

Titre du projet	Intégration de la sélection génomique au MFFP : 2 ^e cycle d'amélioration génétique de l'épinette blanche
Chercheur(e) principal(e)	Martin Perron, Direction de Recherche forestière au (DRF) au Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs du Québec (MFFP)
Autres chercheurs(es) / collaborateurs	Julie Godbout, Josianne DeBlois, Jean Bousquet, Patrick Lenz et Nathalie Isabel, ainsi que les collaborateurs : Sylvie Carles, Philippe Dupéré et Laurence Tremblay
Axe thématique 2RLQ (1 à 7 *)	1 et 5
Présentation et objectifs	Le programme d'amélioration génétique (AG) de l'épinette blanche (Epb) au Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP) a atteint un jalon important, soit la fin du premier cycle pour deux des trois populations d'élevages. Afin de simplifier les opérations et de facilement contrôler les liens de parentés, les parents et les descendants d'un programme d'AG sont réparties dans divers groupes que l'on nomme groupe d'élevage. Le choix de la stratégie pour le prochain cycle d'AG doit tenir compte des connaissances de l'heure en génétique, du matériel biologique au sein de la population de base (arbres candidats à la sélection), des besoins actuels et à venir de la foresterie québécoise, ainsi que de l'analyse économique de diverses stratégies d'amélioration et de déploiement. Avec les changements globaux, il est de plus en plus important d'accélérer l'AG des arbres forestiers, afin de maintenir un approvisionnement durable en matière ligneuse (Harfouche et al. 2012). L'AG traditionnelle des arbres est un long processus de 20-30 ans, notamment en raison du temps de testage pour plusieurs caractères des arbres (p. ex. : module d'élasticité [MoE]). Le testage est requis afin d'évaluer les variations génétiques et les prédictions de performance d'une génération à l'autre à l'aide des valeurs d'amélioration (prédiction de la moyenne de performance des descendants d'un parent). En 2001, une méthode de sélection assistée par marqueurs moléculaires pour l'amélioration des caractères complexes (quantitatifs) a été proposée (Meuwissen et al. 2001), soit la sélection génomique (SG). Cette méthode permet d'établir des valeurs d'amélioration dite génomique, à la suite de la construction d'un modèle qui fait le lien entre les valeurs d'amélioration traditionnelle (par exemple les données de hauteur à 10 ans) et les marqueurs moléculaires (génotype d'un individu). Le génotype d'un individu est établi à la suite du génotypage, soit l'identification des variations génétiques chez cet individu. Pour un coût similaire par cycle à l'AG traditionnelle, la SG permet 1) de réduire de 2,5-3,5 fois la durée d'un cycle d'amélioration (cycle de seulement 4-6 ans) et ainsi d'augmenter les gains génétiques par unité de temps 2) et aussi d'augmenter le nombre de caractères améliorés par cycle (e.g. Boichard et al. 2016). Cette technique est de plus en plus appliquée opérationnellement chez divers animaux et plantes (e.g. Hickey et al 2017). Chez les arbres forestiers, les paramètres d'efficacité et d'applications ont été établis (Grattapaglia & Resende 2011) et les premières démonstrations d'applications ont été effectuées il y a quelques années, notamment avec le matériel biologique du MFFP (e.g. Beaulieu et al. 2014, Lenz et al. 2017). Plusieurs méthodes de sélection génomique sont efficaces, mais la plus versatile et celle permettant une augmentation de la précision est la méthode GBLUP (e.g. Crossa et al. 2017). Cette méthode est

* **Axes thématiques 2RLQ : (1)** la croissance et rendement des plantations, **(2)** la restauration écologique de sites perturbés/anthropisés, **(3)** les plantations de résilience, **(4)** la phytoremédiation et production de produits biosourcés, **(5)** l'amélioration génétique et l'adaptation, **(6)** la valorisation des matières résiduelles fertilisantes et la séquestration du carbone et finalement **(7)** la transformation des bois et la chaîne de valeur.

	particulièrement indiquée en génétique forestière puisqu'elle permet l'intégration d'analyse spatiale, ainsi que d'autres techniques inhérentes à l'analyse de larges bases de données non balancées, réparties sur plusieurs sites et parfois plusieurs générations. La population de base des groupes d'élevages I et II du programme d'amélioration de l'Epb au MFFP origine d'un peu plus de 200 parents et compte plus de 56 000 descendants biparentaux répartis dans 11 plantations comparatives établies entre 1996 et 2010. La population de base du groupe d'élevage I a déjà fait l'objet d'études et de constructions de modèles de SG pour un sous-ensemble des parents (Beaulieu et al. 2014) et pour l'ensemble des parents lors de notre projet pilote d'intégration de la SG (collaboration au projet FastTRAC, article en cours de rédaction). Pour cette population, il y a déjà des modèles de SG pour la croissance, la vitesse acoustique (évaluation du MoE) et la densité du bois. De plus, il y a des descendants présentement phénotypés (mesure de caractères observables) pour des biomarqueurs (composé phénolique) liés à la résistance à la tordeuse des bourgeons de l'épinette (TBE) (projet Spruce-Up). Pour la population d'élevage II, les mesures de croissance à huit ans sont disponibles (base de données du MFFP) et des descendants ont été phénotypés pour les biomarqueurs de résistance à la TBE (Méndez-Espinoza et al. 2018). Au Québec, l'intensification de la production ligneuse vise à générer suffisamment de volume de bois de qualité pour doter le Québec d'une marge de manœuvre et pour compenser, à divers degrés, les volumes non récoltés dans les aires de conservation et d'aménagement écosystémique. La grande productivité en plantation de l'épinette blanche (360-390 m³ ha⁻¹ vers 45 ans pour les meilleures stations – Prigent et al. 2010) répond très bien aux exigences économiques et environnementales de l'intensification de la production ligneuse. D'ailleurs, la demande annuelle de plants d'épinette blanche au Québec est en hausse d'environ 10 millions de plants pour 2018, passant à un peu plus de 40 millions de plants, soit environ 30 % des plants utilisés pour le reboisement au Québec (communication de la Direction générale de la production de semences et de plants forestiers du MFFP – [DGSPSF]). L'élaboration de divers scénarios d'amélioration et de déploiement pour notre deuxième cycle d'amélioration génétique de l'épinette blanche au MFFP a été menée lors de notre collaboration au projet FastTRAC (Tableau 1) en vue d'une analyse économique portant uniquement sur la croissance. Cette analyse, avec l'ensemble des coûts et bénéfices pour la société québécoise, a été faite à l'aide des données du MFFP dans le contexte de l'absence de l'utilisation de phytocide pour le reboisement au Québec. Les deux scénarios les plus rentables sont ceux impliquant la SG (Chamberland et al. 2020). Et le scénario le moins rentable est la conduite d'un deuxième cycle d'AG classique (AGT), notamment en raison du long délai avant le déploiement de la prochaine variété pour le reboisement (autour de 2054 pour un début de programme en 2019). L'AG traditionnelle ou à l'aide de la SG coûte seulement 5 \$ de l'hectare pour le reboisement de 30 millions de plants par année pour une période de 25 ans. L'objectif principal est d'augmenter la productivité de bois de qualité de l'épinette blanche, à l'aide de la SG. Les objectifs secondaires incluent : 1) l'élaboration de
--	---

*** Axes thématiques 2RLQ :** (1) la croissance et rendement des plantations, (2) la restauration écologique de sites perturbés/anthropisés, (3) les plantations de résilience, (4) la phytoremédiation et production de produits biosourcés, (5) l'amélioration génétique et l'adaptation, (6) la valorisation des matières résiduelles fertilisantes et la séquestration du carbone et finalement (7) la transformation des bois et la chaîne de valeur.

	modèles de SG pour la croissance, la vitesse acoustique (substitut MoE) et la résistance à la TBE, notamment dans le groupe d'élevage II; 2) l'application de la SG pour le MoE et la résistance à la TBE pour le classement de plus de 21 000 arbres candidats comme parents potentiels du 2e cycle d'AG des groupes d'élevages I et II; et 3) l'application des modèles de SG pour l'ensemble des caractères notamment pour 10 800 descendants du 2e cycle d'AG lors de la sélection des parents pour le troisième cycle d'amélioration (2024-2025).
Résultats (préliminaires/finaux)	Obtention des profils génomiques de 25 400 arbres et semi-candidats comme parents potentiels des 2e et 3e cycles d'amélioration de l'Epb du MFFP. Construction de modèles de SG prioritairement pour la croissance, la rigidité du bois, la résistance à la TBE et la résistance aux stress hydriques et aux gels; classement par SG de plus de 32 800 arbres et semis candidats pour ces caractères; sélection des parents pour les deux prochains cycles d'amélioration génétique; recommandations des populations de production avancées; obtention de plus de 10 800 nouveaux descendants pour la SG multicritère; création d'une importante base de données pour le développement de la SG pour d'autres caractères et études.
Retombées escomptées et applications	Avec l'application de la SG à grande échelle chez l'Epb, les cycles d'amélioration génétique se trouveront fortement raccourcis et une plus grande flexibilité sera possible, ce qui est particulièrement souhaitable dans le contexte incertain des changements climatiques. Les parents de la 2 ^e génération d'amélioration pourront être sélectionnés dès 2021. Par rapport à l'amélioration classique, les plants issus de la SG et destinés au reboisement seront obtenus 22 ans plus tôt, dès 2033. Ils seront plus productifs sans perte de résistance mécanique du bois, tout en offrant une meilleure résilience aux stress biotiques et abiotiques. L'expertise accrue en SG appliquée à grande échelle pourra aussi guider l'implantation à l'échelle opérationnelle de cette méthode pour d'autres espèces au MFFP, comme le démontrent les preuves de concept développées chez l'épinette noire (projet <i>SMarTForests</i> , Lenz <i>et al.</i> 2017) et l'épinette de Norvège (projet <i>FastTRAC</i> ; Lenz <i>et al.</i> <i>Evol. Appl.</i> 2020). Étant donné que les deux stratégies intégrant la SG sont les plus rentables économiquement et que le reboisement avec l'Epb représente 30 à 40 millions de plants reboisés annuellement au Québec, un gain économique important et récurrent pourra être concrétisé.
Publications associées	1. Perron, Martin, Simon Nadeau, André Rainville, Jean Beaulieu, Patrick Lenz et Jean Bousquet. (2018). Sélection de lignées clonales d'épinette blanche à l'aide des prédictions génomiques. Avis technique no SGRE-17. 8 pages. ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de la recherche forestière. 2. Perron, M., P., Lenz, M., Despons, M., M.-J., Mottet, N. Isabel, J. Beaulieu et J. Bousquet. (2020). À l'aube d'une révolution : décoder le génome des arbres pour mieux aborder l'avenir. ISSN : 1715-0795. 2 pages. ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de la recherche forestière. 3. Chamberland, V., Robichaud, F., Perron, M., Gélinas, N., Bousquet, J. et Beaulieu, J. 2020. Conventional versus genomic selection for white spruce

* **Axes thématiques 2RLQ** : (1) la croissance et rendement des plantations, (2) la restauration écologique de sites perturbés/anthropisés, (3) les plantations de résilience, (4) la phytoremédiation et production de produits biosourcés, (5) l'amélioration génétique et l'adaptation, (6) la valorisation des matières résiduelles fertilisantes et la séquestration du carbone et finalement (7) la transformation des bois et la chaîne de valeur.

	improvement: a comparative cost-benefit analysis for plantation on Quebec public lands. Tree Genetics & Genomes (2020) 16 : 17 (16p.). https://link.springer.com/article/10.1007/s11295-019-1409-7
Partenaires : industries, gouvernements, autres	- Chaire de recherche du Canada en génomique forestière, Université Laval - Département des sciences du bois et de la forêt, Université Laval - Institut de biologie intégrative et des systèmes, Université Laval - Ressources Naturelles Canada - Centre canadien de la fibre du bois - Direction de l'expertise et de la coordination, MFFP
Site(s) (Région(s))	Ensemble des régions utilisant l'épinette blanche pour le reboisement. Nous avons onze tests de descendance biparentales réparties dans six sous-régions écologiques et 20 tests de clones répartis dans deux sous-régions écologiques qui serviront pour ce projet.
Date de début /date prévue de la fin de projet	Avril 2020 à mars 2025

* **Axes thématiques 2RLQ :** **(1)** la croissance et rendement des plantations, **(2)** la restauration écologique de sites perturbés/anthropisés, **(3)** les plantations de résilience, **(4)** la phytoremédiation et production de produits biosourcés, **(5)** l'amélioration génétique et l'adaptation, **(6)** la valorisation des matières résiduelles fertilisantes et la séquestration du carbone et finalement **(7)** la transformation des bois et la chaîne de valeur.