

Titre :	Recommandation des arbres sélectionnés pour la composition du nouveau verger à graines de pin blanc
Auteur(s) :	Marie-Josée Mottet, Julie Godbout
Date :	Mars 2020

Les recommandations de sources de semences pour le nouveau verger à graines de pin blanc ont pour objectif de garantir un approvisionnement en plants adaptés au climat futurs et ayant une croissance optimum pour le sud du Québec. Ce nouveau verger sera plus diversifié génétiquement et contiendra une plus grande proportion d'arbres provenant de climats plus chauds que celui déjà en place dans le sud du Québec. Cette mixité favorisera les croisements entre des individus locaux, qui sont adaptés aux conditions du Québec, et des sources plus méridionales, qui présentent des adaptations potentiellement compatibles avec les conditions futures.

1. Contexte

Les besoins en pins blancs (*Pinus strobus* L.) pour le reboisement au sud du Québec (domaines bioclimatiques 1, 2 et 3, Saucier *et al.* 2003) justifient la mise en place d'un deuxième verger à graines de seconde génération (V2), puisque les vergers de première génération sont en fin de vie utile et que celui de deuxième génération établi en 2008 à Berthier ne pourra pas suffire à la demande. De plus, la production de semences doit être assurée par plus d'un verger à graines afin de pallier les différents problèmes liés au climat tels que les sècheresses régionales, les gels tardifs ou la prolifération des insectes et des maladies.

Par ailleurs, toutes les projections prévoient un impact significatif des changements climatiques (CC) sur l'habitat actuel du pin blanc (Joyce et Rehfeldt 2013, Périé *et al.* 2014). Le Québec correspondant à la limite septentrionale de la répartition du pin blanc, l'une des stratégies envisagées est alors d'aller puiser dans la diversité des populations centrales, qui sont adaptées à des conditions climatiques plus chaudes et donc préadaptées aux conditions futures (Aitken *et al.* 2008) pour alimenter en matériel le territoire du Québec. Les résultats obtenus après 12 ans dans les tests de descendance de pin blanc ont mis en évidence que des populations de pin blanc issues des États américains et de l'Ontario étaient aussi, voire plus performantes en termes de croissance et de qualité des tiges que celles provenant du Québec (Beaulieu *et al.* 1996). Quarante-six arbres issus de ces provenances méridionales avaient alors été sélectionnés et inclus dans le verger à graines de deuxième génération établi en 2008.

On peut citer tout ou partie de ce texte en indiquant la référence
© Gouvernement du Québec

Considérant les incertitudes liées aux changements climatiques, les objectifs pour le nouveau V2 de pin blanc sont d'augmenter : 1) le nombre total d'arbres, afin d'accroître la diversité génétique et 2) la proportion d'arbres provenant des populations situées à des latitudes plus au sud, notamment provenant du Nord-Est américain et des Grands-Lacs, ces provenances étant plus diversifiées génétiquement et potentiellement adaptées ou préadaptées aux conditions climatiques futures. Les vergers de deuxième génération représentent donc un premier pas vers la migration assistée du pin blanc au Québec, et plus particulièrement vers le flux génétique assisté (voir la section 4 ci-dessous), en favorisant des croisements naturels entre des individus du Québec et des provenances plus méridionales. L'objectif de cet avis est de décrire la démarche adoptée pour choisir les meilleures sources de pin blanc disponibles pour le sud du Québec et de détailler le contenu du futur verger à graines de deuxième génération.

2. Méthodologie

2.1. Description des populations d'amélioration génétique de pin blanc développées au Québec

Le programme d'amélioration du pin blanc a été développé par Ressources naturelles Canada depuis les années 1970. Une première population d'amélioration a été constituée pour cette espèce en sélectionnant les arbres-plus dans les forêts naturelles du Québec. Ces arbres-plus ont été multipliés par greffage et plantés en 1981 à la réserve nationale de faune du Cap-Tourmente ainsi que dans 4 des 6 vergers à graines régionaux de première génération du MFFP. Afin d'évaluer la valeur génétique de ces arbres, une série de tests de descendance uniparentales (pollinisation libre; séries E601-I et E601-II, 3 tests par série) a été établie à 6 endroits au Québec de 2001 à 2004. Les tests de la série II sont répartis dans les domaines bioclimatiques visés pour le nouveau V2.

Une deuxième population d'amélioration a été développée à partir des sélections basées sur les résultats des mesurages à 6 et à 12 ans de 3 tests de descendance établis en 1988 (E600-II). Ces tests comprenaient quelque 300 descendance représentant une soixantaine de provenances du Québec, de l'Ontario et des États-Unis (Beaulieu *et al.* 1996, figure 1). Les critères de sélection étaient la croissance en hauteur et la forme, notamment l'absence de déformations dues aux attaques de charançon du pin blanc. À l'époque, la sélection des meilleurs génotypes s'est faite en 2 phases. Dans un premier temps, les arbres avaient été sélectionnés dans les tests de Notre-Dame-du-Laus, de Grand-Mère et de Valcartier (figure 1) parmi les familles avec les meilleurs gains génétiques en hauteur. Ces arbres ont été reproduits par greffage en 1997, et les copies ont été plantées dans le parc à clones de Valcartier en 1999. Afin d'ajouter de nouvelles familles dans la population, une deuxième série de sélections a été faite en 2006 dans les tests de Notre-Dame-du-Laus et de Grand-Mère.

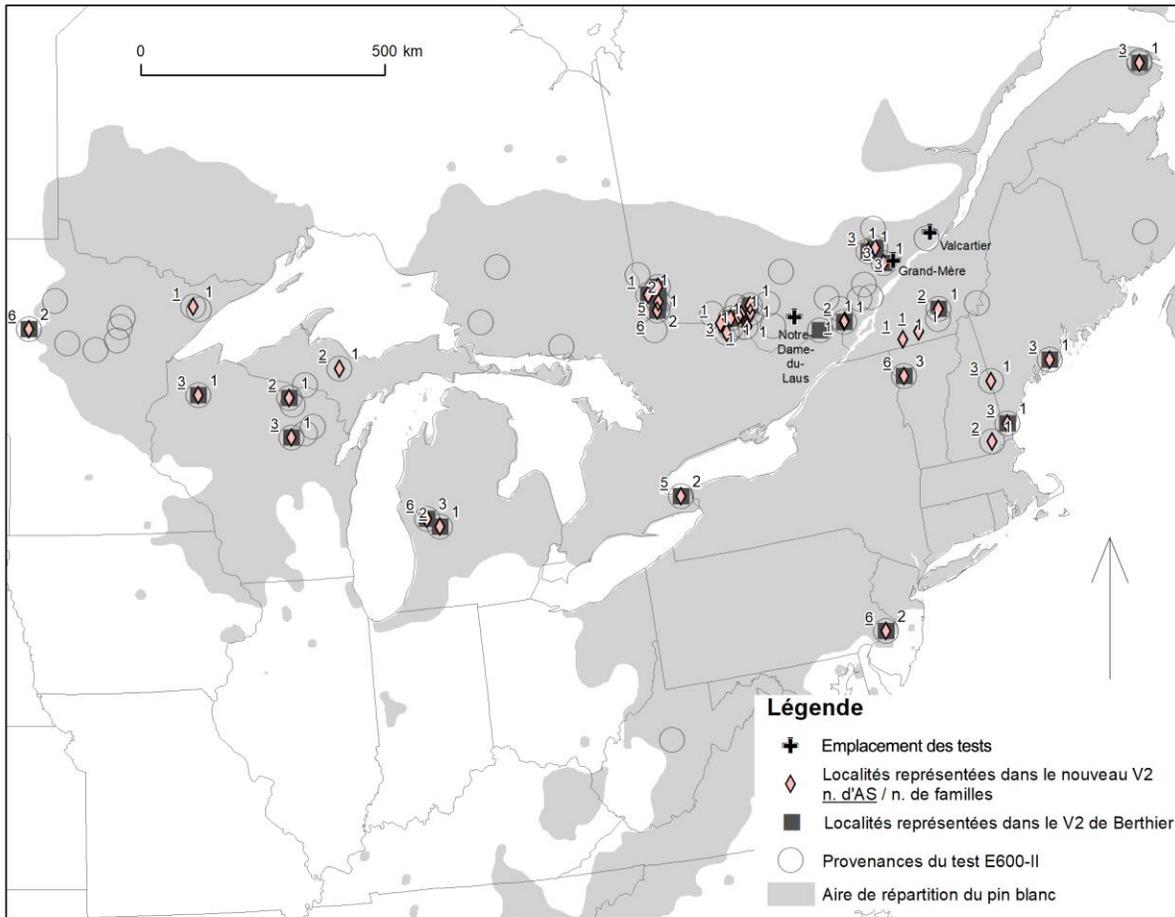


Figure 1. Carte représentant les provenances d'origine des arbres des vergers de 2^e génération (V2 projeté et actuel V2 de Berthier). Les nombres apparaissant à côté des provenances représentant le V2 projeté font référence au nombre d'arbres sélectionnés (AS, à gauche et souligné) et de familles sélectionnées (à droite) pour cette provenance.

2.2. Méthode pour le choix des arbres du nouveau V2

Le V2 actuel de Berthier, établi en 2008, contenait au départ 51 arbres sélectionnés (AS) issus de la sélection de 1997 et 36 AS de la sélection 2006. Par la suite, l'AS 975060 a été éliminé dans le verger parce qu'il était trop affecté par un champignon nommé *Scoleconectria cucurbitula* (ou *Thyronectria cucurbitula*), causant des chancres pouvant entraîner le dépérissement ou la mort des arbres.

Pour formuler des recommandations en vue de l'établissement du nouveau V2, la stratégie d'origine était de mesurer de nouveau les arbres présents dans les tests de descendance établis en 1988, et donc maintenant âgés d'une trentaine d'années. Cependant, après la visite des tests Notre-Dame-du-Laus et de Grand-Mère en 2017, nous avons conclu qu'il était très difficile, voire impossible d'envisager ces mesurages à cause de conditions de croissance devenues trop variables à l'intérieur des tests ou du taux de mortalité important des pins. Nous avons donc basé nos recommandations sur les gains génétiques

des familles qui avaient été calculés à partir des mesures de ces 2 tests à 12 ans (données non publiées). Nous avons également observé l'état des copies de chacun des arbres présents au parc à clones de Valcartier à l'automne 2019. Au total, la population de Valcartier contient quelque 170 arbres, dont 84 sont déjà présents dans le V2 actuel.

Finalement, 11 AS du V2 actuel n'ont pas été retenus pour le nouveau verger, soit parce qu'ils avaient une cime dégarnie ou dépérissante, soit parce qu'ils avaient des croissances très faibles à Valcartier. De plus, puisqu'une dizaine de familles présentes dans les tests de 1988 (E600) ont été incluses comme témoin dans la série E601, les résultats de cette série de tests ont permis de confirmer les décisions de rejeter ou d'ajouter certains AS dans le nouveau V2. Les modifications apportées par rapport au V2 actuel (le retrait des 11 AS et l'ajout des 24 nouveaux AS) avaient également pour but de diversifier l'origine géographique des arbres et de minimiser le nombre d'arbres apparentés.

Par ailleurs, nous proposons aussi d'ajouter 6 arbres de la population de Cap-Tourmente, dont les descendants démontrent, dans les séries de tests E601-II, des croissances supérieures ou égales à celles des meilleures familles témoins provenant de la série E600. Ces 6 arbres démontraient en moyenne une supériorité de 9 % par rapport à la moyenne des familles des tests de la série E601-II. Parmi les AS de Cap-Tourmente, l'arbre 84586, originaire de l'Outaouais et plus précisément du lac Balsam, se démarque par sa très grande performance, avec des supériorités de croissance de 14 % en moyenne dans les 6 tests (E601-I et II).

3. Recommandations

Nous recommandons 105 AS pour constituer le nouveau V2 pour les domaines bioclimatiques 1, 2, 3 et 4 est (voir la section 3.2 ci-dessous sur les territoires d'utilisation). Considérant l'incertitude associée aux changements climatiques actuels qui pourront causer différents problèmes au moment où les vergers seront productifs (maladies, stress hydrique, etc.), une augmentation du nombre d'AS permet d'envisager une éclaircie génétique sans que la diversité génétique souhaitable du verger soit compromise. La liste des arbres recommandés et leur description ont été transmises à la Direction générale de la production des semences et des plants forestiers (DGSPF) le 10 octobre 2019 (données non présentées).

La proportion d'arbres provenant de l'extérieur du Québec est passée de 53 % pour le V2 actuel à 59 % pour le nouveau V2 projeté. Le V2 actuel contenait 30 familles issues de 25 provenances, alors que le nouveau V2 en compte 47 issues de 36 provenances (voir figure 1). En moyenne, le gain génétique en hauteur des familles du nouveau V2 est de 12 % par rapport à la moyenne de l'ensemble des familles testées.

3.1. Récolte des greffons

La majorité (75 sur 105) des AS recommandés pour le nouveau V2 sont déjà dans le V2 actuel de Berthier. Les greffons pourront être récoltés directement sur les arbres déjà présents dans ce verger. Les 24 arbres ajoutés provenant de Valcartier et qui ne sont pas dans le V2 actuel pourront être récoltés dans le parc d'hybridation de Valcartier établi en 1999. Chaque arbre y est représenté par 2 à 6 copies, dont la hauteur varie de 6 à 12 m. Finalement, pour les 6 arbres de la population de Cap-Tourmente, les greffons pourraient être récoltés dans le parc à clones de Cap-Tourmente.

3.2. Territoires d'utilisation de l'ancien et du nouveau V2

Le besoin initial formulé par la DGSPF était de constituer des vergers destinés aux territoires d'utilisation représentant les domaines 1, 2 et 3. Aussi, la sélection des AS qui constitueront ce nouveau verger ainsi que celui déjà établi à Berthier s'est basée sur l'analyse de la performance des familles d'origine dans les deux tests de la série E600 établis à Notre-Dame-du-Laus (E600-II-1, sous-domaine 3 Ouest) et à Grand-Mère (E600-II-2, sous-domaine 2 Est) (données non publiées). Cependant, considérant la demande pour le pin blanc dans le domaine 4 et le contexte des changements climatiques, la question s'est posée à savoir si ces arbres pouvaient être utilisés dans le domaine 4. De plus, la pépinière de Sainte-Luce (située dans le sous-domaine 4 Est) fait partie des sites envisagés pour l'installation du nouveau verger.

Contrairement à l'épinette noire et à l'épinette blanche, il n'existe pas de modèle de transfert qui permettrait de prédire la croissance du pin blanc en fonction de variables climatiques clés (Rainville *et al.* 2014). En absence d'un tel outil, nous avons analysé les données provenant des différents dispositifs de l'expérience E600 afin d'évaluer les risques de planter les arbres issus de ces vergers dans un climat plus froid, tel que celui du domaine 4. Cette évaluation sommaire que nous présentons ici ne remplace pas ce que ferait un modèle de transfert; elle vise seulement à fournir une base de réflexion logique afin de répondre à un besoin en attendant qu'un tel modèle soit développé pour le pin blanc.

Notre raisonnement est le suivant : puisque la sélection des arbres s'est faite sur la base des performances mesurées dans les tests E600-II-1 et E600-II-2, l'observation de performances comparables dans les autres tests témoigne de conditions climatiques qui ont un effet similaire sur la croissance des arbres. Les conditions climatiques de ces dispositifs peuvent donc servir de balises pour déterminer les climats limitants ou favorables aux arbres constituant les vergers. En plus des dispositifs E600-II-1 et E600-II-2, nous avons en main les données de mesure de croissance à 12 ans ainsi que les mesures de gains génétiques pour le dispositif E600-II-3 (Notre-Dame-Du-Rosaire, sous-domaine 5 Ouest), et les mesures de croissance à 13 ans pour les dispositifs E600-II-5 (Valcartier, sous-domaine 2 Est) et E600-II-6 (Saint-Valérien, sous-domaine 4 Est). Ces tests 1, 2, 3 et 5 sont constitués des mêmes familles, alors que le test 6 ne représente qu'un sous-échantillon de ces dernières (68 familles par rapport à un ensemble de 293 familles).

Afin d'identifier les dispositifs semblables ou différents des tests E600-II-1 et E600-II-2 (et donc, les climats favorables ou défavorables aux arbres des vergers), nous avons comparé le rang de classement des différentes familles à l'intérieur de chacun des tests. Nous avons d'abord comparé les mesures de gains génétiques calculés pour 3 de ces tests. De plus, un modèle linéaire a été appliqué sur les rangs des familles pour chaque paire de dispositifs à l'aide du logiciel statistique R. Les résultats indiquent que le test de Notre-Dame du Rosaire (E600-II-3) se distingue des autres tests. En effet, nous observons peu de correspondance entre ce test et les autres quant à la performance relative des familles (tableau 1). Ainsi, 40 % des familles représentées dans le nouveau verger sous-performent dans ce dispositif (figure 2). Ce résultat est cohérent avec une précédente analyse qui indiquait que le tiers des familles qui se trouvent dans le verger de Berthier sous-performent dans ce dispositif (Mottet 2018). Les conditions climatiques passées observées (1971-2000) à Notre-Dame-du-Rosaire représentent donc des conditions sous-optimales pour les arbres sélectionnés des deux V2 de pin blanc, alors que celles dans les autres dispositifs sont généralement favorables.

Tableau 1. Comparaisons des rangs des familles à l'intérieur des dispositifs pour chaque paire de dispositifs.

Dispositif 1	Dispositif 2	R ²	Valeur de p	Conclusion
ND-Laus (E600-1)	Grand-Mère (E600-2)	0,258	< 0,0001	Similaires
ND-Laus (E600-1)	ND-Rosaire (E600-3)	0,0215	0,01	Différents
ND-Laus (E600-1)	Valcartier (E600-5)	0,238	< 0,0001	Similaires
ND-Laus (E600-1)	Saint-Valérien (E600-6)	0,365	< 0,0001	Similaires
Grand-Mère (E600-2)	ND-Rosaire (E600-3)	0,038	0,001	Différents
Grand-Mère (E600-2)	Valcartier (E600-5)	0,2	< 0,0001	Similaires
Grand-Mère (E600-2)	Saint-Valérien (E600-6)	0,173	0,004	Similaires
ND-Rosaire (E600-3)	Valcartier (E600-5)	0,0218	0,02	Différents
ND-Rosaire (E600-3)	Saint-Valérien (E600-6)	0,0572	0,1	Différents
Valcartier (E600-5)	Saint-Valérien (E600-6)	0,164	0,005	Similaires



Figure 2. Gains génétiques des différentes familles présentes dans les trois dispositifs (E600-1, E600-2 et E6003). Les points noirs marquent les familles recommandées pour le nouveau V2 de pin banc. Les couleurs indiquent l'origine des familles (rouge = Virginie [Pennsylvanie], jaune = États des Grands-Lacs [Ontario], violet = États de Nouvelle-Angleterre et le Nouveau-Brunswick, bleu = Québec).

Par la suite, afin de définir les territoires d'utilisation où il y a et où il y aura des conditions climatiques favorables aux arbres présents dans les vergers, nous avons utilisé la distribution de différentes variables climatiques pour chacun des sous-domaines et les avons mises en relation avec la moyenne des conditions climatiques observées (1988-1999) dans chacun des dispositifs. Dans chacun des sous-domaines, nous avons extrait la moyenne des variables pour des points distribués régulièrement sur le territoire (à chaque 0,05 degré) pour la période de 1971-2000 (correspondant à celle de croissance des arbres) et selon le scénario RCP4.5 du modèle canadien CanESM2 (10 km) (Chylek *et al.* 2011, Moss *et al.* 2010) pour les périodes 1991-2020 (que nous utiliserons comme le présent) et 2021-50 (qui correspond au futur). Pour la période 2046-2065, nous avons calculé la moyenne de 8 différents scénarios (de la même manière que dans Rainville *et al.* 2014). Les variables climatiques sélectionnées étaient le nombre de degrés-jours au-dessus de 5 °C (DD5), la température minimale atteinte dans l'année, la date du dernier gel printanier et la date du dernier gel automnal. Joyce et Rehfeldt (2013), qui ont analysé les données de différents tests de provenances-descendances à l'échelle de l'aire de répartition du pin blanc, ont déterminé que les DD5 et la température minimale annuelle étaient les variables les plus importantes pour prédire la croissance de l'espèce. De leur côté, Housset *et al.* (2018) ont déterminé que les deux autres variables, qui correspondent aux risques de gels printaniers et automnaux, reflètent bien la relation climat-croissance annuelle.

La figure 3 présente la distribution de la variabilité climatique pour ces 4 variables dans chacun des sous-domaines bioclimatiques. La moyenne observée dans les tests de Notre-Dame-du-Rosaire (E600-II-3) détermine le seuil des conditions défavorables, alors que les conditions observées dans les 4 autres tests servent de guides pour déterminer quelles régions sont et seront favorables à la croissance des arbres issus de ces vergers pour les différentes périodes prédites : 2001-2030 (présent), 2021-2050 (futur) et 2046-2065 (futur) (figure 3). Plus précisément, notre analyse de la distribution des DD5 et de la température minimale annuelle indique que la température minimale annuelle est probablement la variable qui limite la croissance des arbres dans le dispositif de Notre-Dame-du-Rosaire. En effet, les DD5 pour les dispositifs de Saint-Valérien et de Notre-Dame-du-Rosaire sont très similaires (figure 3a), alors que les performances relatives des familles sont différentes lorsque l'on compare les deux tests (tableau 1). C'est sur la base de l'analyse de ces distributions que nous concluons que le territoire d'utilisation des arbres issus des deux V2 pourrait être étendu au sous-domaine 4 Est. En effet, les variables climatiques présentes et futures de ce sous-domaine apparaissent généralement favorables au pin blanc, c'est-à-dire qu'elles se comparent à celles observées dans tous les tests à l'exception de celui de Notre-Dame-du-Rosaire. En revanche, pour le sous-domaine 4 Ouest, les températures minimales présentes et futures ne s'avèrent pas favorables. Afin de limiter les risques de mésadaptation, nous recommandons donc, pour ce sous-domaine, de récolter

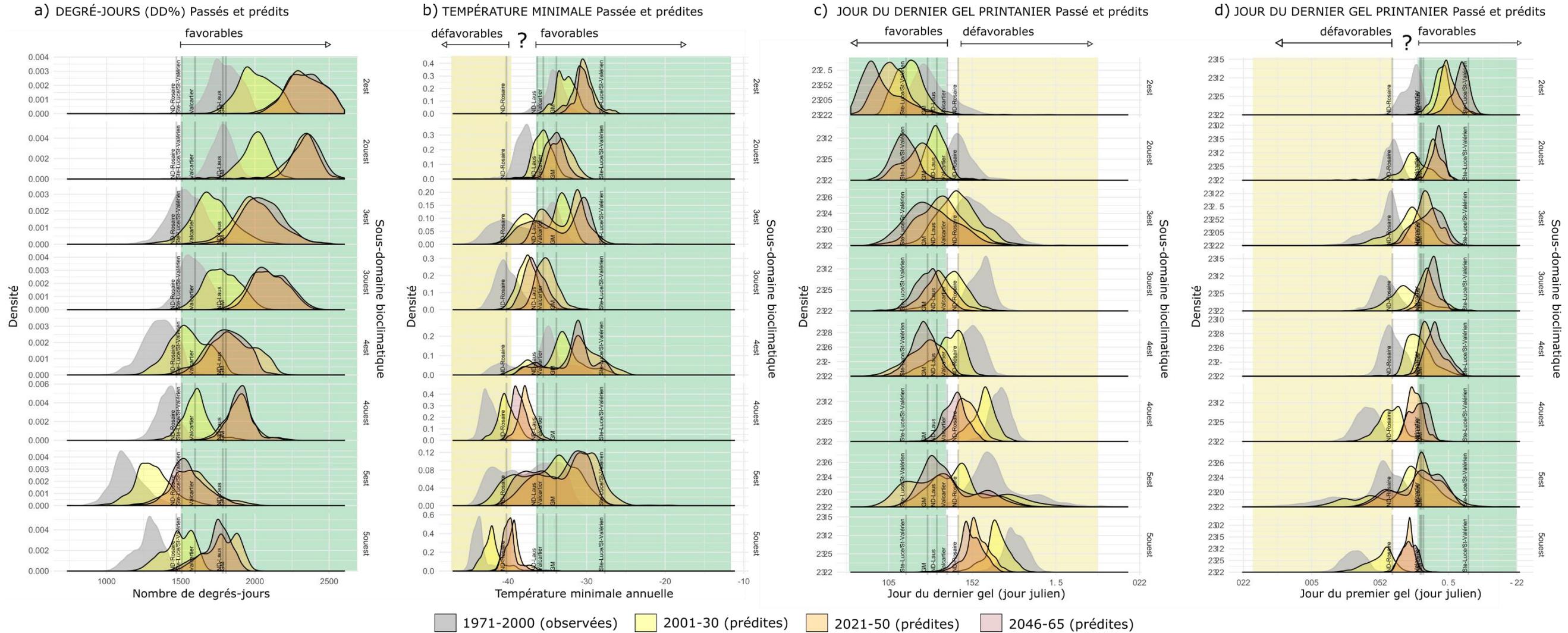


Figure 3. Distribution des moyennes des valeurs passées et prédites a) des degrés-jours au-dessus de 5 °C, b) de la température minimale, c) du jour du dernier gel printanier et d) du jour du premier gel automnal pour les différents sous-domaines pour la période de 1971-2000 (correspondant à celle de croissance des arbres mesurés) et pour 1991-2020, 2021-2050, et 2046-2065. Les prédictions ont été faites selon le scénario Canada CanESM2 (10 km) RCP4.5. Pour 2045-2065, les valeurs correspondent à la moyenne de 8 différents scénarios. Les lignes verticales correspondent à la moyenne observée des différentes variables pour les différents dispositifs : Notre-Dame-du-Laus (E600-1), Grand-Mère (E600-2), Notre-Dame-du-Rosaire (E600-3), Valcartier (E600-5) et Saint-Valérien (E600-6). Une seule ligne représente ce dernier dispositif et le site de la pépinière de Sainte-Luce (qui présentent des conditions très similaires).

des cônes uniquement sur les 55 et 63 arbres (respectivement des vergers de Berthier et du nouveau verger) qui proviennent de familles montrant un gain de croissance par rapport à la moyenne du test à Notre-Dame du Rosaire. La liste de ces arbres a été transmise à la DGPSPF (données non présentées).

3.3. *Emplacement du nouveau V2*

À la lumière des présentes analyses, même si les conditions climatiques à la pépinière de Sainte-Luce (sous domaine 4 Est) ne semblent pas présenter de risques, nous suggérons d'installer le nouveau verger dans un site plus chaud qu'à cet endroit, et ce, pour trois raisons. Tout d'abord, selon le principe de l'épigénétique, il vaudrait mieux que les semences soient produites dans un climat chaud si elles doivent être plantées dans un climat qui se réchauffe. Ensuite, en l'absence d'un modèle de transfert pour le pin blanc, nous préférons faire preuve de prudence, étant donné le caractère très imparfait et l'incertitude associés à la présente analyse. Finalement, pour le territoire québécois, la littérature et nos données suggèrent que les températures froides, et non chaudes, sont les plus susceptibles d'occasionner de la mésadaptation pour le pin blanc. Il est important aussi de choisir un site où les conditions climatiques sont défavorables au développement de la rouille vésiculeuse du pin blanc (une maladie causée par *Cronartium ribicola*), et où les *Ribes* sont absents (plante hôte alterne du champignon).

4. Perspectives

Parmi les conifères qui font partie des programmes d'amélioration du MFFP, le pin blanc est l'espèce qui présente le plus grand potentiel pour la migration assistée. Tout d'abord, son aire de répartition est plus méridionale que celle des espèces de la forêt boréale (p. ex. : épinette noire, épinette blanche et pin gris). Les prédictions par modélisation de l'habitat futur du pin blanc (2050 et 2080) selon les changements climatiques anticipés prévoient une perte d'habitat dans le sud de l'aire de répartition de l'espèce (surtout aux États-Unis), mais des gains dans la partie nord, notamment au Québec (Périé *et al.* 2014). Le Québec pourrait ainsi devenir un refuge pour certaines provenances américaines de pin blanc menacées par les changements climatiques (Joyce et Rehfeldt 2013). De plus, le pin blanc est l'espèce pour laquelle nous disposons du plus de matériel « opérationnel » pour appliquer les principes de la migration assistée (ou du flux génique assisté). En effet, les deux V2 (celui de Berthier et celui projeté) sont constitués selon le principe de « flux génique assisté » (*assisted gene flow*, une forme de migration assistée) dont l'objectif est de produire des arbres issus de croisements entre parents de différentes origines afin de conserver les adaptations locales (provenant des arbres du Québec) et d'en injecter des nouvelles (provenant des arbres « du sud ») qui correspondent au climat du futur.

Cependant, pour atteindre l'objectif de produire des arbres avec le plus fort potentiel d'adaptation, il ne faut aucune barrière à la reproduction entre les parents du Québec et « du sud ». Si ces échanges de gènes ne sont pas aléatoires, cela pourrait entraîner des problèmes de mésadaptation et même de consanguinité.

Différentes méthodes peuvent être utilisées afin de mesurer ces échanges. Un suivi de la phénologie florale des arbres au verger de Berthier permet d'évaluer s'il existe un décalage de floraison entre les deux groupes. De plus, la comparaison des rendements et des caractéristiques des semences produites par les arbres, couplée à des analyses d'assignation parentale utilisant des outils génomiques, peut mettre en évidence des différences entre les deux groupes. Des travaux sont en cours à la DRF pour étudier ces questions.

Des points inconnus subsistent quant aux origines des arbres des tests ayant été utilisés pour constituer les V2. Par exemple, certains arbres des deux tests E600 et E601 semblent provenir de la même localité d'origine (p. ex. : Lac Balsam et Rivière Schyan, voir l'annexe). De même, plusieurs arbres de la série E-600 proviennent de lots de graines récoltés dans des parcs à clones, surtout pour des provenances américaines. L'utilisation d'outils génomiques devrait permettre de mesurer ce degré de parenté.

Par ailleurs, le programme d'amélioration du pin blanc pourrait bénéficier de l'introduction de nouvelles sources méridionales. En effet, différentes études ont démontré que les populations de pin blanc issues des États américains étaient très performantes (Beaulieu *et al.* 1996, Housset *et al.* 2018). Or, notre couverture actuelle du territoire américain est clairsemée (figure 1). Un nouvel échantillonnage tenant compte de la structure génétique des populations de pin blanc (Nadeau *et al.* 2015, 2016) permettra de diversifier les sources méridionales et donc d'optimiser le potentiel d'adaptation aux changements climatiques. Enfin, ce nouvel échantillonnage devrait s'accompagner de l'installation de nouveaux tests dans les domaines bioclimatiques plus représentatifs de l'aire de répartition projetée de l'espèce. En effet, à l'heure actuelle, aucun test correspondant à ces arbres n'est présent dans le domaine bioclimatique de la sapinière à bouleau jaune (4).

5. Références

Aitken, S.N., S. Yeaman, J.A. Holliday, T. Wang et S. Curtis-McLane, 2008. *Adaptation, migration or extirpation: climate change outcomes for tree populations*. *Evol. Appl.* 1(1): 95-111.

[\[https://doi.org/10.1111/j.1752-4571.2007.00013.x\]](https://doi.org/10.1111/j.1752-4571.2007.00013.x)

Beaulieu, J., A. Plourde, G. Daoust et L. Lamontagne, 1996. *Genetic variation in juvenile growth of Pinus Strobus in replicated Quebec provenance-progeny tests*. *For. Genet.* 3(2): 103-112.

Chylek P., J. Li, M.K. Dubey, M. Wang et G. Lesins, 2011. *Observed and model simulated 20th century Arctic temperature variability: Canadian Earth System Model CanESM2*. *Chemistry and Physics Discussion* 11: 22893-22907. [\[https://doi.org/10.5194/acpd-11-22893-2011\]](https://doi.org/10.5194/acpd-11-22893-2011)

- Housset, J.M., S. Nadeau, N. Isabel, C. Depardieu, I. Duchesne, P. Lenz et M.P. Girardin, 2018. *Tree rings provide a new class of phenotypes for genetic associations that foster insights into adaptation of conifers to climate change*. *New Phytol.* 218(2): 630-645. [<https://doi.org/10.1111/nph.14968>]
- Joyce, D.G. 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: 173-192. [<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.12.024>]
- Mottet, M.-J., 2018. *Recommandations de sources de semences de pin blanc pour la région du Lac-Saint-Jean dans le sous-domaine bioclimatique de la sapinière à bouleau blanc de l'Ouest*. Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de la recherche forestière. Avis technique SGRE-16. 8 p. [<https://mffp.gouv.qc.ca/documents/forets/recherche/AT-SGRE-16.pdf>]
- Moss, R.H., J.A. Edmonds, K.A. Hibbard, M.R. Manning, S.K. Rose, D.P. van Vuuren, T.R. Carter, S. Emori, M. Kainuma, T. Kram, G.A. Meehl, J.F.B. Mitchell, N. Nakicenovic, K. Riahi, S.J. Smith, R.J. Stouffer, A.M. Thomson, J.P. Weyant et T.J. Wilbanks, 2010. *The next generation of scenarios for climate change research and assessment*. *Nature* 463:747-56. [<https://doi.org/10.1038/nature08823>]
- Nadeau, S., J. Godbout, M. Lamothe, M.-C. Gros-Louis, N. Isabel et K. Ritland, 2015. *Contrasting patterns of genetic diversity across the ranges of Pinus monticola and P. strobus: A comparison between eastern and western North American postglacial colonization histories*. *Am. J. Bot.* 102(8): 1342-1355. [<https://doi.org/10.3732/ajb.1500160>]
- Nadeau, S., P.G. Meirans, S.N. Aitken, K. Ritland et N. Isabel, 2016. *The challenge of separating signatures of local adaptation from those of isolation by distance and colonization history: The case of two white pines*. *Ecol. Evol.* 6(24): 8649-8664. [<https://doi.org/10.1002/ece3.2550>]
- 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 Forêts de la Faune et des Parcs, Direction de la recherche forestière. Mémoire de recherche n° 173. 66 p. [<https://mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Perie-Catherine/Memoire173.pdf>]

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 n° 174. 78 p.

[<https://mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Rainville-Andre/Memoire174.pdf>]

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 forestier. 2 p.

[<https://mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/zone-vegetation-2003.pdf>]

Marie-Josée Mottet, ing.f., M. Sc.

Julie Godbout, M. Sc., Ph. D.

Direction de la recherche forestière
Service de la génétique, de la reproduction et de l'écologie