

Optimisation du choix et du rendement des sources améliorées d'épinette blanche en fonction des caractéristiques biophysiques des sites à reboiser

Chercheurs responsables : Jean Bousquet et Jean Beaulieu

Introduction

L'épinette blanche est l'une des trois essences forestières les plus reboisées au Québec et son programme d'amélioration génétique est avancé (Beaulieu 1996). Bien que les théories permettant d'estimer les gains génétiques découlant de la sélection génétique soient bien connues, il demeure encore difficile de prédire le rendement attendu des sources améliorées. En effet, il n'existe aucun modèle de prédiction faisant appel aux caractéristiques biophysiques (climatiques, édaphiques, biotiques et de compétition) des sites de reboisement. De plus, les gains génétiques sont estimés à partir des informations recueillies dans un nombre réduit de tests de descendance, et souvent pour la hauteur uniquement. Les progrès récents en modélisation écophysiological offrent toutefois la possibilité à la fois d'optimiser le déploiement des sources améliorées et d'améliorer la prédiction des gains de rendement en tenant compte explicitement des caractéristiques biophysiques des sites à reboiser et de la capacité des génotypes utilisés à répondre positivement à ces conditions particulières. Les possibilités de développer des modèles robustes sont d'autant plus grandes que l'épinette blanche présente une variation qui est de nature clinale (Li et al. 1993, 1997). Les relations entre les facteurs biophysiques du site et l'allocation de la biomasse permettent de déterminer la croissance potentielle des arbres et leur capacité à tolérer les stress environnementaux (Landsberg et Gower 1997). En ce sens, le modèle recherché devrait permettre de prédire tout autant le rendement dans les conditions climatiques actuelles que celui découlant des changements climatiques.

Objectifs

Dans le cadre de ce projet, nous visons les objectifs suivants :

- 1- Établir un modèle d'indice de qualité de station (IQS) biophysique pour l'épinette blanche basé sur les relations écophysiological existant entre la hauteur dominante et les caractéristiques biophysiques d'un réseau d'au-delà de 600 plantations;
- 2- Développer pour les sources génétiquement améliorées un indice multiplicateur affectant l'IQS biophysique estimé à l'aide du modèle décrit en 1 pour pouvoir prédire le rendement de ces sources améliorées;
- 3- Cartographier le rendement attendu à tout âge pour les sources d'épinette blanche améliorées ou non à l'échelle du Québec méridional en intégrant les modèles obtenus dans un système intégré à références spatiales (SIRS ou "GIS") qui utilise comme base la carte des régions écologiques du Québec;
- 4- Prédire et cartographier le rendement des plantations d'épinette blanche dans les conditions climatiques prédites par le modèle canadien de circulation générale avec un doublement des concentrations de CO₂ en 100 ans;

Méthodologie

Dans le cadre de ce projet, nous avons utilisé diverses sources de données dendrométriques, des données climatiques, l'analyse statistique, la modélisation et des outils de spatialisation pour prédire et cartographier le rendement des plantations d'épinette blanche dans les conditions actuelles et issues des changements climatiques. Nous avons développé dans un premier temps un modèle d'indice de qualité de station (IQS) biophysique à l'aide des données recueillies dans plus de 600 plantations commerciales. Celles-ci ont été recueillies par la Direction de la recherche du MRNF. Pour chacune de ces plantations, les coordonnées géographiques étaient connues. Ces dernières nous ont permis d'obtenir les données climatiques recherchées en utilisant le simulateur BioSim développé par le Service canadien des forêts (Régnière 1996). Cinq variables biophysiques ont pu être obtenues, soit 1) les degrés-jours (DJ), 2) un indice d'aridité (AI), 3) les précipitations utiles (PRE) (mai à août), 4) le déficit cumulatif de pression de vapeur (DPV) et 5) la réserve potentielle en eau du sol (EAU). Les données de hauteur dominante à 25 ans dans les plantations et les variables biophysiques ont ensuite été utilisées pour développer un modèle non linéaire d'IQS biophysique suivant la procédure suggérée par Ung et al. (2001). Ainsi, l'IQS biophysique est estimé comme suit :

$$IQS_{\text{bio}} = IQS_{\text{bio}} f_{DJ} f_{AI} f_{PRE} f_{DPV} f_{EAU}$$

et

$$f_x = 1 + \beta_{l,x} \frac{x - \bar{x}}{\bar{x}} + \beta_{q,x} \left(\frac{x - \bar{x}}{\bar{x}} \right)^2$$

où IQS_{bio} est l'IQS biophysique pour un site donné qui est estimé par un IQS biophysique

moyen, IQS_{bio} , modifié par des modificateurs (f_x) centrés sur la valeur de 1 et changeant en fonction des indices climatiques décrits ci-dessus. La procédure NLIN de SAS (SAS Institute Inc. 2001) a été utilisée pour estimer les paramètres recherchés et de déterminer ceux qui étaient significativement différents de zéro. Lorsque zéro n'était pas compris à l'intérieur d'un intervalle de confiance de 95% pour le paramètre β , ce dernier était considéré significativement différent de zéro.

Les valeurs d'IQS biophysique ont été calculées à l'aide du modèle pour chacune des plantations et un coefficient de détermination a été calculé entre ces valeurs et les IQS phytométriques ayant servi à développer le modèle pour estimer la valeur prédictive du modèle. Le modèle obtenu a ensuite été utilisé pour deux fins, soit 1) estimer un indice multiplicateur pour prédire le rendement de sources génétiquement améliorées et 2) cartographier à l'échelle du district écologique l'IQS moyen et le rendement attendu. Pour estimer l'indice multiplicateur pour les sources génétiquement améliorées, les résultats de six tests de provenances/descendances du Service canadien des forêts ont été utilisés. La hauteur des arbres sélectionnés, tous faisant partie de la classe des tiges dominantes, a d'abord été mesurée à l'âge de 25 ans. Le simulateur BioSim a ensuite servi à estimer les données climatiques pour chacun de ces six sites, ce qui a permis d'estimer l'IQS biophysique de ces sites à l'aide du modèle construit. L'indice recherché a été obtenu en faisant le rapport de la hauteur moyenne des arbres sélectionnés sur l'IQS biophysique prédit.

Pour pouvoir réaliser la cartographie de l'IQS et du rendement des plantations en utilisant la carte des régions écologiques, il fallait d'abord estimer l'IQS biophysique moyen pour chacun des districts écologiques ou unités de paysage. Ceci a été fait en utilisant le réseau des 80 000 placettes temporaires d'inventaire, le modèle d'IQS biophysique développé et les données climatiques obtenues pour chacune des placettes temporaires à l'aide du simulateur de climat BioSim. Après avoir estimé l'IQS biophysique de l'ensemble des placettes temporaires, la moyenne, la valeur minimale et la valeur maximale ont été calculées pour chacun des districts écologiques et pour chacune des unités de paysage. Ces valeurs ont été jointes à la base de données de la carte des régions écologiques du MRNF.

Une application Arc-View a ensuite été développée en utilisant la base de données constituée et le fichier des polygones de la carte des régions écologiques. Cette application permet de cartographier, pour les districts écologiques ou pour les unités de paysage, les IQS et les rendements des plantations d'épinette blanche. De plus, la possibilité de choisir un indice multiplicateur appliqué aux IQS biophysiques estimés pour tenir compte de l'utilisation de sources génétiquement améliorées est offerte à l'utilisateur. L'estimation du rendement des plantations a été rendue possible en intégrant les formules des tables de rendement de Bolghari et Bertrand (1984). En fournissant la valeur de l'espacement entre les arbres au moment de la plantation et l'âge, une carte du rendement prévu est fournie pour tout le Québec méridional. Pour juger de la force ou de la faiblesse de l'utilisation de l'IQS biophysique par rapport à celle d'un IQS phytométrique, il faut aller jusqu'à la prédiction de la productivité et juger si l'emploi de l'IQS biophysique est comparable à celui de l'IQS phytométrique. Le coefficient de détermination entre les volumes prédits avec l'emploi des IQS biophysiques et ceux prédits avec l'emploi des IQS phytométriques a donc été calculé pour l'ensemble des plantations disponibles.

Nous avons également tenté d'estimer l'impact des changements climatiques sur le rendement des plantations d'épinette blanche. Pour ce faire, nous avons utilisé les données des tests de provenances/descendances d'épinette blanche établis par le Service canadien des forêts au Québec. Ces tests de provenances/descendances renferment du matériel de diverses origines et donc adaptées à des conditions climatiques différentes. Les différences climatiques entre le lieu d'origine de ces sources de semences et ceux des sites expérimentaux ont été utilisées pour simuler les changements climatiques. Un modèle de transfert des sources de semences a donc été développé pour la hauteur à environ 25 ans. C'est un modèle quadratique qui lie la différence de hauteur observée entre une source donnée et la source correspondante au site d'expérimentation aux écarts de degré-jours et de précipitations utiles observées entre le lieu d'origine de la source de semence et le site d'expérimentation (Andalo et al. 2005). Par la suite, le modèle d'IQS biophysique a été couplé au modèle de transfert de sources de semences, pour obtenir des estimations plus réalistes des IQS biophysiques en conditions de changement climatique compte tenu que les sources de semences ne pourront s'adapter instantanément à ces nouvelles conditions. Les modèles ont été intégrés dans le simulateur BioSim pour estimer et cartographier l'IQS et le rendement des plantations dans tout le Québec méridional jusqu'aux années 2070.

Finalement, des données dendrométriques sur la tige et le diamètre de l'ensemble des branches vivantes ont été recueillies sur les 360 arbres sélectionnés dans les tests de provenances/descendances du Service canadien des forêts pour constituer la population d'amélioration. De même, une carotte de bois a été récoltée pour estimer la densité du bois de la tige. Celle-ci a été estimée par la méthode de microdensitométrie. Deux branches ont également été recueillies sur chacun des arbres et apportées au laboratoire pour être séchées. Une fois séchées, les aiguilles ont été rassemblées et la masse anhydre des aiguilles et de la branche ont été mesurées séparément. La biomasse de la tige a quant à elle été estimée en multipliant le

volume de la tige par la densité du bois obtenue à l'aide de la carotte. Un premier modèle allométrique de la biomasse des branches a alors été développé et calibré. Ce modèle relie la biomasse de la branche et des aiguilles au diamètre basal de la branche. Une fois calibré, le modèle a été utilisé pour prédire la biomasse de toutes les autres branches de l'arbre qui n'avaient pas été échantillonnées. Les valeurs prédites ont été sommées pour estimer la biomasse totale des branches et des aiguilles de l'arbre. Un second modèle allométrique a été développé et calibré pour prédire la biomasse totale des aiguilles, des branches et de la tige à l'aide du dhp. La calibration des deux modèles a été réalisée à l'aide de la procédure MIXED de SAS Institute Inc. (2002). Les variables dépendantes ont été transformées sur l'échelle logarithmique pour réduire l'hétérogénéité des variances. Comme la remise à l'échelle originale des variables dépendantes (biomasse) induit un biais systématique, une correction faisant intervenir la variance résiduelle a été appliquée.

Résultats

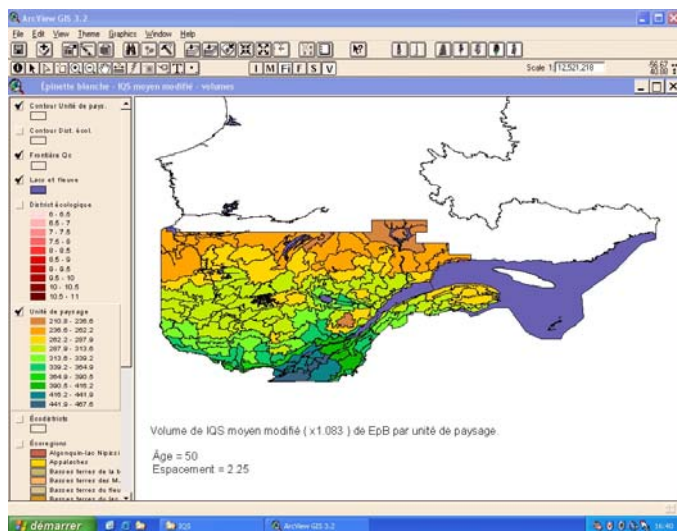
Les résultats de l'analyse de régression non-linéaire ont fait ressortir que parmi les cinq variables écophysologiques utilisées pour prédire l'IQS biophysique, seuls les degrés-jours et les

précipitations utiles se sont avérés significatifs. Ainsi, le modèle retenu est $IQS_{bio} = 8,26 f_{DJ} \cdot f_{PRE}$.

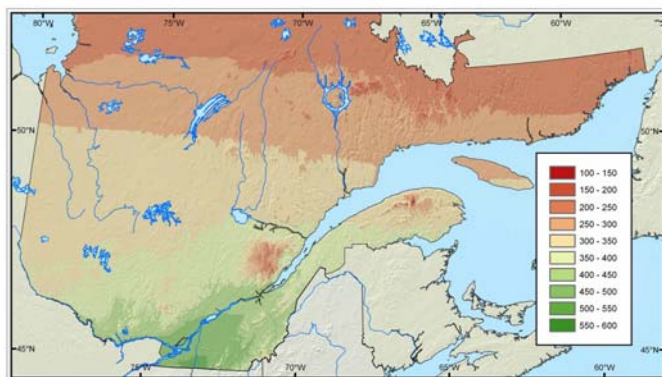
De plus, pour ces deux variables climatiques, seuls les composantes linéaires étaient significatives. Le coefficient de détermination (R^2) calculé entre les IQS biophysiques estimés pour les quelques 600 plantations et leur IQS phytométrique était faible, $R^2 = 0,19$, mais était hautement significatif. Ce résultat n'est pas très surprenant considérant la très grande variabilité existant d'un site à l'autre au niveau des sols et du drainage. Toutefois, comme souligné dans la section de la méthodologie, notre but final n'est pas de prédire l'IQS mais bien le rendement à l'hectare. C'est pourquoi nous avons calculé le coefficient de détermination entre le rendement des 600 plantations estimé à partir des IQS biophysiques et des IQS phytométriques. Il s'avère que le coefficient de détermination s'est élevé à $R^2 = 0,85$ et qu'il était hautement significatif ($p < 0,0001$). Ce coefficient nous est apparu suffisamment élevé pour considérer valable l'utilisation de l'IQS biophysique pour prédire le rendement des plantations à l'échelle des districts écologiques.

Le rapport des hauteurs moyennes à 25 ans des individus supérieurs sélectionnés dans les meilleures familles pour le programme d'amélioration et l'IQS biophysique des sites où se trouvent ces arbres a été calculé pour tenir compte des gains en hauteur résultant de la sélection. Ces indices ont varié, selon le site, de 91,2% à 121,6%, pour une moyenne de 108,3%. Un indice multiplicateur inférieur à 100% a été observé sur un seul des sites, soit l'arboretum de Matapédia. La plantation est située sur un site à drainage lent, ce qui pourrait expliquer ce rendement plus faible. Il y a également eu au cours du développement de la plantation beaucoup de compétition de la part des aulnes, ce qui peut expliquer le retard dans la croissance en hauteur par rapport à ce qu'on pourrait s'attendre en moyenne pour un site de cette région. Pour tous les autres sites, les arbres sélectionnés avaient une hauteur à 25 ans supérieure à l'IQS biophysique, ce qui était attendu.

Un outil SIRS (ARC View 3.2) a été développé pour pouvoir cartographier les IQS biophysiques à l'échelle des districts écologiques. De même, cet outil permet d'estimer pour la même échelle le rendement des plantations d'épinette blanche. L'utilisateur doit fournir certaines informations tel l'espacement initial entre les arbres, l'âge de la plantation et un indice multiplicateur si souhaité pour cartographier le rendement de plantations de matériel génétiquement amélioré.



Depuis quelques années, en raison principalement de l'utilisation de sources d'énergie fossile, la concentration des gaz à effet de serre augmente rapidement dans l'atmosphère, ce qui entraîne une augmentation générale des températures. Ceci a pour effet de modifier les conditions climatiques générales, incluant le régime de précipitations et la variabilité d'événements climatiques extrêmes. Ces changements se produisent à une vitesse que les espèces n'ont pas connue dans le passé. Nous pouvons nous interroger sur l'effet qu'ils auront sur l'adaptation des espèces et en particulier sur le rendement des plantations d'épinette blanche. Un modèle de transfert des sources de semences a été développé conjointement à ce projet (Andalo et al 2005). Il a montré que la source locale était adaptée aux conditions thermiques où elle poussait alors que les sources étrangères, placées dans les mêmes conditions, performaient moins bien. En ce qui a trait aux précipitations, une source déplacée sur un milieu plus sec aurait tendance à mieux performer. Ce modèle indique donc qu'avec les changements climatiques, les sources de semences placées rapidement dans des conditions différentes de celles auxquelles elles sont adaptées ne pourront croître à une hauteur équivalente à celle d'une source de semences déjà adaptée aux conditions correspondantes. Le modèle d'IQS biophysique ne peut donc être utilisé tel quel pour prédire l'IQS en conditions de changements climatiques sans tenir compte du temps qu'il faudra à ces sources placées dans de nouvelles conditions pour s'adapter à ces dernières. Les modèles d'IQS biophysique et de transfert des sources de semences ont donc été intégrés



dans BioSim qui renferme aussi les données climatiques prédites par le modèle canadien de circulation générale et ce pour jusqu'à 2070. Cet outil nous permet donc de prédire le rendement des plantations en conditions de changements climatiques. Il appert que si les conditions de compétition, entomologiques et pathologiques demeurent sensiblement les mêmes et qu'il n'y a pas d'événements climatiques extrêmes qui viennent perturber de façon majeure les plantations, leur rendement pourrait légèrement augmenter au cours des prochains 60 ans (Beaulieu et Rainville 2005).

Le développement de l'application SIRS sera poursuivi en intégrant les modèles allométriques permettant de prédire la biomasse des plantations d'épinette blanche. Ces modèles utilisent le dhp et/ou la hauteur comme variable dépendante. Ces valeurs peuvent être obtenues à partir des tables de rendement de Bolghari et Bertrand (1984). De plus, les modèles développés dans le cadre de ce projet pour les familles améliorées d'épinette blanche seront aussi intégrés pour obtenir des estimations plus précises pour ces familles.

Retombées

À ce jour, ce projet a généré de nombreuses activités de transfert technologique sous forme de trois conférences à l'ACFAS et à un colloque sur les changements climatiques. De plus, deux articles scientifiques ont été publiés et deux autres sont en préparation. Un outil de spatialisation pour cartographier les indices de qualité de station à l'échelle des districts écologiques et le rendement des plantations d'épinette blanche a été produit. Les modèles d'IQS biophysique et de transfert de sources de semences développés dans le cadre de ce projet ont été intégrés dans le simulateur BioSim, ce qui permet de prédire et de cartographier le rendement des plantations d'épinette blanche en conditions de changements climatiques. Tous les outils développés vont aider les gestionnaires dans leurs prises de décisions. Finalement, le projet a permis de former quatre personnes hautement qualifiées.

Références

- Andalo, C., Beaulieu, J. et Bousquet, J. 2005. The impact of climate change on growth of local white spruce populations in Québec. *For. Ecol. Manage.* 205 : 169-182.
- Beaulieu, J. 1996. Programme et stratégie d'amélioration génétique de l'épinette blanche au Québec. Service canadien des forêts. Ressourc. nat. Can., Serv. can. for. , Rapp. Inf. LAU-X-117.
- Beaulieu, J. et Rainville, A. 2005. Adaptation to climate change: Genetic variation is both a short- and a long-term solution. *For. Chron.* 81(5): 704-709.
- Bolghari, H.A. et Bertrand, V. 1984. Tables préliminaires de production des principales essences résineuses plantées dans la partie centrale du sud du Québec. Min. Énergie Ressour., Serv. rech. Mém. rech. for. N° 79.
- Landsberg et Gower 1997. Applications of physiological ecology to forest management. Academic Press, San Diego. 354 p.
- Li, P., Beaulieu, J., et Bousquet, J. 1993. Genetic variation in juvenile growth and phenology in a white spruce provenance-progeny test. *Silv. Genet.* 42: 52-60.
- Li, P., Beaulieu, J., et Bousquet, J. 1997. Genetic structure and patterns of genetic variation among populations in eastern white spruce (*Picea glauca*). *Can. J. For. Res.* 27: 189-198.
- Régnière J. 1996. Generalized approach to landscape-wide seasonal forecasting with temperature-driven simulation models. *Environ. Entomol.*, 25: 869-881.
- SAS Institute Inc. 2002. SAS/STAT User's Guide Version 8. Vol. 2. SAS Institute Inc., Cary, NC.
- 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: 83-95.