

Colloque

# Changements climatiques et foresterie :



# impacts et adaptation

20 et 21 avril 2005, Hôtel Le Manoir à Baie-Comeau

# Actes du colloque

Beaulieu

QC  
981.8  
.C5  
C714  
2005

PARTENARIAT  
INNOVATION FORÊT



Ministère des Ressources  
naturelles, de la Faune  
et des Parcs

Ministère des Ressources  
naturelles, de la Faune  
et des Parcs



Président du PIF

Ministère de  
l'Économie Canada

Canada Economic  
Development



Carrefour  
recherche et développement  
forestier de la Côte-Nord

BAS SAINT-  
LAURENT



RÉSEAU DE  
FORÊTS AVIÉES  
MODÈLE FOREST  
NETWORK



Conseil de  
l'industrie  
forestière  
du Québec

Ressources  
naturelles,  
Faune et Parcs

Québec



# Adaptation aux changements climatiques : la génétique peut-elle nous servir ?

Un modèle mathématique a été développé pour simuler l'effet des changements climatiques sur le rendement de l'épinette blanche en plantation. Selon les prédictions de ce modèle, le rendement optimum pour une provenance donnée est obtenu sous des conditions de température similaires à celles de son lieu d'origine et dans un environnement plus sec. Le changement de climat devrait améliorer légèrement le rendement global des plantations si les interactions avec les facteurs biotiques demeurent inchangées. Le rendement n'atteindrait toutefois pas celui d'une provenance qui pousse actuellement dans des conditions climatiques similaires, en raison d'un délai d'adaptation. Le modèle pourra servir à guider le choix des provenances à utiliser pour le reboisement, mais les règles actuelles de déplacement resteraient valables.



## Introduction

Les changements climatiques sont vus, la plupart du temps, en terme d'effets qu'ils ont sur les écosystèmes et sur les espèces. Le rehaussement du niveau des océans de même que la nutrition et la reproduction de l'ours polaire sont effectivement des exemples frappants. La diversité génétique est plutôt perçue comme une police d'assurance; elle permet de contrer l'effet des changements climatiques par la capacité qu'elle confère aux espèces de s'adapter et d'évoluer (Lynch et Walsh 1998). Heureusement, les arbres forestiers comptent parmi les organismes vivants où la diversité génétique est la plus élevée; ils possèdent en effet 38 % plus de diversité que les plantes annuelles et de 50 à 80 % plus de diversité que toutes les autres formes de vie (Hamrick et al. 1992). Les plantations comparatives qui ont été mises en place par les généticiens depuis quelques dizaines d'années au Québec nous permettent de quantifier cette diversité génétique pour des caractères adaptatifs. Elles peuvent aussi nous renseigner sur la réponse d'une source de semences donnée. Par exemple une provenance d'épinette blanche de la région de Montréal, dans une diversité d'environnements qui simulent l'effet des changements climatiques.

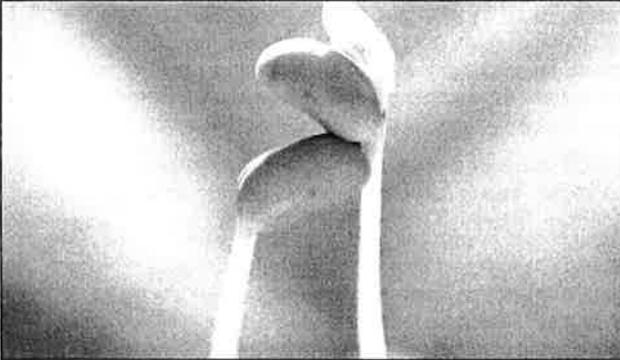
## La génétique des espèces

Les espèces à grande distribution comme les épinettes et les pins sont structurées en sous-ensembles plus ou moins indépendants qu'on appelle populations, à l'intérieur desquelles les individus ont la possibilité de se reproduire par croisement. La sélection naturelle permet d'éliminer ceux qui sont les moins bien adaptés aux conditions environnementales présentes (climat, sol, compétition, etc.). Pour évaluer le niveau de diversité génétique d'une espèce, les généticiens récoltent des semences de plusieurs provenances et établissent des plantations comparatives qui leur permettent d'examiner toutes les populations dans un environnement commun, le plus homogène possible. De cette façon, les différences observées entre les familles et entre les individus seront essentiellement de nature génétique (Nanson 2004). Ces plantations sont aussi répétées pour une diversité d'environnements afin d'évaluer la réponse des provenances à des conditions climatiques et édaphiques variables. Ainsi, ces plantations peuvent aussi nous servir à obtenir une évaluation indirecte de la réponse potentielle des espèces aux changements de climat (Carter 1996; Matyas 1996).

Par exemple, des différences de températures ou de précipitations entre le lieu d'origine et la destination des semis sont utilisées et cette différence est reliée à la performance des provenances

Règle générale, pour nos espèces à grande distribution comme les épinettes noire et blanche et le pin gris, il existe une importante variation génétique à l'intérieur et entre les populations pour des caractères morphologiques et adaptatifs. Ceci laisse ainsi présager qu'elles auraient le potentiel de répondre aux nouvelles pressions sélectives engendrées par le changement climatique (Beaulieu et al. 2001). Il y a une corrélation entre le climat d'origine et la valeur des caractères adaptatifs (tolérance au gel, croissance), plus ou moins fort selon l'espèce. Cette variation est dite clinale et suit un gradient souvent lié à la latitude d'origine (Morgenstern 1996). Les populations sont donc adaptées à leur environnement d'origine. S'il y a un changement quant au climat la performance sera affectée. Selon la population, ce changement pourra être positif ou négatif.

*D'un point de vue économique, il est important d'être en mesure de prédire l'effet du climat sur la productivité des plantations.*



Comme le climat est le principal facteur régissant la distribution à grande échelle des organismes vivants (Tuhkanen 1980), les écosystèmes forestiers pourraient être largement affectés par les changements climatiques. Les changements pourraient s'opérer à deux niveaux, soit à celui des écosystèmes eux-mêmes et à celui des populations (Bawa et Dayanandan 1998). Les espèces étant regroupées en populations adaptées aux conditions environnementales où elles se trouvent et les phénomènes génétiques et évolutifs se produisant à ce niveau (Harrington et al. 1991), c'est l'impact du changement climatique sur celles-ci qui nous intéressera ici.

Au Québec, un modèle de transfert a été développé pour l'épinette noire (Beaulieu et al. 2004); il prédit la croissance en fonction des variables climatiques, et détermine différents niveaux de risque associés au transfert de plants du lieu d'origine des semences à celui de la plantation. Dans le but de faciliter la prise de décisions par les utilisateurs, un logiciel appelé « Optisources » permet de délimiter le territoire d'utilisation des semences d'une source donnée (verger à graines). Un

risque de transfert de 10 %, par exemple, indique que 10 % des plants se trouveront dans des conditions de croissance qui diffèrent de celles de leur lieu d'origine, ce qui pourra affecter leur croissance. En contrepartie, 90 % des plants se trouveront dans des conditions semblables à leur lieu d'origine et donneront vraisemblablement un rendement au moins équivalent à celui obtenu avec les provenances locales. Pour l'épinette noire, les territoires ainsi délimités nous permettent de constater que l'espèce est très plastique, ce qui signifie que les plants peuvent être déplacés sur de grandes distances avec peu de risques. Elle possède donc les caractéristiques nécessaires pour s'adapter aux changements climatiques.

D'un point de vue économique, il est important d'être en mesure de prédire l'effet du climat sur la productivité des plantations. À partir de données recueillies à la fois dans des plantations commerciales et expérimentales, des outils de prédiction ont été développés. Nous verrons donc la démarche utilisée en prenant comme exemple l'épinette blanche, une essence à haut rendement privilégiée pour le reboisement au Québec (Masse 1999).

### *Évaluation du rendement de l'épinette blanche en plantation au Québec*

Les tables de rendement de l'épinette blanche en plantation ont été développées par Bolghari et Bertrand (1984). Elles utilisent comme variables d'entrée l'indice de qualité de station (IQS) et l'espacement entre les arbres. Pour prédire le rendement d'une plantation peu importe l'endroit au Québec, il faut donc être en mesure d'estimer l'IQS. Ainsi, un modèle d'IQS biophysique qui tient compte des variables climatiques a été développé. Il utilise les données de croissance de plus de 600 plantations suivies par le MRNF, ainsi que les variables climatiques pour tout endroit au Québec, qui sont générées par BioSim, un logiciel de simulation développé au Service canadien des forêts (Régnière 1996). Le modèle mathématique utilisé est du même type que celui proposé par Ung et al. (2001). Parmi les variables climatiques testées (degrés-jours, indice d'aridité, précipitations d'été, déficit de pression de vapeur et capacité de rétention en eau du sol), seules les composantes linéaires des degrés-jours et des précipitations d'été étaient significatives. L'IQS et le rendement peuvent être estimés à partir de ce modèle pour tout endroit au Québec si les valeurs des degrés-jours et des précipitations d'été correspondantes sont connues.

### *Impact des changements climatiques sur le rendement de l'épinette blanche en plantation au Québec*

En posant l'hypothèse que ce modèle d'IQS restera valide dans le futur, il pourrait être utilisé pour prédire le rendement des plantations sous des conditions issues des changements climatiques pour tout site au Québec. Les données climatiques nécessaires, soit les températures et les précipitations, peuvent être obtenues des modèles de circulation générale développés pour le Canada et elles ont été récemment intégrées au logiciel BioSim. Le modèle d'IQS ne peut toutefois être utilisé directement sans tenir compte du fait que les espèces ne peuvent répondre à l'intérieur d'une génération à des changements importants de climat. Les espèces forestières ont évolué sur plusieurs générations, dans une grande diversité d'environnements. Pour évaluer la réponse des arbres à un changement rapide du climat, il peut être utile

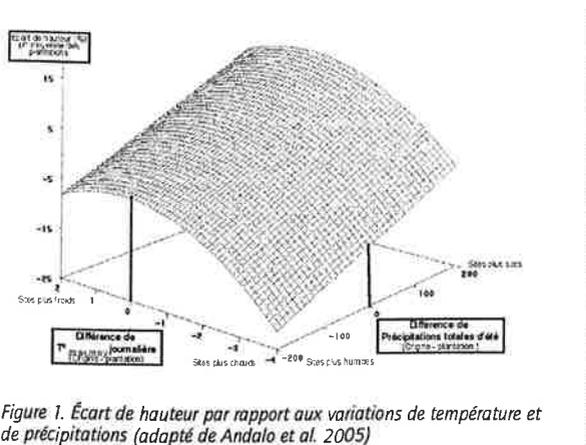


Figure 1. Écart de hauteur par rapport aux variations de température et de précipitations (adapté de Andalo et al. 2005)

d'analyser les mesures prises par les généticiens dans les tests de provenances, où les provenances ont été déplacées sur de grandes distances géographiques et climatiques.

C'est ce qu'ont fait Andalo et al. (2005) pour l'épinette blanche au Québec. En effet, ils ont utilisé des mesures de hauteur et de diamètre à l'âge de 22 ans prises sur un test de provenances répété sur trois sites suivant un gradient latitudinal, soit à La Patrie, à Mastigouche et à Dablon (latitudes 45° 20' à 48° 21'). Ces tests comprenaient 45 provenances, chacune représentée par 5 familles dans un dispositif en blocs avec 6 répétitions et des parcelles de 5 arbres. Au total, 15 436 arbres ont été mesurés. Une analyse de variance a montré que les performances relatives des provenances n'étaient pas influencées par le site (absence d'interaction provenance-site) pour le diamètre et très faiblement pour la hauteur; les provenances semblaient donc réagir de la même façon peu importe le site. Ceci a donc permis aux auteurs de développer un modèle de transfert général pour tout le Québec méridional. Ainsi, sept variables climatiques ont été utilisées, soit 5 variables de température et 2 variables de précipitations, pour développer le modèle de transfert à partir duquel l'impact des changements climatiques sur la croissance a été estimé.

Parmi les 7 variables climatiques utilisées, la température maximale quotidienne moyenne est celle qui expliquait la plus grande part de la variabilité, ce qui confirme le patron latitudinal de variation de l'épinette blanche. En ajoutant les précipitations totales d'été, le modèle expliquait une plus grande proportion de la variation entre les populations (21 % pour le diamètre et 34 % pour la hauteur). La croissance n'est donc pas dépendante uniquement de la température, mais aussi des précipitations qui elles, ne suivent pas un gradient latitudinal. Ces observations confirment la tendance observée chez d'autres espèces comme l'épinette de Norvège et l'épinette noire (Mäkinen et al. 2000 et Beaulieu et al. 2004 dans Andalo et al. 2005). Plus de 80 modèles ont ainsi été testés pour prédire la hauteur et le diamètre (DHP) en fonction de la différence entre l'origine géographique de la provenance (source) et le site de plantation. Le modèle retenu pour chacune des variables a ensuite été validé avec les données recueillies dans un quatrième test situé à Mirabel (latitude 46° 37', longitude 74° 5'). L'examen du modèle indique que la performance optimale est obtenue par une source très proche du site

de plantation ou de la source locale. En moyenne, les provenances qui viennent du sud ou du nord ont un rendement inférieur à la source locale même si, pour une même différence de température, il y a des variations entre les provenances. Une provenance qui se retrouverait dans un environnement plus chaud de 4 degrés pour une même génération ne pourrait donc pas répondre au changement. C'est ce qu'on nomme un délai d'adaptation. Ce n'est qu'après plusieurs générations au cours desquelles la sélection naturelle a opéré que le rendement équivaldrait à celui d'une provenance poussant depuis plusieurs générations dans les mêmes conditions.

En ce qui a trait aux précipitations, le modèle suggère que les meilleures croissances seraient obtenues lorsqu'un transfert est fait vers un milieu plus sec. Cette tendance des populations à utiliser des conditions sub-optimales a déjà été observée pour d'autres espèces (Rehfeldt et al. 1999).

En combinant le modèle d'IQS biophysique et le modèle de transfert des provenances (Figure 1), il est possible d'obtenir une estimation plus réaliste de l'IQS en conditions issues du changement climatique qui tient compte du délai d'adaptation.

En tenant compte du délai d'adaptation, les nouvelles cartes de rendement de l'épinette blanche, prédites à partir des tables de Bolghari et Bertrand (1984), nous montrent que sous l'effet des changements climatiques, le rendement augmenterait encore, mais pas aussi rapidement que s'il n'y avait pas de délai d'adaptation (Figures 2 et 3). En 2070 par exemple, cette augmentation devrait être de 10 à 15 % comparée au rendement actuel si les modèles s'avèrent suffisamment précis et les interactions avec les facteurs biotiques demeurent inchangées.

### Implications pratiques : choix de provenances à utiliser pour le reboisement

Les modèles développés nous permettent également de tester si le déplacement de sources de semences sur le territoire québécois permettrait d'optimiser le rendement des plantations d'une région donnée. À titre d'exemples, nous avons simulé le déplacement d'une provenance du centre du Québec (Valcartier, latitude 46° 54', longitude 71° 30') et celui d'un verger à graines situé dans la sapinière de l'est (Canton de Labrosse sur la Côte-Nord, latitude 49° 20', longitude 69° 7') à divers endroits au Québec et nous avons comparé leur rendement à celui de la provenance locale à ces mêmes endroits.

Dans la région du nord de Montréal, le rendement de la provenance Valcartier serait, dans les conditions actuelles, du même ordre de grandeur que celui de la provenance locale (400 à 450 m<sup>3</sup>); en 2070, il serait toutefois inférieur (respectivement 380 à 426 m<sup>3</sup> et 450 à 500 m<sup>3</sup>). Cette même provenance (Valcartier) déplacée à Rivière-Bleue dans le Bas-Saint-Laurent démontrait un rendement supérieur à celui de la provenance locale dans les conditions actuelles (400 à 425 m<sup>3</sup> versus 300 à 350 m<sup>3</sup>). Son rendement serait toujours supérieur à celui de la provenance locale en 2070, (respectivement 400 à 425 m<sup>3</sup> et 350 à 400 m<sup>3</sup>). Le déplacement de la provenance Valcartier pourrait donc être bénéfique dans certains cas, et moins dans d'autres.

Le second exemple illustre le cas d'une source de semences utilisée dans le programme de reboisement du MRNF, soit celui du verger de Labrosse. Son rendement actuel au nord-ouest de Baie-Comeau et à

Rivière-Bleue, deux endroits qui font partie du territoire d'utilisation des semences de ce verger, est équivalent à la provenance locale (respectivement 250 à 300 m<sup>3</sup> et 300 à 350 m<sup>3</sup>). En 2070, le rendement des plantations issues du verger à graines de Labrosse demeurerait équivalent à celui de la provenance locale aux deux endroits (300 à 350 m<sup>3</sup> à Baie-Comeau et 350 à 400 m<sup>3</sup> à Rivière-Bleue). Par curiosité, nous avons aussi voulu savoir quel serait son rendement au nord de Montréal, une région faut-il le spécifier, en-dehors de son territoire d'utilisation. Bien que le rendement actuel du verger à graines de Labrosse y soit déjà très inférieur à la provenance locale (respectivement 300 à 320 m<sup>3</sup> et 400 à 450 m<sup>3</sup>) cet écart s'accroîtrait avec les changements climatiques (respectivement 200 à 220 m<sup>3</sup> et 450 à 500 m<sup>3</sup> en 2070).

### Conclusions et recommandations

Les informations acquises grâce aux dispositifs expérimentaux établis par les généticiens dans une diversité d'environnements au Québec nous permettent de faire trois constats quant à l'effet possible des changements climatiques sur le rendement des plantations :

- au Québec, le rendement global des plantations devrait augmenter légèrement;
- les arbres subiraient un délai d'adaptation au changement de climat; ainsi en 2070, le rendement sur un territoire qui aura subi un changement de climat restera inférieur à celui d'un autre territoire qui est actuellement dans ces mêmes conditions de climat;
- les règles actuelles de déplacement de provenances resteraient valables pour les conditions climatiques des 50 prochaines années.

Nos connaissances quant à l'impact des changements climatiques sur les facteurs influençant le rendement des plantations sont encore embryonnaires (capacité des sols à supporter un rendement supplémentaire, compétition par les espèces compagnes, fréquence des feux et des épidémies, etc.). Le modèle développé par Andalo et al. (2005) constitue néanmoins un très bon outil d'aide à la décision. Il pourrait être utilisé pour valider les territoires d'utilisation actuels des semences produites par les vergers à graines. À court terme toutefois, il serait avantageux d'établir un réseau de plantations afin de valider nos prédictions de rendement et pour nous permettre de développer des modèles plus précis.

### Références

- Andalo, C., Beaulieu, J. et Bousquet, J. 2005. The impact of climate change on growth of local white spruce populations in Québec, Canada. *For. Ecol. Manage.* 205 : 169-182.
- Bazzaz, F.A., Jasienski, M., Thomas, S.C. et Wayne, P. 1995. Microevolutionary responses in experimental populations of plants to CO<sub>2</sub>-enriched environments: Parallel results from two model systems. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 92 : 8161-8165.
- Beaulieu, J., Perron, M. et Bousquet, J. 2004. Multivariate patterns of adaptive genetic variation and seed transfer in *Picea mariana*. *Can. J. For. Res.* 34 : 531-545.
- Beaulieu, J., Rainville, A., Daoust, G. et Bousquet, J. 2001. La diversité génétique des espèces arborescentes de la forêt boréale. *Le naturaliste canadien* 125 : 193-202.
- Bolghari, H.A. et Bertrand, V. 1984. Tables préliminaires de production des principales essences résineuses plantées dans la partie centrale du Sud du Québec. MRN, DRF, Mémoire de recherche forestière no. 79.
- 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.

Lynch, M. et Walsh, B. 1998. *Genetics and analysis of quantitative traits*. Sinauer Assoc. Inc., Sunderland, MA. 980 p.

Mäkinen, H., Nöjd, P. et Mielikäinen, K. 2000. Climatic signal in annual growth variation of Norway spruce (*Picea abies*) along a transect from central Finland to the Arctic timberland. *Can. J. For. Res.* 30 : 769-777.

Masse, L. 1999. La production de matériel amélioré génétiquement. Les vergers à graines (voie sexuée). Actes du colloque L'amélioration génétique en foresterie : où en sommes-nous ? Rivière-du-Loup, 28-30 septembre 1999. pp. 117-123.

Matyas, C. 1996. Climate adaptation of trees: rediscovering provenance tests. *Euphytica* 92 : 45-54.

Morgenstern, E.K. 1996. *Geographic variation in forest trees. Genetic basis and application of knowledge in silviculture*. UBC Press, Vancouver. 209 p.

Nanson, A. 2004. *Génétique et amélioration des arbres forestiers*. Les Presses agronomiques de Gembloux, Gembloux, Belgique. 712 p.

Régnière, J. 1996. Generalized approach to landscape-wide seasonal forecasting with temperature-driven simulation models. *Environ. Entomol.* 25 : 869-881.

Rehfeldt, G.E., Ying, C.C., Spittlehouse, D.L. et Hamilton, D.A. 1999. Genetic response to climate in *Pinus contorta*; niche breadth, climate change and reforestation. *Ecol. Monogr.* 69 : 375-407.

Ung, C.-H., Bernier, P.Y., Raulier, F., Fournier, R.-A., Lambert, M.-C. et Régnière, J. 2001. Biophysical site indices for shade tolerant and intolerant boreal species. *For. Sci.* 47 (1) : 83-95.