chez l'épinette noire, ce sont des extrêmes hivernaux (plus basses températures minimales annuelles) moins rigoureux qui favoriseraient la croissance des plantations. Thomson et al. (2009), qui ont développé un modèle

de transfert pour l'épinette noire en Ontario, n'ont retenu qu'une seule variable, la température maximale de février, pour prévoir la performance en hauteur des sources de semences. Ils ont rapporté des valeurs de R^2 variant de 0,19 à 0,31 pour 5 des 7 sites de plantations répartis du sud au nord de la province. Berninger *et al.* (2011) (dans Bergeron, 2011) ont d'ailleurs observé que la température hivernale était le facteur climatique prédominant qui expliquait la croissance de l'épinette noire. Bien que l'hiver soit généralement considéré comme une saison où les arbres sont en dormance et au cours de laquelle l'activité biologique cesse, plusieurs processus écologiques comme l'activité métabolique (Kozłowski *et al.* 1991), la respiration du sol (Clein et Schimel 1995) ou l'activité enzymatique du sol (Bremner et Zanuta 1975) peuvent persister à des températures qui sont près ou sous le point de congélation, même si les températures optimales sont plus élevées (Campbell *et al.* 2005). En hiver, l'augmentation prévue des précipitations dans le nord du Québec se ferait principalement sous forme de pluie, en raison de l'augmentation des températures; une diminution de la durée de la période d'enneigement et de l'épaisseur de la couche de neige aurait des conséquences sur la température du sol. Advenant le retard dans la formation du couvert de neige à la fin de l'automne, les sols pourraient geler en profondeur et rester ainsi durant tout l'hiver, ce qui affecterait les processus écologiques (Goodrich 1982). L'alternance du gel et du dégel pourrait également accélérer la décomposition de la litière, le taux de minéralisation, le lessivage des éléments minéraux et les flux de gaz, et ainsi avoir une grande influence sur les cycles du carbone et de l'azote (Campbell *et al.* 2005).

3.3.3. Importance de considérer conjointement la disponibilité en eau et la température

En Ontario, Thomson *et al.* (2009) ont développé des modèles de transfert qui identifient les variables et valeurs climatiques qui maximisent la croissance en hauteur des plantations. Les variables associées aux températures mensuelles moyennes étaient beaucoup plus fortement corrélées à la croissance en hauteur maximale de l'épinette noire que celles associées aux précipitations. Les auteurs avouent d'ailleurs ne pas comprendre cette absence de relation significative entre la hauteur et les variables de précipitations, puisque des études ont permis de conclure que les précipitations printanières avaient une influence positive sur la croissance de l'épinette noire au Québec (Hofgaard *et al.* 1999, étude réalisée entre le 48° et le 51° parallèle nord). Wicha *et al.* (2009), qui ont étudié la relation entre le climat et la largeur des cernes dans 25 populations d'épinette noire réparties sur un large territoire au sein de

la péninsule Québec-Labrador, arrivent aux mêmes conclusions que Thomson *et al.* (2009). Ils ont en effet démontré que les températures n'expliquent jamais plus de 44 % des variations de croissance, et que les fonctions de réponse aux précipitations ne sont jamais significatives. Ils ont toutefois détecté de grandes variations entre les populations, variations qui impliquent aussi bien la température que les précipitations. Par exemple, les populations situées en altitude, où le climat est plus rigoureux, ont une meilleure croissance lorsque la température estivale est plus élevée, que les hivers sont plus doux et qu'elles bénéficient d'une forte accumulation de neige. En revanche, les populations situées à proximité du réservoir Manicouagan réagissent négativement à des précipitations abondantes en juillet et en août (Wicha *et al.* 2009). Quoi qu'il en soit, un modèle à une seule variable (ici, la température maximale de février) n'est probablement pas le meilleur pour prédire la croissance. Voilà pourquoi les auteurs s'entendent sur le fait que les modèles de transfert devraient incorporer à la fois des variables de température et des variables de précipitations, à cause de leur forte interaction sur la croissance des plantes (Cherry et Parker 2003, Hofgaard *et al.* 1999, Matyas 1996).

Bergeron (2011) a mis en relation la température et la disponibilité en eau et en éléments nutritifs avec la croissance radiale de 4 espèces boréales dominantes (l'épinette noire, le pin gris, le bouleau jaune et le peuplier faux-tremble) le long d'un gradient latitudinal de l'Outaouais à la baie James, et projeté cette relation dans le futur. Ainsi, au sud du Québec, les arbres seraient exposés à des conditions qui n'avaient jusque là jamais été rencontrées par les espèces boréales au cours des 300 dernières années, soit des températures plus chaudes qui augmenteraient l'évapotranspiration des arbres. Même si les précipitations augmentaient légèrement, elles ne suffiront pas à combler l'évaporation, et la croissance des épinettes en sera réduite. Au contraire, les sites les plus nordiques, où les arbres seraient soumis à des températures plus élevées, pourraient devenir plus productifs dans le futur, dans la mesure où les précipitations n'y sont pas trop abondantes. En effet, comme nous l'avons observé, le déplacement vers un milieu plus froid et où les précipitations sont plus abondantes qu'au lieu d'origine aurait pour effet de réduire la croissance de l'épinette blanche.

3.4. Importance du choix des sources de semences

Nous avons évalué l'effet de la source de semences utilisée sur le rendement futur attendu en volume marchand des plantations, tel que calculé

en utilisant les modèles de transfert développés dans la présente étude. À titre d'exemple pour l'épinette blanche, nous avons simulé le rendement d'une plantation réalisée à Cabano, dans le domaine de la sapinière (Figure 15). Pour l'épinette noire, le rendement a été calculé pour une plantation réalisée à Chibougamau, dans le domaine de la pessière (Figure 18). Dans ces 2 exemples, seuls quelques vergers ont été utilisés; à des fins opérationnelles, il faudra reprendre l'exercice en simulant le rendement de la totalité des vergers à graines au Québec afin de dégager le portrait réel et ainsi faire des recommandations éclairées aux aménagistes forestiers. Les exemples présentés nous permettent tout de même d'observer les principales tendances.

3.4.1. Pour l'épinette blanche

Au cours de la première période (2046-2065), les gains de croissance attendus des plantations d'épinette blanche issues de sources locales sont de 3 % dans le domaine de l'érablière et de 13 % dans celui de la sapinière. Ces gains sont dus à l'amélioration des conditions de croissance des arbres, mais ils pourraient être encore plus intéressants si une source de semences externe avait été choisie. Dans la sapinière, l'exemple des semences du verger à graines de Duchesnay utilisées pour produire des plants afin de reboiser un site à Cabano démontre qu'en choisissant la bonne source, on pourrait non seulement compenser la perte prévue de volume marchand au cours de la période suivante (2081-2099), mais même doubler le gain (de 11 à 22 %) par rapport à l'utilisation de la source locale du verger d'Estcourt. La plupart du temps, ce sont les déplacements du sud vers le nord qui permettent de maximiser le rendement des plantations, comme l'ont démontré plusieurs études portant sur les conifères de la forêt boréale, y compris le pin gris (Thomson et Parker 2008, Xiao 2005) et l'épinette noire (Riddell 2004, Thomson et al. 2009). Dans le domaine de l'érablière toutefois, ces sources pourraient ne plus être disponibles dans le futur, puisqu'elles se situeraient alors en dehors de l'aire de répartition potentielle de l'espèce. Pour l'instant, nous simulerons tout de même le rendement futur des vergers actuels de le domaine de l'érablière.

Dans le domaine de la pessière, nos modèles prévoient que l'épinette blanche connaîtrait des augmentations de volume marchand de 22 % pour la période 2046-2065 et de 5 % pour 2081-2099. De manière générale, les études en génétique forestière nous ont démontré que le recours à des sources méridionales permettrait d'aller chercher des gains de rendement encore plus intéressants. Cependant,

les raisons évoquées plus haut (section 3.2.3) ainsi que notre expérience passée nous incitent à la prudence. En effet, dans le cadre du programme d'amélioration génétique de l'épinette blanche au Québec, des tests établis dans le domaine de la pessière et composés de sources locales ont montré qu'à l'âge de 10 ans, la hauteur moyenne des arbres était très faible (de 1,45 à 1,7 m), soit moins que la moitié de la hauteur atteinte dans les domaines de la sapinière et de l'érablière. Les sources locales de semences ont même été plus performantes que des sources plus méridionales provenant des domaines de la sapinière (de 2,4 à 4,9 %) et de l'érablière (de 3,1 à 4,2 %). De plus, ces dernières montraient une plus grande sensibilité aux maladies (rouilles).

Avant de décider de transférer des sources de semences d'épinette blanche vers des latitudes élevées de la pessière, nous conseillons de prendre en compte les dates de débourrement et d'aoûtement des arbres (Thomson et al. 2010) et la fréquence des événements de températures extrêmes. De fait, ces facteurs causent des problèmes plus importants que ceux liés à un léger changement de la température moyenne (Cox et Malcolm 1997, Flannigan et Bergeron 1998). Dans les plantations à grande échelle, il serait plus prudent de favoriser des transferts progressifs, aussi bien dans le temps que dans l'espace. Les plantations expérimentales, par exemple dans des dispositifs de migration assistée qui pourront être « plus osées » quant à l'amplitude des déplacements, permettront d'acquérir les connaissances nécessaires pour guider les choix opérationnels qui seront faits ultérieurement.

3.4.2. Pour l'épinette noire

Le climat futur aurait un impact négatif majeur sur les plantations d'épinette noire dans le domaine de l'érablière, qui y perdraient près du tiers de leur rendement en volume marchand au cours de la période 2046-2065. Le choix d'une source plus méridionale pourrait certes diminuer cette perte. Cependant, **cette stratégie ne pourra pas contribuer à maintenir le rendement actuel de l'épinette noire dans le domaine de l'érablière.** Dans ceux de la sapinière et de la pessière, l'amélioration des conditions de croissance d'ici 2046 devrait contribuer à augmenter le volume marchand des plantations. L'utilisation d'une source de semences plus méridionale pourrait avoir un effet bénéfique sur le rendement, puisque l'espèce est moins susceptible aux gels que l'épinette blanche. Il est toutefois difficile de se prononcer sur le rendement de l'épinette noire à plus long terme, considérant la grande incertitude associée aux prévisions.

Conclusion

Dans un contexte d'aménagement écosystémique, les plantations à haut rendement, principalement dans les aires d'intensification de la production ligneuse, font partie des options offertes aux aménagistes pour maintenir la productivité des forêts et concentrer la production ligneuse sur une faible portion du territoire. Maintenant que les effets des changements climatiques sur les forêts mondiales sont de plus en plus visibles (comme en témoigne, par exemple, le dépérissement causé par la sécheresse en Europe), le succès de ces plantations reposera sur un choix judicieux des sources de semences, qui permettra aux plants mis en terre d'être non seulement bien adaptés au climat actuel, mais également à celui du futur (Beaulieu 2011). Comment choisir alors les sources à planter à chaque endroit, sachant que les conditions environnementales locales sont appelées à changer? Les modèles de transfert présentés dans la présente étude sont basés sur des mesures de croissance de plusieurs sources de semences plantées dans une variété d'environnements. Ils ont l'avantage de prendre en considération la variation qui existe entre les différentes populations d'une espèce quant à leur capacité d'adaptation à un changement rapide du climat, ce qui n'est pas le cas des modèles d'habitats. De plus, ces nouveaux modèles de transfert prévoient l'effet des changements climatiques non seulement sur la hauteur des arbres, mais sur le rendement en volume marchand (m^3/ha) des plantations partout au Québec, pour différentes périodes dans le futur. Dans ce sens, ils pourraient être intégrés dans le logiciel Woodstock/Stanley qui est actuellement utilisé au Québec pour les calculs de la possibilité forestière. Les responsables régionaux du Ministère, qui ont maintenant à choisir les stratégies d'aménagement forestier pour la mise en œuvre de l'actuel régime forestier, pourraient entrer eux-mêmes les coordonnées des terrains à reboiser

et des différentes sources de semences disponibles (vergers à graines, tests génétiques, peuplements semenciers, plantations existantes, etc.) pour calculer les rendements futurs attendus en volume marchand des plantations. Dans ce sens, les modèles de transfert constituent un outil d'aide à la décision et doivent être considérés comme l'une des composantes de la stratégie générale d'adaptation aux changements climatiques. Les modèles développés ici seront utilisés par la DRF pour réviser les territoires d'utilisation des vergers à graines. Ceux-ci, jusqu'à présent considérés comme statiques, doivent devenir plus dynamiques, puisqu'avec la rapidité anticipée des changements climatiques, les populations deviendront mésadaptées à leur climat local (Kramer et Havens 2009, Vitt *et al.* 2010). Les nouveaux territoires d'utilisation ainsi définis pourront orienter un éventuel projet de recherche et de développement visant à faciliter l'adaptation des espèces par la migration assistée.

Pour les autres espèces utilisées pour le reboisement au Québec, nous ne disposons pas de tests de provenances qui nous renseignent sur la variation adaptative sur le territoire (Potter et Hargrove 2012). En conséquence, nous ne pouvons développer de tels modèles de transfert pour ces espèces. Le choix des sources de semences les mieux adaptées au climat futur représente donc un défi majeur. Le recours aux enveloppes climatiques nous permettra alors de jumeler les sources de semences et les sites de reboisement qui maximiseront les chances d'adaptation et de croissance des espèces. Nous pourrions également tirer profit des connaissances acquises pour établir des règles d'utilisation générales, par exemple celle d'éviter les transferts sur de grandes distances qui ont pour effet d'augmenter fortement les risques de mortalité résultant d'une mésadaptation (Matyas et Yeatman 1992).

Références

- Allen, C.D., A.K. Macalady, H. Chenchouni, D. Bachelet, N. McDowell, M. Vennetier, T. Kitzberger, A. Rigling, D.D. Breshears, E.H. Hogg, P. Gonzalez, R. Fensham, Z. Zhang, J. Castro, N. Demidova, J.-H. Lim, G. Allard, S.W. Running, A. Semerci et N. Cobb, 2010. *A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests*. *For. Ecol. Manage.* 259: 660-684.
- Andalo, C., J. Beaulieu et J. Bousquet, 2005. *The impact of climate change on growth of local white spruce populations in Québec, Canada*. *For. Ecol. Manage.* 205: 169-182.
- Andreae, M.O., C.D. Jones et P.M. Cox, 2005. *Strong present-day aerosol cooling implies a hot future*. *Nature* 435: 1187-1190.
- Beaulieu, J., 2011. *Un vent de changement souffle sur les essences forestières canadiennes*. L'éclaircie Numéro 70. Bulletin du Service canadien des forêts, Centre de foresterie des Laurentides, Numéro de catalogue Fo113-1/70-2011F. [<http://cfs.nrcan.gc.ca/pubwarehouse/pdfs/32984.pdf>].
- Beaulieu, J. et A. Rainville, 2005. *Adaptation to climate change: genetic variation is both a short- and a long-term solution*. *For. Chron.* 81: 704-709.
- Beaulieu, J., M. Perron et J. Bousquet, 2004. *Multivariate patterns of adaptive genetic variation and seed source transfer in Picea mariana*. *Can. J. For. Res.* 34: 531-545.
- Beaulieu, J., F. Raulier, G. Prigent et J. Bousquet, 2011. *Predicting site index from climatic, edaphic, and stand structural properties for seven plantation-grown conifer species in Québec*. *Can. J. For. Res.* 41: 682-693.
- Bergeron, Y., 2011. *Influence des changements climatiques sur le rendement de la forêt boréale mixte*. Rapport final soumis au CRSNG et à Ouranos. 18 p. [www.ouranos.ca/media/publication/225_RapportBergeron-2011.pdf].
- Bergeron, Y. et S. Archambault, 1993. *Decreasing frequency of forest fires in the southern boreal zone of Québec and its relation to global warming since the end of the « little ice age »*. *Holocene* 3: 255-259.
- Bolghari, H.A. et V. Bertrand, 1984. *Tables préliminaires de production des principales essences résineuses plantées dans la partie centrale du sud du Québec*. Gouvernement du Québec, Ministère de l'Énergie et des Ressources, Service de la recherche. Mémoire de recherche forestière n° 79. 392 p. [www.mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Divers/Memoire79.pdf].
- Bremner, J.M. et M.I. Zanuta, 1975. *Enzyme activity in soils at sub-zero temperatures*. *Soil. Biol. Biochem.* 7: 383-387.
- Briffa, K.R., V.V. Shishov, T.M. Melvin, E.A. Vaganov, H. Grudd, R.M. Hantemirov, M. Eronene et M.M. Naurzbaev, 2008. *Trends in recent temperature and radial tree growth spanning 2000 years across northwest Eurasia*. *Philos. Trans. R. Soc., B* 363: 2269-2282.
- Campbell, L.J., M.J. Mitchell, P.M. Groffman, L.M. Christenson et J.P. Hardy, 2005. *Winter in northeastern North America: a critical period for ecological processes*. *Front. Ecol. Environ.* 3(6): 314-322.
- Carter, K.K., 1996. *Provenance tests as indicators of growth response to climate change in 10 north temperate tree species*. *Can. J. For. Res.* 26: 1089-1095.
- Cherry, M. et W.H. Parker, 2003. *Utilization of genetically improved stock to increase carbon sequestration*. Ontario Ministry of Natural Resources, Ontario Forest Research Institute, Sault Ste. Marie, ON. *For. Res. Rep.* n° 160. 15 p.
- Christensen, J.H., B. Hewitson, A. Busuioc, A. Chen, S. Gao, I. Held, R. Jones, R.K. Kolli, W.-T. Kwon, R. Laprise, V. Magaña Rueda, L. Mearns, C.G. Menéndez, J. Räisänen, A. Rinke, A. Sarr et P. Whetton, 2007. *Regional climate projections*. Chapitre 11 dans : Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor et H.L. Miller (éditeurs). *Climate change 2007: The physical science basis*. Contribution du Groupe de travail I au Quatrième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. Cambridge University Press, Cambridge (Royaume-Uni) et New York, NY (États-Unis), p. 847-940. [www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg1/ar4-wg1-chapter11.pdf].

- Chuine, I., P. Yiou, N. Viovy, B. Seguin, V. Daux et E.L. Ladurie, 2004. *Historical phenology: grape ripening as a past climate indicator*. *Nature* 432: 289-290.
- Clein, J.S. et J.P. Schimel, 1995. *Microbial activity of tundra and taiga soils at sub-zero temperatures*. *Soil. Biol. Biochem.* 27: 1231-1234.
- Coulombe, S., P.Y. Bernier et F. Raulier, 2009. *Uncertainty in detecting climate change impact on the projected yield of black spruce (Picea mariana)*. *For. Ecol. Manage.* 259: 730-738.
- Cox, R.M. et J.W. Malcolm, 1997. *Effects of duration of a simulated winter thaw on dieback and xylem conductivity of Betula papyrifera*. *Tree Physiol.* 17: 389-396.
- Crookston, N.L. et G.E. Dixon, 2005. *The forest vegetation simulator: a review of its structure, content, and applications*. *Comput. Electron. Agric.* 49: 60-80.
- Crookston, N.L., G.E. Rehfeldt, G.E. Dixon et A.R. Weiskittel, 2010. *Addressing climate change in the forest vegetation simulator to assess impacts on landscape forest dynamics*. *For. Ecol. Manage.* 260: 1198-1211.
- Crowe, K.A. et W.H. Parker, 2008. *Using portfolio theory to guide reforestation and restoration under climate change scenarios*. *Clim. Change* 89: 355-370.
- Danby, R.K. et D.S. Hik, 2007. *Response of white spruce (Picea glauca) to experimental warming at a subarctic alpine tree line*. *Glob. Change Biol.* 13: 437-451.
- Davis, L.S., K.N. Johnson, P.S. Bettinger et T.E. Howard, 2001. *Forest management: To sustain ecological, economic and social values*. 3rd edition. McGraw-Hill, New York, NY (États-Unis). 804 p.
- Davis, M.B. et R.G. Shaw, 2001. *Range shifts and adaptive responses to Quaternary climate change*. *Science* 292: 673-679.
- Dyke, A.S., A. Moore et L. Robertson, 2003. *Deglaciation of North America. Geological survey of Canada Open File 1547*. Ottawa: Natural Resources Canada. Mise à jour du 16 décembre 2011. [<https://www.mcgill.ca/library/find/maps/deglaciation>].
- Flannigan, M.D. et Y. Bergeron, 1998. *Possible role of disturbance in shaping the northern distribution of Pinus resinosa*. *J. Veg. Sci.* 9: 477-482.
- Flato, G.M. et G.J. Boer, 2001. *Warming asymmetry in climate change simulations*. *Geophys. Res. Lett.* 28: 195-198.
- Flato, G.M., G.J. Boer, W.G. Lee, N.A. McFarlane, D. Ramsden, M.C. Reader et A.J. Weaver, 2000. *The Canadian Centre for Climate Modeling and Analysis global coupled model and its climate*. *Clim. Dyn.* 16: 451-467.
- Gamache, I. et S. Payette, 2005. *Latitudinal response of subarctic tree lines to recent climate change in eastern Canada*. *J. Biogeogr.* 32: 849-862. [www.chairenordiquecrsng.ulaval.ca/chaire_fr/PDF/GamachePayette2005.pdf].
- Gewehr, S., 2011. *Influence du climat et de l'épaisseur de la couche organique sur la croissance et la distribution du peuplier faux-tremble et de l'épinette noire dans le nord-ouest du Québec*. Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Montréal. Programme extensionné à l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue. 135 p.
- Glecker, P.J., K.E. Taylor et C. Doutriaux, 2008. *Performance metrics for climate models*. *J. Geophys. Res.* 113: D06104.
- Goodrich, L.E., 1982. *The influence of snow cover on the ground thermal regime*. *Can. Geotech. J.* 19: 421-432.
- Gray, P.A., 2005. *Impacts of climate change on diversity in forested ecosystems: Some examples*. *For. Chron.* 81: 655-661.
- Hamann, A. et T. Wang, 2006. *Potential effects of climate change on ecosystem and tree species distribution in British Columbia*. *Ecology* 87: 2773-2786.
- Harsch, M.A., P.E. Hulme, M.S. McGlone et R.P. Duncan, 2009. *Are treelines advancing? A global meta-analysis of treeline responses to climate warming*. *Ecol. Lett.* 12: 1040-1049.
- Hofgaard, A., J. Tardif et Y. Bergeron, 1999. *Dendroclimatic response of Picea mariana and Pinus banksiana along a latitudinal gradient in the eastern Canadian boreal forest*. *Can. J. For. Res.* 29: 1333-1346.
- Huang, J., J.C. Tardif, Y. Bergeron, B. Denneler, F. Berninger et M.P. Girardin, 2010. *Radial growth response of four dominant boreal tree species to climate along a latitudinal gradient in the eastern Canadian boreal forest*. *Glob. Change Biol.* 16: 711-731.
- IPCC [Intergovernmental Panel on Climate Change], 2007. *Climate Change 2007: Synthesis report. Summary for policymakers*. IPCC Plenary XXVII, Valence (Espagne), 12 au 17 Novembre 2007. 22 p. [https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr_spm.pdf].

- Iverson, L.R. et A.R. Prasad, 2002. *Potential redistribution of tree species habitat under five climate change scenarios in the eastern US*. For. Ecol. Manage. 155: 205-222.
- Iverson, L.R., M.W. Schwartz et A.M. Prasad, 2004. *How fast and far might tree species migrate in the eastern United States due to climate change?* Global Ecol. Biogeogr. 13: 209-219.
- Jansson, G., 2007. *Gains from selecting Pinus sylvestris in southern Sweden for volume per hectare*. Scand. J. For. Res. 22: 185-192.
- Jungclaus, J.H., N. Keenlyside, M. Botzet, H. Haak, J.-J. Luo, M. Latif, J. Marotzke, U. Mikolajewicz et E. Roeckner, 2006. *Ocean circulation and tropical variability in the coupled model ECHAM5/MPI-OM*. J. Clim 19: 3952-3972.
- Joyce, G.J. et G.E. Rehfeldt, 2013. *Climatic niche, ecological genetics, and impact of climate change on eastern white pine (Pinus strobus L.): Guidelines for land managers*. For. Ecol. Manage. 295(2013): 173-192.
- Knutti, R. et G.C. Hegerl, 2008. *The equilibrium sensitivity of the Earth's temperature to radiation-changes*. Nat. Geosci. 1: 735-743.
- Kozlowski, T.T., P.J. Kramer et S.G. Pallardy, 1991. *The physical ecology of woody plants*. Academic press, New York, NY (États-Unis). 657 p.
- Kramer, A. et K. Havens, 2009. *Plant conservation genetics in a changing world*. Trends Plant Sci. 14: 599-607.
- Kullman, L., 2001. *20th century climate warming and tree limit rise in the Scandes of Sweden*. Ambio 30: 72-80.
- Kurtz, W.A., G. Stinson et G. Rampley, 2008. *Could increased boreal forest ecosystem productivity offset carbon losses from increased disturbances?* Philos. Trans. R. Soc., B 363: 2259-2268.
- Leblanc, D.C. et M.A. Terrell, 2009. *Radial growth response of white oak to climate in eastern North America*. Can. J. For. Res. 39: 2180-2192.
- Ledig, F.T. et J.H. Kitzmiller, 1992. *Genetic strategies for reforestation in the face of global climate change*. For. Ecol. Manage. 50: 153-169.
- Lenton, T.M., H. Held, E. Kriegler, J.W. Hall, W. Lucht, S. Rahmstorf et H.J. Schellnhuber, 2008. *Tipping elements in the Earth's climate system*. Proc. Natl Acad. Sci. U.S.A. 105: 1786-1793.
- Loehle, C., 2003. *Competitive displacement of trees in response to environmental change or introduction of exotics*. Environ. Manage. 32: 106-115.
- Logan, T., I. Charron, D. Chaumont et D. Houle, 2011. *Atlas de scénarios climatiques pour la forêt québécoise*. Ouranos et ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Direction de la recherche forestière. 55 p. + annexes. [www.mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connais-sances/recherche/Houle-Daniel/AtlasOuranos.pdf].
- MacDonald, G.M., A.A. Velichko, C.V. Kremenetski, O.K. Borisova, A.A. Goleva, A.A. Andreev, L.C. Cwynar, R.T. Riding, S.L. Forman, T.W.D. Edwards, R. Aravena, D. Hammarlundf, J.M. Szeicz et V.N. Gattaulin, 2000. *Holocene tree line history and climate change across northern Eurasia*. Quat. Res. 53: 302-311.
- MacDonald, G.M., K.V. Kremenetski et D.W. Beilman, 2008. *Climate change and the northern Russian treeline zone*. Philos. Trans. R. Soc., B 363: 2283-2299.
- Malcolm, J.R., A. Markham, R.P. Neilson et M. Garaci, 2002. *Estimated migration rates under scenarios of global climate change*. J. Biogeogr. 29: 835-849.
- Malmsheimer, R.W., P. Heffernan, S. Brink, D. Crandall, F. Deneke, C. Galik, E. Gee, J.A. Helms, N. McClure, M. Mortimer, S. Ruddell, M. Smith et J. Stewart, 2008. *Forest management solutions for mitigating climate change in the United States*. J. For. 106(3): 115-173.
- Matyas, C., 1996. *Climate adaptation of trees: rediscovering provenance tests*. Euphytica 92: 45-54.
- Matyas, C. et W. Yeatman, 1992. *Effect of geographical transfer on growth and survival of jack pine (Pinus banksiana Lamb.) populations*. Silvae Genet. 41(6): 370-375.
- McLachlan, J.S., J.S. Clark et P.S. Manos, 2005. *Molecular indicators of tree migration capacity under rapid climate change*. Ecology 86: 2088-2098.
- Meehl, G.A., C. Covey, K.E. Taylor, T. Delworth, R.J. Stouffer, M. Latif, B. McAyaney et J.F.B. Mitchell, 2007. *The WCRP CMIP3 multi-model dataset – A new era in climate change research*. Bull. Am. Meteor. Soc. 88: 1383-1394.

- Meinshausen, M., N. Meinshausen, W. Hare, S.C.B. Raper, K. Frieler, R. Knutti, D.J. Frame et M.R. Allen, 2009. *Greenhouse gas emission targets for limiting global warming to 2 °C*. *Nature* 459: 1158-1162.
- Morgenstern, E.K., 1996. *Geographic variation in forest trees: Genetic basis and application of knowledge in silviculture*. UBC Press, Vancouver, CB. 209 p.
- Morin, H., C.K. Krause, A. Deslauriers et D. Houle, 2012. *Effets de la température et d'un stress hydrique sur la xylogénèse, la dynamique d'utilisation des glucides et la qualité du bois de l'épinette noire*. Rapport final soumis au CRSNG et à Ouranos. 17 p. [www.ouranos.ca/media/publication/267_RapportMorinB2013.pdf].
- Music, B. et D. Caya, 2007. *Evaluation of the hydrological cycle over the Mississippi River basin as simulated by the Canadian Regional Climate Model (CRCM)*. *J. Hydrometeor.* 8: 969-988.
- Nakicenovic, N., J. Alcamo, G. Davis, B. de Vries, J. Fenhann, S. Gaffin, K. Gregory, A. Grübler, T. Yong Jung, T. Kram, E.L. La Rovere, L. Michaelis, S. Mori, T. Morita, W. Pepper, H. Pitcher, L. Price, K. Riahi, A. Roehrl, H.-H. Rogner, A. Sankovski, M. Schlesinger, P. Shukla, S. Smith, R. Swart, S. van Rooijen, N. Victor et Z. Dadi, 2000: *Emissions scenarios*. Rapport spécial du Groupe de Travail III du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. Nakicenovic, N. et R. Swart (éditeurs). Cambridge University Press, Cambridge (Royaume-Uni), 599 p. [www.ipcc.ch/ipccreports/sres/emission/index.php?idp=0].
- O'Neill, G.A., A. Hamann et T. Wang, 2008. *Accounting for population variation improves estimates of the impact of climate change on species' growth and distribution*. *J. Appl. Ecol.* 45: 1040-1049.
- O'Neill, G.A. et G. Nigh, 2011. *Linking population genetics and tree height growth models to predict impacts of climate change on forest production*. *Glob. Change Biol.* 17: 3208-3217.
- Ouranos, 2010. *Savoir s'adapter aux changements climatiques*. Rédigé par C. Desjarlais, M. Allard, A. Blondlot, A. Bourque, D. Chaumont, P. Gosselin, D. Houle, C. Larivée, N. Lease, R. Roy, J.P. Savard, R. Turcotte et C. Villeneuve, Montréal, QC. 128 p. [www.ouranos.ca/fr/pdf/53_sscc_21_06_lr.pdf].
- Papadopol, C.S., 2000. *Impacts of climate warming on forests in Ontario: options for adaptation and mitigation*. *For. Chron.* 76: 139-149.
- Parker, W.C., S.J. Colombo, M.L. Cherry, M.D. Flannigan, S. Greifenhagen, R.S. McAlpine, C. Papadopol et T. Scarr, 2000. *Third millennium forestry: what climate change might mean to forests and forest management in Ontario*. *For. Chron.* 76: 445-463.
- Parnesan, C., 2006. *Ecological and evolutionary responses to recent climate change*. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.* 37: 637-669.
- Pearson, R.G., 2006. *Climate change and the migration capacity of species*. *Trends Ecol. Evol.* 21: 111-113.
- Pedlar, J.H., D.W. McKenney, J. Beaulieu, S.J. Colombo, J.S. McLachlan et G.A. O'Neill, 2011. *The implementation of assisted migration in Canadian forests*. *For. Chron.* 87: 766-777.
- Pedlar, J.H., D.W. McKenney, I. Aubin, T. Beardmore, J. Beaulieu, L. Iverson, G.A. O'Neill, R.S. Winder et C. Ste-Marie, 2012. *Placing forestry in the assisted migration debate*. *BioScience* 62(9): 835-842.
- Peng, C, Z. Ma, X. Lei, Q. Zhu, H. Chen, W. Wang, S. Liu, W. Li, X. Fang et X. Zhou, 2011. *A drought-induced pervasive increase in tree mortality across Canada's boreal forests*. *Nat. Clim. Change* 1: 467-471.
- Périé, C, S. de Blois, M.-C. Lambert et N. Casajus, 2014. *Effets anticipés des changements climatiques sur l'habitat des espèces arborescentes au Québec*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles, Direction de la recherche forestière. Mémoire de recherche forestière n° 173. 46 p. [www.mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Perie-Catherine/Memoire173.pdf].
- Plummer, D.A., D. Caya, A. Frigon, H. Côté, M. Giguère, D. Pâquin, S. Biner, R. Harvey et R. de Elia, 2006. *Climate and climate change over North America as simulated by the Canadian RCM*. *J. Clim.* 19: 3112-3132.
- Porté, A. et H.H. Bartelink, 2002. *Modelling mixed forest growth: a review of models for forest management*. *Ecol. Modell.* 150: 141-188.
- Potter, K.M. et W.W. Hargrove, 2012. *Determining suitable locations for seed transfer under climate change: a global quantitative method*. *New For.* 43 : 581-599.

- Prégent, G. et S. Végiard, 2000. *Rendement anticipé des plantations d'épinette noire dans les domaines écologiques de la pessière noire*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles, Direction de la recherche forestière. Note de recherche forestière n° 109. 12 p. [www.mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/pregent-guy/note109.pdf].
- Prégent, G., V. Bertrand et L. Charette, 1996. *Tables préliminaires de rendement pour les plantations d'épinette noire au Québec*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles, Direction de la recherche forestière. Mémoire de recherche forestière n° 118. 88 p. [www.mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Pregent-Guy/Memoire118.pdf].
- Prégent, G., G. Picher et I. Auger, 2010. *Tarif de cubage, tables de rendement et modèles de croissance pour les plantations d'épinette blanche au Québec*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Direction de la recherche forestière. Mémoire de recherche forestière n° 160. 94 p. [www.mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Pregent-Guy/Memoire160.pdf].
- Purves, D. et S. Pacala, 2008. *Predictive models of forest dynamics*. *Science* 320: 1452-1453.
- Quesnel, P.O. et B. Côté, 2009. *Prevalence of phosphorus, potassium, and calcium limitations in white spruce across Canada*. *J. Plant Nutr.* 32: 1290-1305.
- Raymond, C.A. et D. Lindgren, 1990. *Genetic flexibility: a model for determining the range of suitable environments for a seed source*. *Silvae Genet.* 39: 112-120.
- Régnière, J. et R. Saint-Amant, 2008. *BioSIM 9 – Manuel de l'utilisateur*. Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts, Centre de foresterie des Laurentides, Québec, QC. Rapport d'information LAU-X-134F. 76 p. [cfs.nrcan.gc.ca/pubwarehouse/pdfs/28769.pdf].
- Régnière, J., 1996. *Generalized approach to landscape-wide seasonal forecasting with temperature-driven simulation models*. *Environ. Entomol.* 25: 869-881.
- Rehfeldt, G.E., N.M. Tchebakova et L.K. Barnhardt, 1999a. *Efficacy of climate transfer functions: introduction of Eurasian populations of Larix into Alberta*. *Can. J. For. Res.* 29: 1660-1668.
- Rehfeldt, G.E., C.C. Ying, D.L. Spittlehouse et D.A. Hamilton Jr., 1999b. *Genetic responses to climate in Pinus contorta: niche breadth, climate change, and reforestation*. *Ecol. Monogr.* 69: 375-407.
- Rehfeldt, G.E., N.M. Tchebakova, Y.I. Parfenova, R.A. Wykoff, N.A. Kuzmina et L.I. Milyutin, 2002. *Intraspecific responses to climate in Pinus sylvestris*. *Glob. Change Biol.* 8: 912-929.
- Rehfeldt, G.E., N.L. Crookston, M.V. Warwell et J.S. Evans, 2006. *Empirical analyses of plant-climate relationships for the western United States*. *Int. J. Plant Sci.* 167:1123-1150.
- Reich, P.B. et J. Oleksyn, 2008. *Climate warming will reduce growth and survival of Scots pine except in the far north*. *Ecol. Lett.* 11: 588-597.
- Riddell, C.L., 2004. *Climate change and black spruce: implications for future forests in Ontario*. Thesis (H.B.Sc.F.), Faculty of Forestry and the Forest Environment, Lakehead University, Thunder Bay, ON. 109 p.
- Roe, G.H. et M.B. Baker, 2007. *Why is climate sensitivity so unpredictable?* *Science* 318(5850): 329-632.
- Rubinstein, R.Y. et D.P. Kroese, 2007. *Simulation and the Monte Carlo method*, 2nd Edition. John Wiley & Sons, New York, NY (États-Unis), second edition, 372 p.
- Rweyongeza, D.M., R.-C. Yang, N.K. Dhir, L.K. Barnhardt et C. Hansen, 2007. *Genetic variation and climatic impacts on survival and growth of white spruce in Alberta, Canada*. *Silvae Genet.* 56: 117-127.
- Saamisto, M., 1975. *Stratigraphical studies on the shoreline displacement of Lake Superior*. *Can. J. Earth Sci.* 12: 300-319.
- SAS Institute Inc., 2004. *SAS/STAT 9.1 User's Guide*. SAS Institute Inc. Cary, NC (États-Unis). 5121 p.
- Saucier, J.-P., P. Grondin, A. Robitaille et J.-F. Bergeron, 2003. *Zones de végétation et domaines bioclimatiques du Québec*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles, de la Faune et des Parcs, Direction des inventaires forestiers. Code de diffusion : 2003-3043. [www.mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/zone-f.pdf].
- Savolainen, O., T. Pyhäjärvi et T. Knürr, 2007. *Gene flow and local adaptation in trees*. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.* 38: 595-619.

- Savva, Y, B. Denneler, A. Koubaa, F. Tremblay, Y. Bergeron et M.G. Tjoelker, 2007. *Seed transfer and climate change effects on radial growth of jack pine populations in a common garden in Petawawa, Ontario, Canada*. For. Ecol. Manage. 242: 636-647.
- Schmidting, R.C., 1994. *Use of provenance tests to predict response to climatic change: loblolly pine and Norway spruce*. Tree Physiol. 14: 805-817.
- Scinocca, J.F., N.A. McFarlane, M. Lazare, J. Li et D. Plummer, 2008: *Technical Note: The CCCma third generation AGCM and its extension into the middle atmosphere*. Atmos. Chem. Phys. 8: 7055-7074.
- Skovsgaard, J.P., J.K. Vanclay, 2008. *Forest site productivity: a review of the evolution of dendrometric concepts for even-aged stands*. Forestry 81: 13-31.
- St Clair, J.B. et G.T. Howe, 2007. *Genetic maladaptation of coastal Douglas-fir seedlings to future climates*. Glob. Change Biol. 13: 1441-1454.
- Tardif, J. et Y. Bergeron, 1997. *Ice flood history reconstructed with tree rings from the southern boreal forest limit, Western Québec*. The Holocene 7(3): 291-300.
- Thomson, A.M. et W.H. Parker, 2008. *Boreal forest provenance tests used to predict optimal growth and response to climate change: 1. Jack pine*. Can. J. For. Res. 38: 157-170.
- Thomson, A.M., C.L. Riddell et W.H. Parker, 2009. *Boreal forest provenance tests used to predict optimal growth and response to climate change: 2. Black spruce*. Can. J. For. Res. 39: 143-153.
- Thomson, A.M., K.A. Crowe et W.H. Parker, 2010. *Optimal white spruce breeding zones for Ontario under current and future climates*. Can. J. For. Res. 40: 1576-1587.
- Ung, C-H., P.Y. Bernier, F.Raulier, F., R.A. Fournier, M.-C. Lambert, J. et Régnière, J., 2001. *Biophysical site indices for shade tolerant and intolerant boreal species*. Forest Science, 47(1): 83-95.
- van Mantgem, P.J., N.L. Stephenson, J.C. Byrne, L.D. Daniels, J.F. Franklin, P.Z. Fulé, M.E. Harmon, A.J. Larson, J.M. Smith, A.H. Taylor et T.T. Veblen, 2009. *Widespread increase of tree mortality rates in the western United States*. Science 323(5913): 521-524.
- Vitt, P., K. Havens, A.T. Kramer, D. Sollenberger et E. Yates, 2010. *Assisted migration of plants: Changes in latitudes, changes in attitudes*. Biol. Conserv. 143: 18-27.
- Walther, G.-R., E. Post, P. Convey, A. Menzel, C. Parmesan, T.J.C. Beebee, J.-M. Fromentin, O. Hoegh-Guldberg et F. Bairlein, 2002. *Ecological responses to recent climate change*. Nature 416: 389-395.
- Wang, L., 2000. *La croissance de l'épinette noire comme indicateur de changements climatiques à la limite des arbres au nord du Québec*. Thèse de doctorat, Université Laval, Faculté des sciences et de génie, Chaire de recherche nordique en écologie des perturbations. 146 p.
- Wang, T., A. Hamann, A. Yanchuk, G.A. O'Neill et S.N. Aitken, 2006. *Use of response functions in selecting lodgepole pine populations for future climates*. Glob. Change Biol. 12: 2404-2416.
- Wang, T., G. O'Neill et S. N. Aitken, 2010. *Integrating environmental and genetic effects to predict responses of tree populations to climate*. Ecol. Appl. 20: 153-163.
- Wicha, S., J.-L. DesGranges, N. Nicault et Y. Bégin, 2009. *Analyse dendroclimatique de l'épinette noire dans l'aire de nidification d'oiseaux boréaux au Québec*. INRS-Eau, Terre et Environnement, Québec, QC. Rapport de recherche n° R1170. 37 p. [<http://espace.inrs.ca/575/1/R001170.pdf>].
- Wu, H.X. et C.C. Ying, 2004. *Geographic pattern of local optimality in natural populations of lodgepole pine*. For. Ecol. Manage. 194: 177-198.
- Xiao, B., 2005. *Present and future focal point seed zones for jack pine in northwestern Ontario*. Thesis (M.Sc.F), Lakehead University, Faculty of Forestry and the Forest Environment, Thunder Bay, ON. 208 p.
- Ying, C.C. et A.D. Yanchuk, 2006. *The development of British Columbia's tree seed transfer guidelines: purpose, concept, methodology, and implementation*. For. Ecol. Manage. 227:1-13.

Annexes

Annexe A. Liste des variables climatiques utilisées dans le projet.

Nom des variables	Définition
Altitude	Altitude (m)
Indice d'aridité*	Indice d'aridité (mm) [†]
Degrés-jours > 0 °C [‡]	Somme des degrés-jours > 0 °C [‡]
Degrés-jours > 5 °C [‡]	Somme des degrés-jours > 5 °C [‡]
Degrés-jours > 10 °C [‡]	Somme des degrés-jours > 10 °C [‡]
DPV	Déficit de pression de vapeur moyen (mBar)
Jours de gel	Nombre moyen de jours où la température minimale est < 0 °C dans une année
Jours sans gel	Plus grand nombre de jours sans gel dans une année
Jours de croissance	Période de croissance : Nombre de jours dans l'année entre les 3 premiers jours consécutifs sans gel et les 3 premiers jours consécutifs avec gel
Plus basse température minimale annuelle	Plus basse température minimale annuelle (°C)
Plus haute température maximale annuelle	Plus haute température maximale annuelle (°C)
Température maximale moyenne	Moyenne annuelle de la température journalière maximale (°C)
Température moyenne	Moyenne annuelle de la température journalière moyenne (°C)
Température minimale moyenne	Moyenne annuelle de la température journalière minimale (°C)
PET	Indice d'évapotranspiration potentielle (mm)
Précipitations utiles	Précipitations durant les mois de juin, juillet et août (mm)
Quantité de neige convertie en eau	Quantité annuelle de neige convertie en eau (mm)
Température maximale d'été	Moyenne de la température journalière maximale des mois d'été (juin, juillet, août) (°C)
Température moyenne d'hiver	Moyenne de la température journalière moyenne des mois d'hiver (décembre, janvier, février) (°C)
Température moyenne d'été	Moyenne de la température journalière moyenne des mois d'été (juin, juillet, août) (°C)
Température minimale d'hiver	Moyenne de la température journalière minimale des mois d'hiver (décembre, janvier, février) (°C)
Précipitations totales annuelles	Précipitations totales annuelles (mm)
Radiations totales annuelles	Radiations totales annuelles (MJ·m ⁻²)

* Ung *et al.* Forest Science, Volume 47, Number 1, 1 February 2001, pp. 83-95(13).

[†] Indice d'aridité = $\sum_{i=1}^{12} \text{Max}[0, (PET_i - PRE_i)]$, où PET_i est l'indice mensuel d'évapotranspiration potentielle et PRE_i correspond aux précipitations mensuelles (mm).

[‡] Degrés-jours > x °C = $\sum_{i=1}^{365} \text{Max}\left[0, \left(\frac{T_{\max_i} + T_{\min_i}}{2}\right) - x\right]$ où T_{\max_i} et T_{\min_i} = températures maximales et minimales (°C) du jour i .

Annexe B. Caractéristiques climatiques annuelles moyennes des 3 sites de plantation d'épinette blanche pour les périodes de 1941 à 1970 et de 1971 à 2000.

	La Patrie		Dablon		Mastigouche	
Latitude	45°20' N		48°21' N		46°38' N	
Longitude	71°15' O		72°13' O		73°13' O	
Altitude (m)	457		323		230	

Période	1941-1970	1971-2000	1941-1970	1971-2000	1941-1970	1971-2000
Indice d'aridité	4,38	2,09	3,40	3,70	5,80	3,94
DPV	1348,64	1248,33	1220,83	1248,92	1473,33	1563,39
Degrés-jours > 0 °C	2572,86	2645,03	2244,8	2348,09	2656,98	2565,33
Degrés-jours > 5 °C	1537,76	1601,07	1310,90	1400,10	1631,46	1551,44
Degrés-jours > 10 °C	745,51	790,64	601,89	672,92	832,26	766,93
Jours de gel	184,62	175,74	200,82	194,20	183,27	191,85
Jours sans gel	100,12	119,99	98,52	105,95	122,53	95,72
Jours de croissance	155,11	163,74	144,80	153,38	157,26	153,44
Plus haute température maximale annuelle	30,77	30,10	29,95	30,33	31,93	31,73
Plus basse température minimale annuelle	-35,85	-33,05	-41,11	-40,76	-37,07	-40,63
Température maximale moyenne	9,53	9,11	6,99	6,97	9,4	9,52
Température moyenne	3,79	4,06	1,32	1,62	3,65	3,11
Température minimale moyenne	-1,96	-1,00	-4,35	-3,74	-2,10	-3,31
PET	1037,21	1012,73	941,35	941,96	998,23	1022,84
Précipitations utiles	309,23	350,85	299,56	297,56	265,45	304,43
Quantité de neige convertie en eau	393,58	383,95	326,53	360,12	299,19	352,44
Température maximale d'été	22,40	22,05	21,16	21,59	23,47	23,52
Température moyenne d'hiver	-9,93	-9,84	-14,70	-14,76	-11,65	-12,63
Température moyenne d'été	16,30	16,61	15,35	15,96	17,27	16,71
Température minimale d'hiver	-15,67	-14,90	-20,78	-20,61	-17,40	-19,58
Précipitations totales annuelles	1072,98	1183,55	894,25	980,04	879,77	1080,14
Radiations totales annuelles	5113,94	4993,76	4906,32	4862,25	4934,68	5080,48

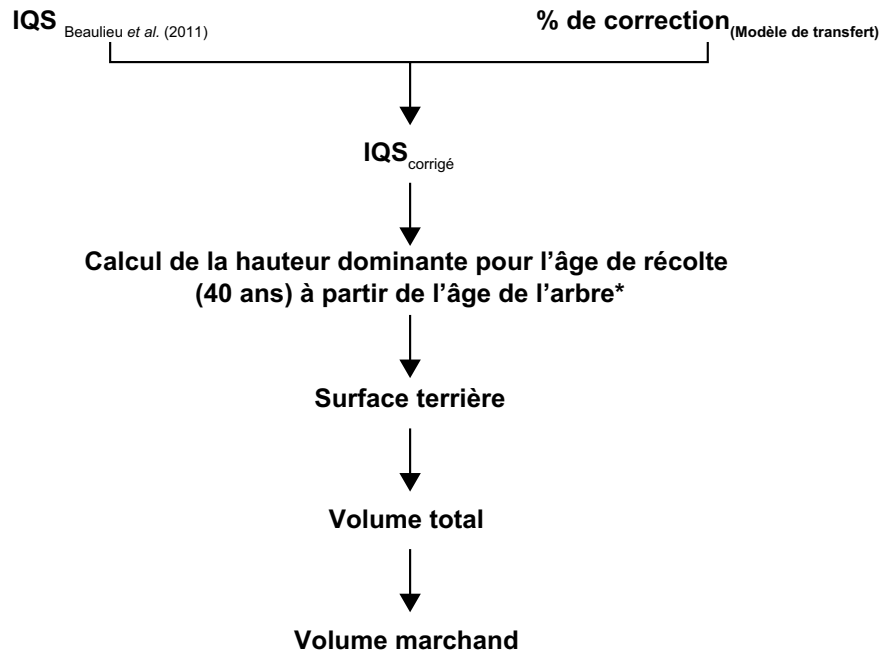
Annexe C. Caractéristiques climatiques annuelles moyennes des 4 sites de plantation d'épinette noire pour les périodes de 1941 à 1970 et de 1971 à 2000.

	Mont-Laurier		Lac St-Ignace		Chibougamau		Valcartier	
Latitude	46°36' N		49°00' N		50°03' N		46°52' N	
Longitude	75°48' O		66°20' O		74°10' O		71°32' O	
Altitude (m)	295		556		411		152	
Période	1941-1970	1971-2000	1941-1970	1971-2000	1941-1970	1971-2000	1941-1970	1971-2000
Indice d'aridité	5,19	3,61	3,64	2,66	1,92	1,40	2,39	1,78
DPV	1448,16	1423,66	1014,49	1056,44	1124,39	1217,14	1449,32	1352,42
Degrés-jours > 0 °C	2635,37	2561,97	1913,29	1990,14	1970,42	1992,85	2649,38	2678,43
Degrés-jours > 5 °C	1602,21	1548,04	1039,65	1109,17	1106,85	1142,44	1605,74	1645,36
Degrés-jours > 10 °C	804,43	764,21	419,81	468,76	474,93	510,59	803,35	843,05
Jours de gel	182,36	188,89	210,14	208,88	212,83	214,44	178,47	176,61
Jours sans gel	106,52	93,66	101,81	96,74	81,93	91,44	119,17	129,52
Jours de croissance	150,55	149,17	138,20	143,27	128,05	129,55	161,90	168,18
Plus haute température maximale annuelle	31,80	31,13	27,65	28,21	29,37	30,30	31,52	31,00
Plus basse température minimale annuelle	-39,36	-41,37	-31,77	-34,10	-45,82	-43,55	-35,16	-35,05
Température maximale moyenne	9,08	9,00	5,70	5,80	4,84	4,84	9,34	9,03
Température moyenne	3,40	3,03	1,09	1,01	-0,66	-0,66	3,84	3,84
Température minimale moyenne	-2,27	-2,93	-3,52	-3,78	-6,17	-6,17	-1,67	-1,34
PET	986,84	985,95	939,32	943,98	880,70	893,39	990,48	979,09
Précipitations utiles	286,06	297,11	260,71	303,51	340,91	330,10	367,56	388,12
Quantité de neige convertie en eau	292,78	313,56	453,01	461,29	362,17	352,00	372,52	419,77
Température maximale d'été	23,17	22,94	19,08	19,62	19,95	20,49	23,22	23,05
Température moyenne d'hiver	-12,15	-12,83	-12,11	-13,41	-17,82	-18,09	-11,12	-11,47
Température moyenne d'été	16,96	16,55	13,90	14,29	14,22	14,53	17,09	17,36
Température minimale d'hiver	-17,84	-18,93	-16,46	-18,09	-24,00	-23,96	-16,60	-16,57
Précipitations totales annuelles	931,80	967,90	994,49	1035,52	985,95	964,41	1174,42	1292,83
Radiation totale annuelle	4890,96	4917,16	4969,95	4940,96	4775,50	4795,06	4928,64	4880,66

Annexe D. Caractéristiques climatiques annuelles moyennes des 3 sites de plantation de pin gris pour les périodes de 1941 à 1970 et de 1971 à 2000.

	Sainte-Christine		Chouart		Fontbrune	
Latitude	46° 48' N		47° 51' N		46° 58' N	
Longitude	71° 53' O		75° 37' O		75° 41' O	
Altitude (m)	122		406		251	

Période	1941-1970	1971-2000	1941-1970	1971-2000	1941-1970	1971-2000
Indice d'aridité	2,47	1,61	2,89	2,86	3,77	3,31
DPV	1543,09	1464,37	1353,33	1275,48	1498,97	1450,41
Degrés-jours > 0°C	2643,69	2651,96	2275,4	2215,35	2572,09	2485,27
Degrés-jours > 5 °C	1598,49	1612,55	1332,75	1292,15	1557,85	1494,48
Degrés-jours > 10°C	798,77	808,42	622,58	592,7	777,15	728,47
Jours de gel	182,15	179,08	202,52	204,91	189,79	196,31
Jours sans gel	111,97	111,76	77,22	80,23	97,03	75,77
Jours de croissance	153,08	160,34	136,57	132,55	145,87	141,17
Plus haute température maximale annuelle	32,06	31,32	31,3	30,1	32,06	31,2
Plus basse température minimale annuelle	-36,74	-36,94	-42,62	-45,18	-40,99	-43,76
Température maximale moyenne	9,65	9,34	7,37	6,89	8,99	8,76
Température moyenne	3,77	3,67	1,46	0,86	2,89	2,44
Température minimale moyenne	-2,12	-2	-4,45	-5,16	-3,22	-3,88
PET	1007,14	980,24	958,08	946,49	993,61	985,37
Précipitations utiles	352,22	377,81	323,87	316,02	308,83	301,08
Quantité de neige convertie en eau	385,55	388,64	336,78	356,81	313,58	345,36
Température maximale d'été	23,52	23,45	21,86	21,62	23,16	23,14
Température moyenne d'hiver	-11,2	-11,33	-14,39	-15,33	-13,23	-13,48
Température moyenne d'été	16,91	17,11	15,36	15,42	16,54	16,45
Température minimale d'hiver	-17,02	-16,9	-20,41	-21,87	-19,43	-20,02
Précipitations totales annuelles	1172,02	1287,57	975,86	1011,95	957,14	1038,54
Radiations totales annuelles	4985,27	4885,34	4915,2	4932,08	4959,91	4969,52

Annexe E. Méthode utilisée pour évaluer le rendement des plantations sous l'effet des changements climatiques.

* L'âge de l'arbre représente l'âge depuis la plantation pour l'épinette blanche, et l'âge total (incluant les années de production en pépinière) pour l'épinette noire et le pin gris.

Annexe F. Modèles de régression pour prédire la hauteur moyenne (cm) des sources locales de semences d'épinette blanche, par site de plantation.

Site	Nom	Variables composant le modèle par site	RMSE [†]	R ²	Hauteur prédite (cm)
1	La Patrie	DPV (DPV) ² Température moyenne d'hiver (Température moyenne d'hiver) ²	19,099	0,6667	452,623
2	Dablon	Quantité de neige convertie en eau Température minimale d'hiver (Température minimale d'hiver) ²	10,5435	0,5031	498,209
3	Mastigouche	Degrés-jours > 0 °C Température minimale d'hiver (Température minimale d'hiver) ²	18,5611	0,5317	487,956

[†] RMSE = racine carrée de l'erreur quadratique moyenne.

Annexe G. Modèles de régression pour prédire la hauteur moyenne (cm) des sources locales de semences d'épinette noire, par site de plantation.

Site	Nom	Variables composant le modèle par site	RMSE†	R ²	Hauteur prédite (cm)
1	Mont-Laurier	Degrés-jours > 0 °C Longitude (Longitude) ²	20,3367	0,7234	610,441
2	Lac St-Ignace	Jours de gel (Jours de gel) ² Plus haute température maximale annuelle	15,0726	0,5648	511,689
3	Chibougamau	Indice d'aridité Degrés-jours > 0 °C (Degrés-jours > 0 °C) ²	13,2435	0,6155	394,640
4	Valcartier	Jours de gel Plus haute température maximale annuelle	18,1867	0,5588	671,931

† RMSE = racine carrée de l'erreur quadratique moyenne.

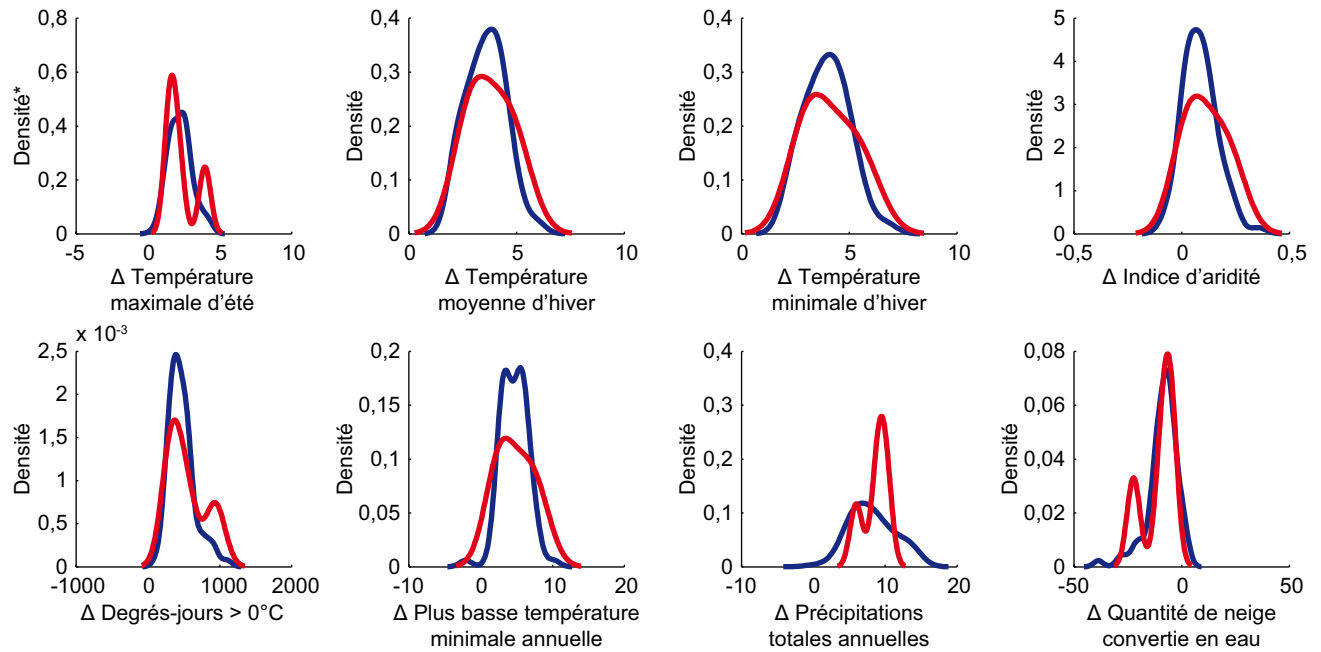
Annexe H. Modèles de régression pour prédire la hauteur moyenne (cm) des sources locales de semences de pin gris, par site de plantation.

Site	Nom	Variables composant le modèle par site	RMSE†	R ²	Hauteur prédite (cm)
1	Sainte-Christine	Précipitations totales annuelles Précipitations totales annuelles x Radiations totales annuelles Radiations totales annuelles Température minimale d'hiver Température minimale d'hiver x Précipitations totales annuelles (Précipitations totales annuelles) ² (Radiations totales annuelles) ²	47,5214	0,6539	749,6946
2	Chouart	DPV (DPV) ² Précipitations totales annuelles Température moyenne d'hiver Précipitations totales annuelles x Température moyenne d'hiver	54,4318	0,7457	592,1543
3	Fontbrune	Jours de croissance Jours de croissance x Précipitations totales annuelles Précipitations totales annuelles Radiations totales annuelles (Radiations totales annuelles) ²	51,0038	0,63891	634,7856

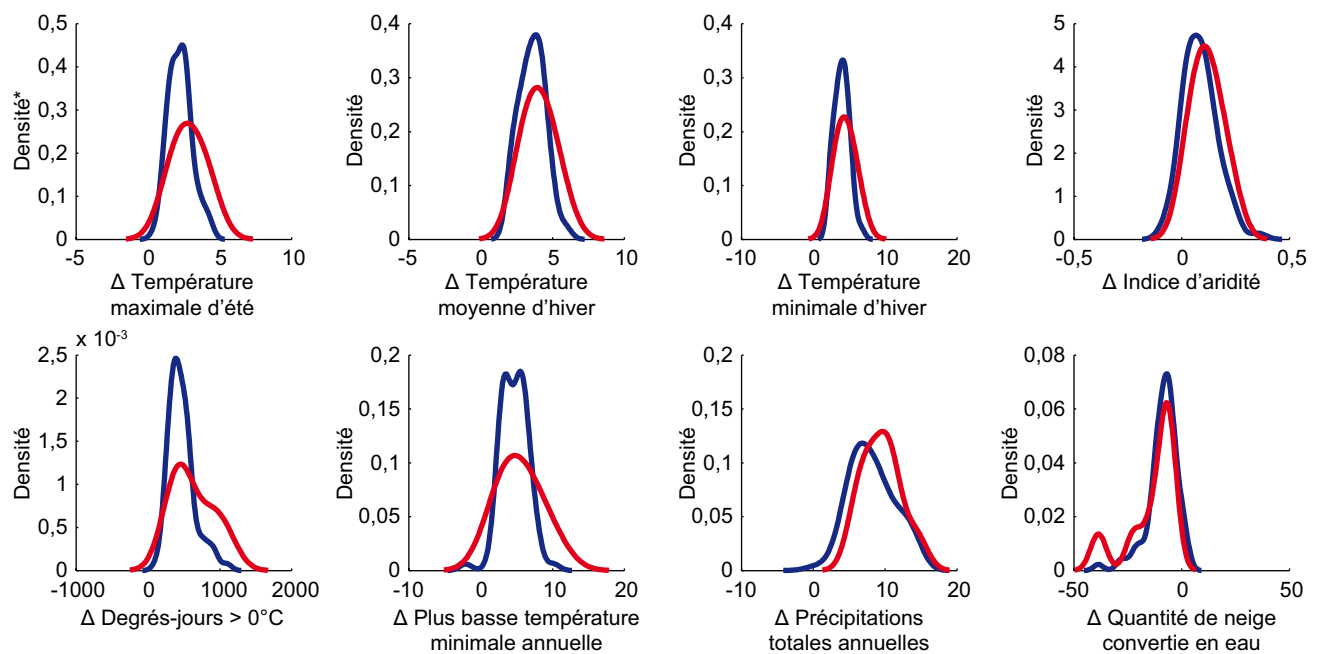
† RMSE = racine carrée de l'erreur quadratique moyenne.

Annexe I. Comparaison de l'effet simulé d'un sous-ensemble de a) 4, b) 8 ou c) 12 modèles climatiques (en rouge) par rapport aux 81 modèles possibles (en bleu), pour la période 2081-2099.

a) 4 modèles vs l'ensemble des 81 modèles – période 2081-2099



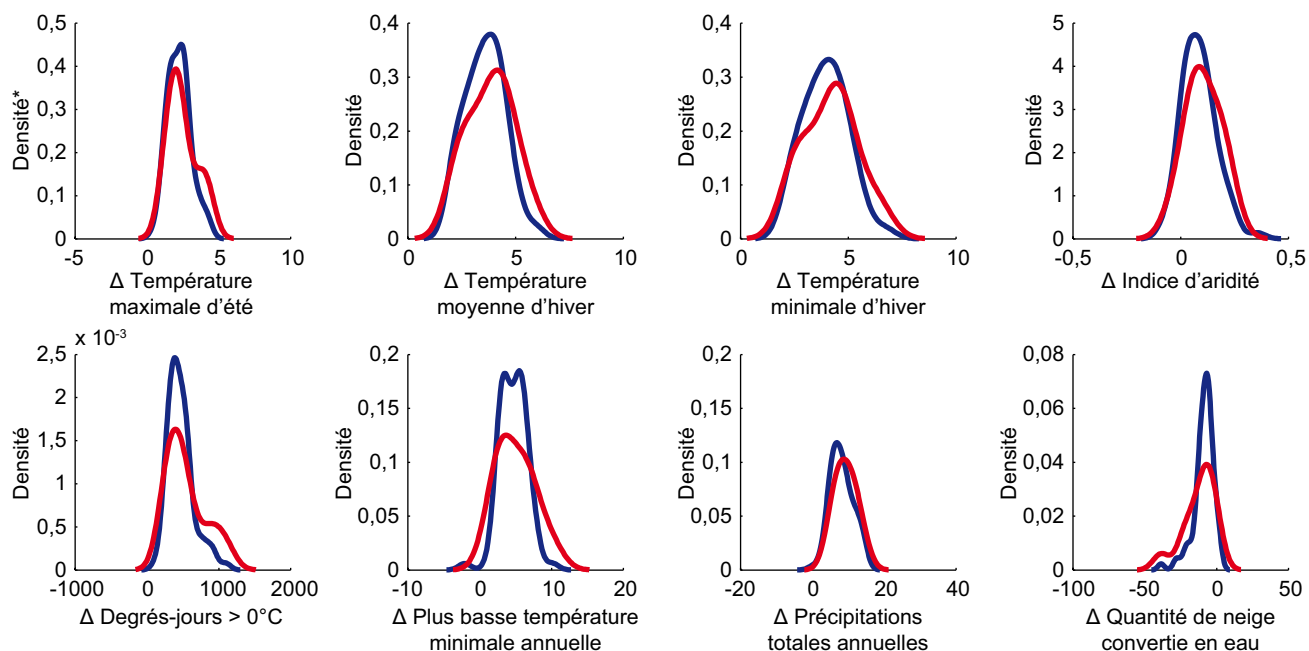
b) 8 modèles vs l'ensemble des 81 modèles – période 2081-2099



* Densité évaluée par la méthode des noyaux.

Annexe I. (suite et fin)

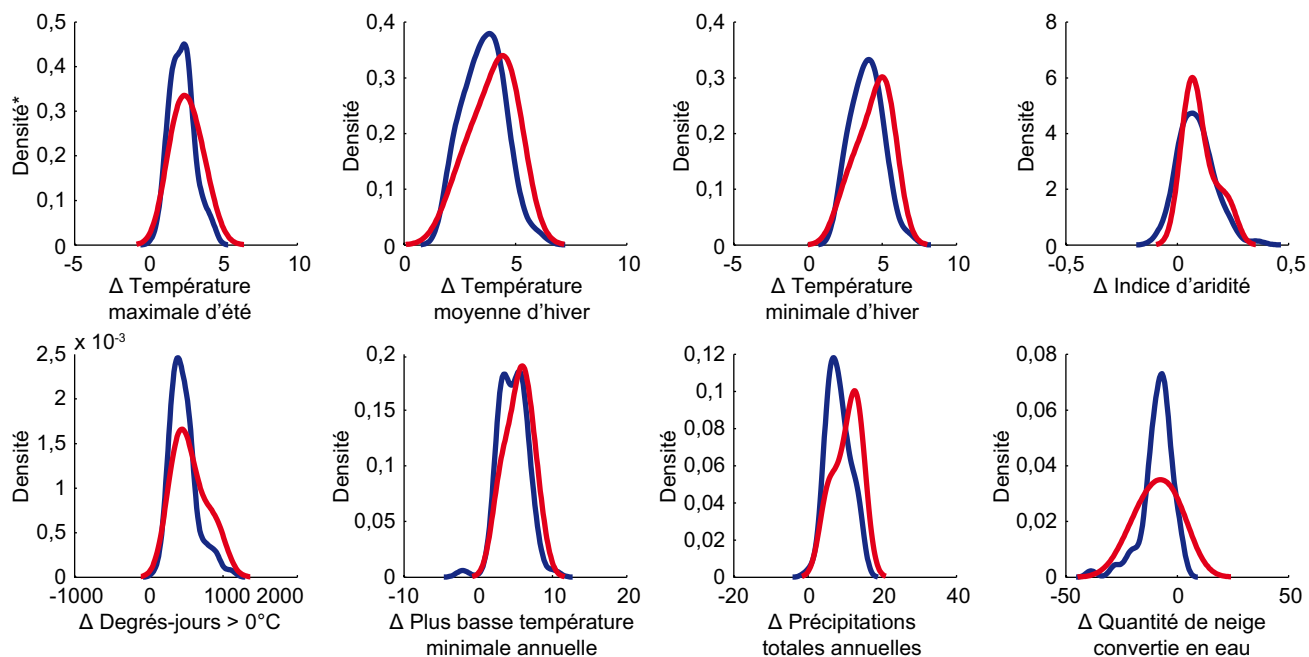
c) 12 modèles (rouge) vs l'ensemble des 81 modèles (bleu) – période 2081-2099



* Densité évaluée par la méthode des noyaux.

Annexe J. Comparaison de l'effet simulé d'un sous-ensemble de 8 modèles climatiques (en rouge) avec celui de l'ensemble des 81 modèles possibles (en bleu), pour la période 2046-2065.

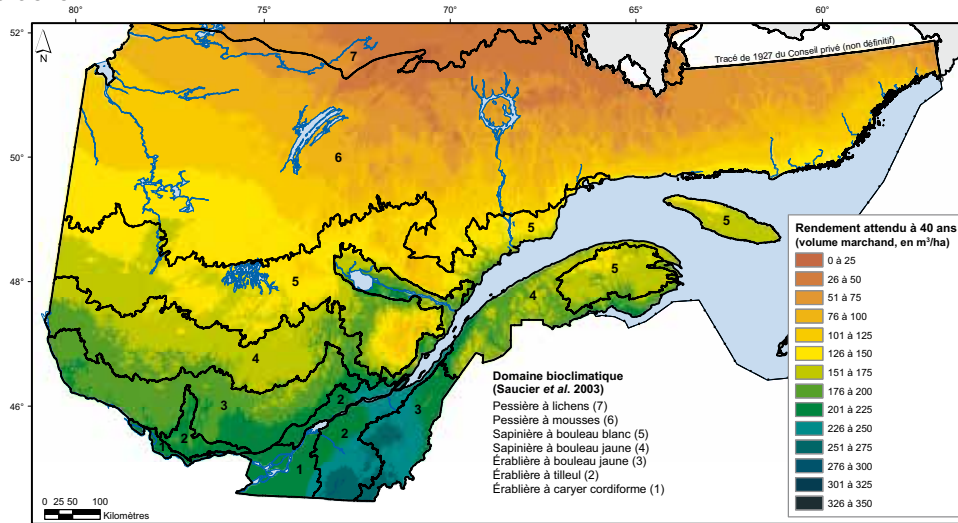
8 modèles vs l'ensemble des 81 modèles – période 2046-2065



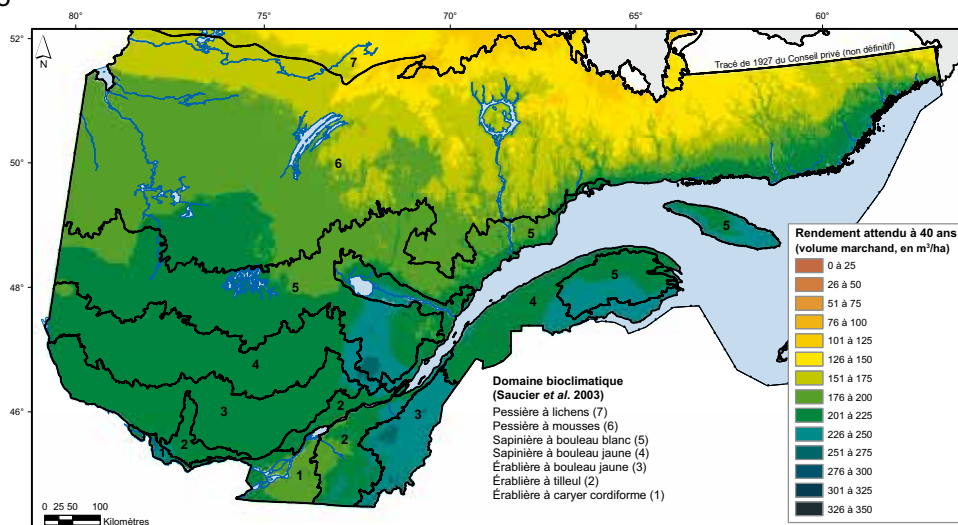
* Densité évaluée par la méthode des noyaux.

Annexe K. Cartes du rendement attendu en volume marchand des plantations d'épinette blanche au Québec, issues des sources de semences locales, sous l'effet des changements climatiques et pour 3 périodes de temps : a) actuelle, b) 2046-2065 et c) 2081-2099.

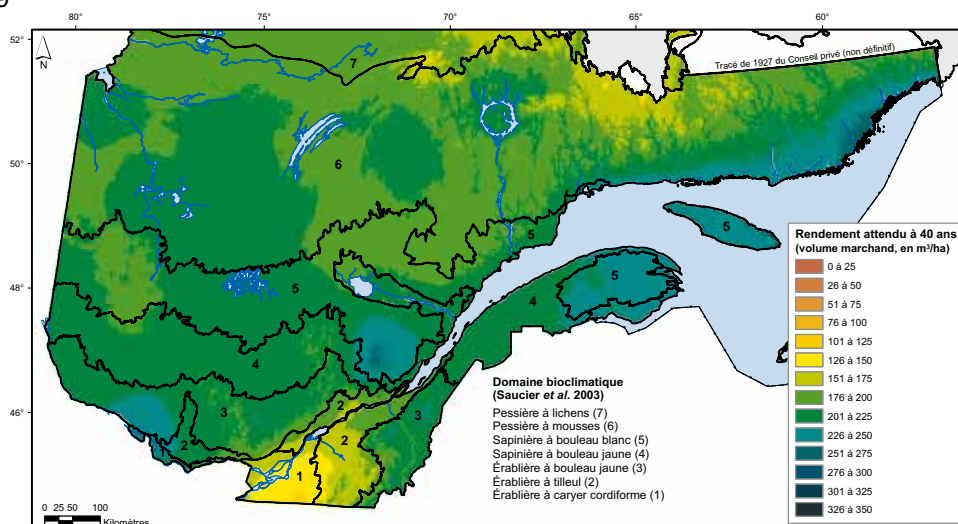
a) période actuelle



b) 2046-2065

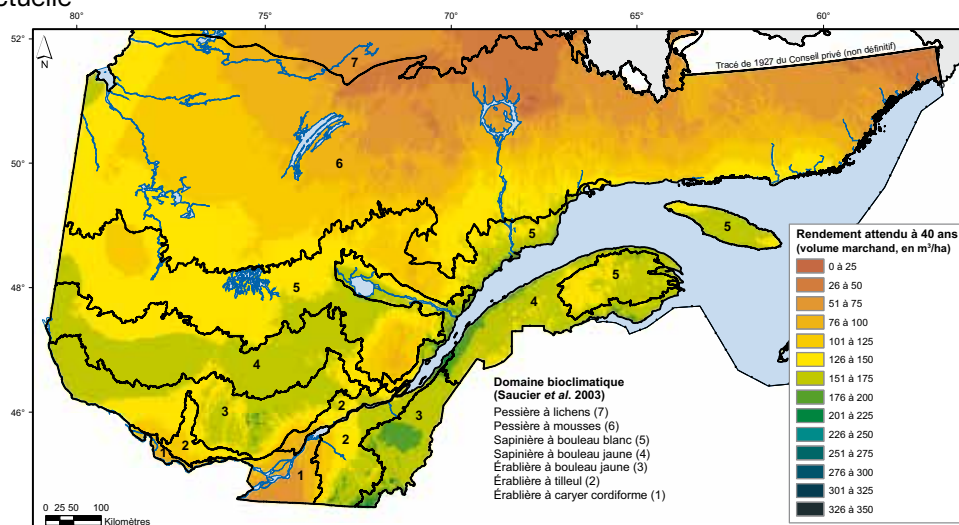


c) 2081-2099

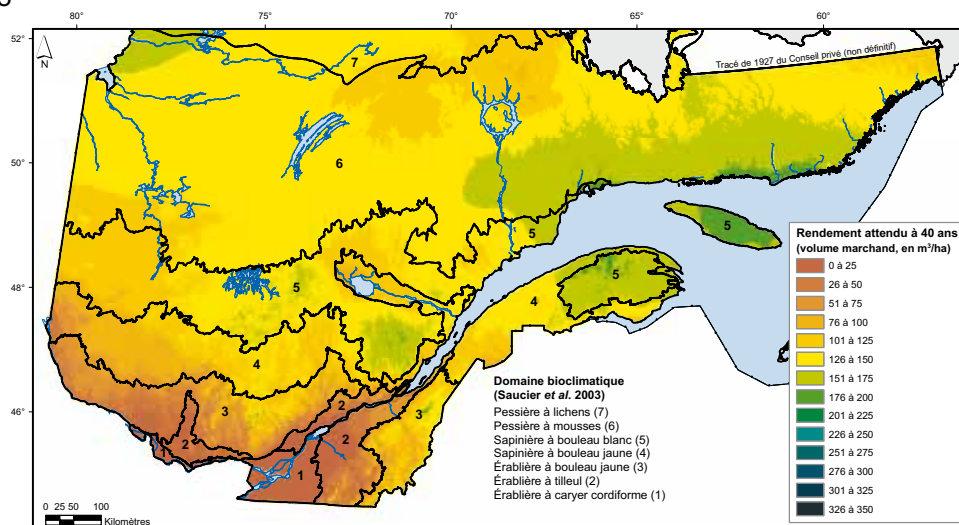


Annexe L. Cartes du rendement attendu en volume marchand des plantations d'épinette noire au Québec, issues des sources de semences locales, sous l'effet des changements climatiques et pour 3 périodes de temps : a) actuelle, b) 2046-2065 et c) 2081-2099.

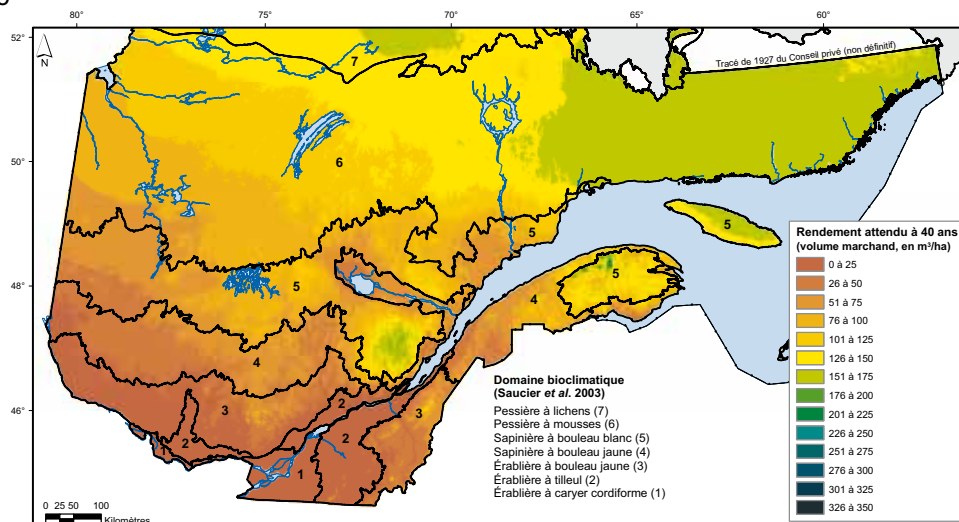
a) période actuelle



b) 2046-2065



c) 2081-2099





La génétique forestière est une science qui vise l'acquisition d'informations de base sur la variation génétique naturelle des arbres, ses causes et ses conséquences. Elle est à la base des programmes d'amélioration génétique menés par la Direction de la recherche forestière (DRF) depuis plus de 40 ans pour les principales espèces destinées au reboisement, avec l'objectif d'augmenter la productivité des forêts du Québec. Toutefois, dans un contexte de changements climatiques, les plants de haute qualité génétique doivent être non seulement adaptés au climat actuel, mais également à celui du futur. Le Plan d'action 2006-2012 du Québec sur les changements climatiques recommande notamment de «déterminer la vulnérabilité des forêts québécoises et du secteur forestier aux changements climatiques et d'intégrer les effets anticipés de ces changements dans la gestion forestière» (mesure 24).

Considérant les investissements à long terme en génétique forestière, la DRF y a vu l'occasion de tirer un bénéfice supplémentaire des mesures de croissance prises sur les arbres qui composent les tests génétiques (tests de provenances) établis au Québec. Ces tests rassemblent en effet une grande diversité de provenances sur une variété de sites aux conditions climatiques différentes. Le fait de déplacer ces provenances dans un climat différent de leur lieu d'origine simule l'effet d'un changement rapide du climat. Les modèles de transfert développés dans la présente étude permettent maintenant de choisir les sources de semences les mieux adaptées au climat de demain, afin de maximiser le rendement futur des plantations dans un contexte de changements climatiques.