

ERRATA: Cette version comporte deux corrections mineures apportées au document original diffusé en septembre 2022 : à la page 2, 4^e paragraphe, lignes 4 et 5, la phrase originale « ...sapinière à bouleau blanc (MS1) ou à la sapinière à bouleau jaune (MS2)... » se lit maintenant « ...sapinière à bouleau blanc (MS2) ou à la sapinière à bouleau jaune (MS1)... ».

Avis technique

SSRF-30

Direction de la recherche forestière

Titre :	Cartographie des indices de qualité de station des plantations monospécifiques d'épinette blanche, d'épinette noire et de pin gris au Québec
Auteur(s) :	Julie Barrette, ing.f., Ph. D., Isabelle Auger, stat. ASSQ, M. Sc. et Jean-Daniel Sylvain, géographe, M. Sc.
Date :	Février 2023 (version corrigée)

La cartographie des indices de qualité de station (IQS) des plantations monospécifiques permet de cibler les aires forestières propices à l'intensification de la production ligneuse et de mieux orienter les décisions d'aménagement forestier. Nous avons développé des modèles pour cartographier la répartition spatiale des IQS de plantations pour les 3 essences résineuses les plus plantées au Québec : l'épinette noire, l'épinette blanche et le pin gris. Nous avons ensuite appliqué les modèles aux polygones forestiers de la carte écoforestière, dans une optique de gestion stratégique à l'échelle provinciale ou à celle des niveaux supérieurs du système hiérarchique de classification écologique.

1. Contexte

Depuis quelques années, plusieurs directions au sein du ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP) s'intéressent à cartographier la productivité du territoire forestier québécois pour mettre en place de nouvelles plantations. Avec l'arrivée de la nouvelle stratégie de production de bois (MFFP 2020), la baisse de possibilité forestière et la mise en réserve de nouveaux territoires en vue d'en faire des aires protégées, la détermination des aires propices à l'intensification de la production ligneuse s'avère un enjeu incontournable (MELCC 2022, Paradis 2022).

L'indice de qualité de station (IQS) est l'un des indicateurs les plus couramment utilisés pour déterminer la productivité d'un territoire forestier (Ung *et al.* 2001, Wang *et al.* 2005). Cette mesure indirecte de la productivité est obtenue à partir de la relation entre la hauteur dominante et l'âge d'un peuplement fixé à une valeur de référence donnée (Skovsgaard et Vanclay 2007). Au Québec, cette valeur a été fixée à 25 ans pour les principales essences résineuses plantées (Prégent *et al.* 2010, Auger et Ward 2021).

Jusqu'à présent, peu d'études ont tenté de cartographier les IQS de plantations au Québec. Outre l'avis technique que nous avons publié en 2019 sur l'inférence spatiale de l'IQS de l'épinette noire (EPN : *Picea mariana* (Mill.) B.S.P.) en plantations (Barrette *et al.* 2019), Beaulieu *et al.* (2011) ont aussi développé des

modèles non linéaires pour estimer l'IQS de plantations pour 7 essences plantées au Québec. Pour ce faire, ils ont utilisé des variables biophysiques (de climat et de sol) et structurelles (l'indice de régularité de Shannon, caractérisant la distribution des diamètres à hauteur de poitrine) de plantations. Néanmoins, les pouvoirs prédictifs de ces modèles étaient relativement faibles, avec des coefficients de détermination (R^2) de 0,16 pour l'épinette blanche (EPB : *Picea glauca* (Moench) Voss), 0,17 pour l'EPN et 0,32 pour le pin gris (PIG : *Pinus banksiana* Lamb.).

En forêt naturelle, Müssenberger *et al.* (2010) ont aussi mis au point des modèles permettant d'estimer l'IQS potentiel pour plusieurs essences résineuses et feuillues dans les forêts publiques du Québec, à partir des attributs de la carte écoforestière et des variables climatiques. Ces modèles ont été bâtis par essence et par sous-domaine bioclimatique, générant un total de 34 équations. L'application de ces équations aux polygones de la carte écoforestière a ensuite permis de simuler des valeurs d'IQS potentielles pour la majorité des polygones de la carte écoforestière. En moyenne, les variables explicatives retenues dans les modèles finaux expliquaient moins de 50 % de la variabilité des IQS de forêt naturelle. Selon les sous-domaines bioclimatiques, les R^2 des modèles développés variaient de 0,21 à 0,48 pour l'EPN, de 0,36 à 0,50 pour l'EPB et de 0,48 à 0,61 pour le PIG. Néanmoins, compte tenu des différences importantes qui existent entre les conditions biophysiques des sites naturels et de plantations, l'utilisation de l'IQS potentiel pour cibler les secteurs d'intérêt en plantations ne semble pas appropriée.

En effet, certains auteurs ont tenté d'explorer si les valeurs d'IQS potentiel de forêts naturelles pouvaient être mises en lien avec les valeurs d'IQS de plantations. Par exemple, Ortuno *et al.* (2013) ont étudié la possibilité d'utiliser l'IQS potentiel pour choisir les aires propices à l'intensification de la production ligneuse de l'EPB dans la forêt publique gaspésienne. Ils ont constaté que le degré d'ajustement des relations entre l'IQS potentiel et l'IQS de plantations mesuré sur le terrain variait beaucoup entre les différents types écologiques rencontrés sur le territoire gaspésien. Par conséquent, ces relations présentaient un pouvoir explicatif allant de faible à moyen ($R^2 = 0,3$) et fournissaient une estimation biaisée des valeurs d'IQS (biais absolu moyen de 3,16 m). Dans l'ensemble, ces auteurs ont remarqué que les valeurs de l'IQS potentiel étaient inférieures à celles de l'IQS de plantations. Ils ont avancé que cet écart pouvait s'expliquer notamment par des méthodes différentes pour la préparation de terrain et pour l'estimation de l'IQS dans les plantations et les forêts naturelles.

Quant à eux, les résultats des travaux de Barrette *et al.* (2019) sur la modélisation spatiale des IQS d'EPN de plantations suggéraient que l'utilisation de l'IQS potentiel était problématique étant donné sa faible disponibilité dans la carte écoforestière. Par exemple, l'IQS potentiel de l'EPN n'était pas fourni dans les polygones dont la végétation potentielle correspondait à la sapinière à bouleau blanc (MS2) ou à la sapinière à bouleau jaune (MS1), alors que des plantations d'EPN pouvaient être présentes sur ces végétations potentielles. Ainsi, ce modèle ne pouvait s'appliquer qu'à une proportion limitée du territoire forestier (66 %).

Étant donné les différences importantes qui existent entre les IQS potentiels des forêts naturelles et de plantations et de l'importance de ces variables pour les activités de reboisement, il est primordial de développer des modèles de cartographie d'IQS qui sont spécifiques aux plantations. Ces cartes d'IQS permettront de répondre au besoin grandissant d'information sur la productivité du territoire forestier pour les plantations du Québec, de manière à optimiser les retombées économiques liées aux activités de reboisement et de sylviculture.

Dans cet avis technique, nous proposons trois modèles d'inférence pour cartographier la répartition spatiale des IQS du PIG, de l'EPN et de l'EPB en plantations, dans un contexte de gestion provinciale. À elles seules, ces trois essences représentent 94 % des plants reboisés au Québec depuis 2001 (Richard 2015). Le modèle d'inférence spatiale d'IQS de l'EPN est en fait une mise à jour de l'avis technique SSRF-13 déjà publié (Barrette *et al.* 2019). Cette réévaluation résulte de la publication de nouvelles valeurs d'IQS pour l'EPN estimées à partir de nouveaux modèles de croissance de la hauteur dominante (Auger et Ward 2021). Dans le présent avis technique, nous décrivons aussi l'approche utilisée, les cartes d'IQS obtenues et le contexte d'utilisation de ces modèles.

2. Méthodologie

2.1. Données

Nous avons utilisé les placettes du réseau de suivi des plantations de la Direction de la recherche forestière, soit 465, 439 et 590 placettes provenant de plantations d'EPB, d'EPN et de PIG, respectivement (figure 1). Les données des inventaires du dernier mesurage, réalisé de 1970 à 2020, nous ont servi à calculer l'IQS à 25 ans (désigné par IQS₂₅) de chaque placette. Nos calculs se sont basés sur les relations âge-hauteur dominante développées par Auger et Ward (2021) pour les plantations d'EPN et de PIG et par Prigent *et al.* (2010) pour les plantations d'EPB. Nous avons aussi vérifié et corrigé les coordonnées spatiales des placettes lorsque nécessaire.

À partir des coordonnées spatiales de chacune des placettes, nous avons extrait les variables explicatives potentielles pour modéliser les IQS₂₅. Nous avons extrait les normales climatiques moyennes sur 30 ans (de 1981 à 2010) à l'aide du logiciel BioSIM (Régnière *et al.* 2014). Parmi les variables disponibles, nous avons éliminé celles dont la corrélation deux à deux était supérieure à 0,8 et qui étaient en moyenne les plus étroitement corrélées avec les autres variables. Nous avons ainsi retenu 10 variables climatiques (tableau 1).

De plus, à partir de la carte écoforestière diffusée par la Direction des inventaires forestiers (MFFP 2021), nous avons extrait les variables-synthèses décrivant la végétation et les conditions du milieu physique : le milieu physique (le 4^e caractère du type écologique, représentant le régime hydrique et la texture du sol), le sous-domaine bioclimatique et l'altitude (tableau 1). De plus, à partir des cartes révisées du système d'information et d'inférence des sols, nous avons obtenu le pH, la proportion de carbone organique, la

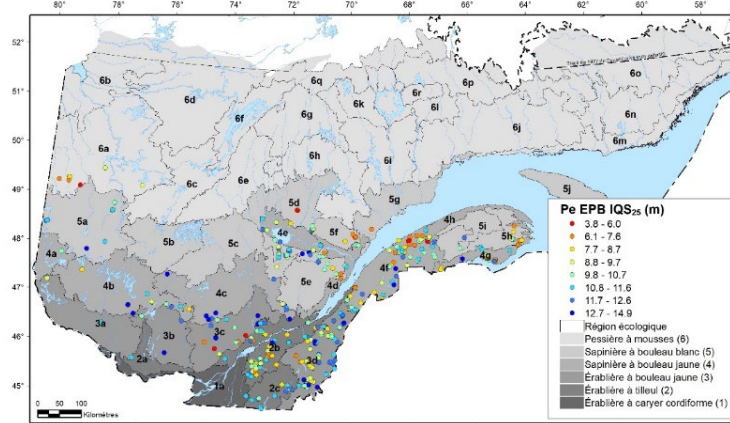
capacité d'échange cationique (CEC) et les proportions en sable, en limon et en argile à différentes profondeurs dans le sol (SIIGSOL version 1.0.0; Sylvain *et al.* 2021). Comme les variables de sol sont susceptibles d'être corrélées entre les horizons, nous avons retenu celles de l'horizon situé à 0-5 cm de profondeur ainsi que la proportion de carbone organique et la CEC de l'horizon situé de 15 à 30 cm de profondeur (tableau 2).

2.2 Méthodes

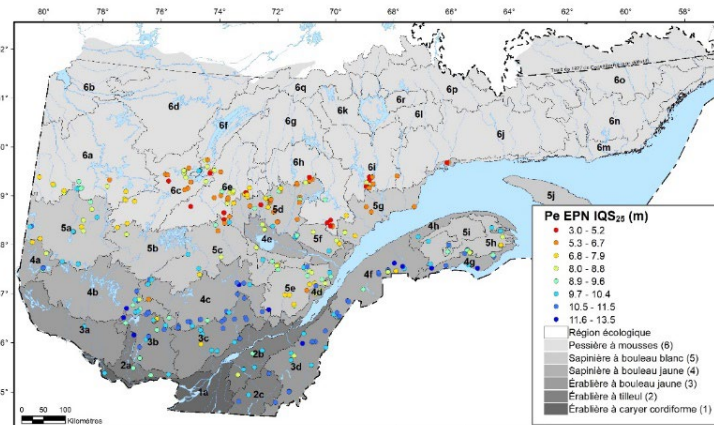
Pour modéliser l'IQS₂₅, nous avons utilisé des modèles non paramétriques du type des « forêts d'arbres décisionnels aléatoires » (Breiman 2001) développés séparément pour chaque essence. Comme son nom l'indique, cette approche de modélisation fournit des estimations à partir d'un ensemble d'arbres de régression. Les variables explicatives utilisées à chaque embranchement proviennent d'un sous-ensemble aléatoire des variables disponibles, et chaque arbre est construit à partir d'un sous-ensemble aléatoire des observations disponibles. Nous avons sélectionné cette approche parce qu'elle est réputée pour être robuste, facile à paramétrer et très performante (Hastie *et al.* 2009). Les modèles sont construits et testés à partir de deux sous-ensembles : les données d'apprentissage et les données de validation indépendante. Dans le cadre de cette étude, 80 % des données disponibles ont servi de données d'apprentissage pour l'élaboration des modèles, et 20 % d'entre elles ont servi à tester ces modèles lors de la validation indépendante. Puisque la taille des jeux de données est relativement faible (n : EPB = 465 placettes, EPN = 439 placettes et PIG = 590 placettes), nous avons séparé 100 fois de manière aléatoire les données en 2 sous-ensembles (données d'apprentissage et données de validation indépendante) afin de vérifier la sensibilité de la performance des modèles à l'échantillonnage.

Nous avons regroupé les variables explicatives en 4 groupes : 1) climat et altitude; 2) caractéristiques édaphiques (SIIGSOL); 3) milieu physique; 4) sous-domaine bioclimatique. Pour chaque essence, nous avons testé toutes les combinaisons possibles de modèles comprenant de 1 à 4 groupes de variables, pour ne retenir que les groupes de variables du modèle ayant le plus grand R² sur les données de validation indépendante. Celui-ci (ci-après nommé « modèle cartographique ») a ensuite été calibré sur l'ensemble des données disponibles avec les groupes de variables retenus et utilisé pour cartographier les IQS. Lors de cet exercice, nous avons ordonné les variables selon leur importance grâce à l'indice de diminution de précision moyenne (*mean decrease accuracy*), avant d'analyser la relation entre les IQS₂₅ estimés (\widehat{IQS}_{25}) et les valeurs des trois variables les plus importantes pour chacun des modèles cartographiques. Des analyses préliminaires avaient permis de déterminer le nombre optimal de variables explicatives à utiliser à chaque embranchement d'un arbre décisionnel aléatoire de la forêt (*mtry* = 3), le nombre optimal d'arbres décisionnels dans la forêt (*ntree* = 1 500) et la taille minimale optimale d'un nœud terminal d'un arbre décisionnel (*nodesize* = 5). La modélisation a été réalisée avec le logiciel R (R Core Team 2020), à l'aide de la librairie *randomForest* (Liaw et Wiener 2002).

a) EPB



b) EPN



c) PIG

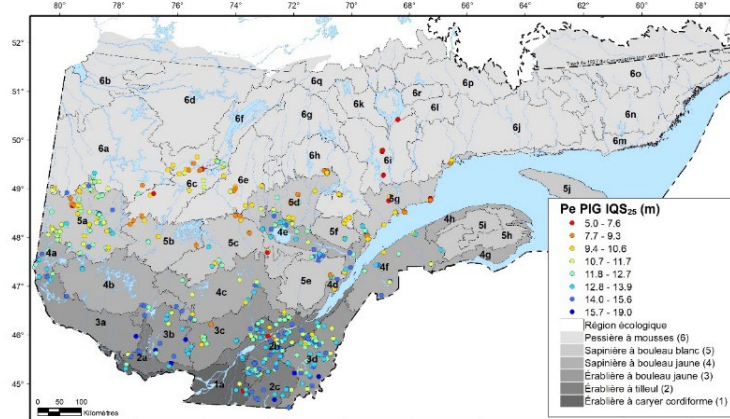


Figure 1. Répartition spatiale des placettes (Pe) utilisées pour développer le modèle servant à estimer l'indice de qualité de station (IQS₂₅) des plantations a) d'épinette blanche (EPB; n = 465), b) d'épinette noire (EPN; n = 439) et c) de pin gris (PIG; n = 590). La couleur des points indique les valeurs calculées d'IQS₂₅.

Tableau 1. Définition et valeurs (moyenne, avec minimum et maximum entre parenthèses) des différentes variables de climat et d'altitude testées dans les modèles pour l'épinette blanche (EPB), l'épinette noire (EPN) et le pin gris (PIG).

Groupe de variables	Variable	Définition	Unité de mesure	EPB	EPN	PIG
Climat et altitude	Humidité relative	Moyenne annuelle de l'humidité relative moyenne quotidienne	%	75,2 (70,4-79,1)	75,7 (71,0-81,5)	75,2 (71,2-81,0)
	Température annuelle	Moyenne annuelle de la température moyenne quotidienne	°C	3,10 (-0,9-6,5)	1,75 (-0,7-6,2)	2,77 (-1,8-6,6)
	Premier jour de gel	Date du premier jour de gel à l'automne	Jour julien	257 (228-281)	249 (225-280)	255 (226-283)
	Aridité	Accumulation du déficit en eau mensuel (différence entre l'évaporation potentielle mensuelle de Thornthwaite et les précipitations mensuelles. Valeur fixée à zéro si cette différence est négative)	mm	31,4 (7,7-66,3)	29,6 (9,2-73,7)	11,2 (9,9-78,4)
	Nombre de jours secs	Nombre de jours dans l'année où les précipitations quotidiennes sont < 0,2 mm	jours	209 (171-251)	217 (173-246)	240 (199-265)
	Précipitations totales	Précipitations annuelles totales	mm	1077 (825-1475)	1027 (834-1487)	1017 (803-1513)
	Température moyenne durant la saison de croissance	Température moyenne durant la saison de croissance, définie comme la période entre les 3 derniers jours consécutifs sans gel ($T_{\min} < 0$) au printemps et les 3 premiers jours consécutifs avec gel ($T_{\min} < 0$) à l'automne	°C	14,0 (12,1-15,7)	13,7 (11,0-15,6)	14,2 (10,9-15,8)
	Déficit de pression de vapeur	Moyenne annuelle du déficit de pression de vapeur	hPa	11,7 (8,45-17,2)	12,1 (6,09-17,0)	12,1 (5,88-16,7)
	Proportion des précipitations sous forme de neige	Proportion des précipitations sous forme de neige (neige quand $T_{\text{moyenne}} < 0$)	%	32,4 (24,5-42,5)	33,4 (25,4-44,9)	30,8 (23,8-39,1)
	Radiation totale	Radiation totale annuelle	MJ·m ⁻²	4840 (4442-5480)	4868 (4339-5521)	4786 (4301-5236)
Altitude	Altitude	m	278 (20-770)	363 (28,3-878)	254 (10-580)	

Tableau 2. Définition et valeurs (moyenne, avec minimum et maximum entre parenthèses) des différentes variables édaphiques mesurées à différentes profondeurs (SIIGSOL, version 1.0.0) et testées dans les modèles pour l'épinette blanche (EPB), l'épinette noire (EPN) et le pin gris (PIG).

Profondeur	Variable	Définition	Unité de mesure	EPB	EPN	PIG
0-5 cm	pH	pH estimé dans la portion du sol à une profondeur de 0 à 5 cm	s. o.	3,9 (3,35-5,07)	3,81 (3,49-5,01)	3,91 (3,62-5,76)
	Proportion de carbone	Proportion de carbone organique estimée dans la portion du sol à une profondeur de 0 à 5 cm	%	9,56 (2,86-15,5)	10,0 (3,93-15,1)	8,55 (2,37-13,9)
	CEC	Capacité d'échange cationique estimée dans la portion du sol à une profondeur de 0 à 5 cm	mEq/100 g	5,72 (1,07-15,6)	4,63 (0,483-18,0)	4,70 (0,369-18,7)
	Argile	Proportion d'argile estimée dans la portion du sol à une profondeur de 0 à 5 cm	%	14,4 (3,10-71,4)	14,0 (3,13-77,7)	15,2 (2,65-78,0)
	Limon	Proportion de limon estimée dans la portion du sol à une profondeur de 0 à 5 cm	%	25,5 (9,47-39,7)	23,0 (7,81-38,6)	20,8 (7,38-37,3)
	Sable	Proportion de sable estimée dans la portion du sol à une profondeur de 0 à 5 cm	%	60,1 (11,0-87,5)	63,0 (7,91-88,7)	64,1 (8,10-88,5)
15-30 cm	pH	pH estimé dans la portion du sol à une profondeur de 15 à 30 cm	s. o.	4,29 (3,70-5,35)	4,13 (3,67-5,28)	4,25 (3,87-6,03)
	Proportion de carbone	Proportion de carbone organique estimée dans la portion du sol à une profondeur de 15 à 30 cm	%	6,26 (0,953-11,9)	6,93 (1,30-13,7)	5,20 (0,386-10,7)
	CEC	Capacité d'échange cationique estimée dans la portion du sol à une profondeur de 15 à 30 cm	mEq/100 g	4,2 (0,709-15,9)	3,43 (0,330-18,3)	3,78 (0,279-18,4)

Nous avons évalué la performance du modèle cartographique en validation indépendante à l'aide du R^2 (équation 1), de la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (REQM; équation 2) et du graphique des IQS₂₅ observés (calculés à partir de l'inventaire) en fonction des IQS₂₅ estimés par le modèle (\widehat{IQS}_{25}). Nous avons aussi calculé la métrique de qualité d'ajustement Kling-Gupta (KGE, Gupta *et al.* 2009, équation 3) pour évaluer la similitude entre les valeurs observées et estimées. Cette métrique se décompose en trois parties : la corrélation linéaire entre les valeurs observées et estimées (r); la variabilité (α), qui correspond au rapport entre l'écart type des valeurs estimées et celui des valeurs observées; et le biais systématique (β), soit le rapport entre la moyenne des valeurs estimées et celle des valeurs observées. La partie α permet d'évaluer le biais par rapport à la variance; elle est utilisée pour repérer l'occurrence d'un possible biais conditionnel lorsque celui-ci s'éloigne de 1. La partie β permet, quant à elle, d'évaluer le biais par rapport à la moyenne; elle sert à déterminer l'occurrence d'un possible biais systématique ou non conditionnel lorsque celui-ci s'éloigne également de 1 (Cannon *et al.* 2015, Nguyen *et al.* 2015).

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_{i,obs} - y_{i,est})^2}{\sum_{i=1}^n (y_{i,obs} - \bar{y}_{obs})^2} \quad [1]$$

$$REQM = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_{i,obs} - y_{i,est})^2} \quad [2]$$

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + (\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2} \quad [3]$$

$$\text{où } r = \frac{cov_{obs,est}}{\sigma_{obs} \cdot \sigma_{est}} \quad \alpha = \frac{\sigma_{est}}{\sigma_{obs}} \quad \beta = \frac{\bar{y}_{est}}{\bar{y}_{obs}}$$

où $y_{i,obs}$ est la valeur de l'observation i , $y_{i,est}$ est la valeur estimée de l'observation i , n est le nombre d'observations, $cov_{obs,est}$ est la covariance entre les valeurs observées et estimées, σ est l'écart type et \bar{y} la moyenne.

Nous avons utilisé les modèles cartographiques pour produire des cartes des IQS₂₅ de plantations d'EPB, d'EPN et de PIG en estimant les IQS₂₅ associés aux polygones forestiers de la carte écoforestière de la Direction des inventaires forestiers (MFFP 2021). À partir des coordonnées géographiques du centroïde de chacun des polygones, nous avons extrait les caractéristiques édaphiques des cartes du système SIIGSOL et les variables climatiques des cartes obtenues par BioSIM. Nous avons fait des estimations pour les polygones ayant un type écologique forestier (tous les types sauf les landes, les marais et la toundra). Nous n'avons pas fait d'estimation pour les polygones dont le code de milieu physique indiquait un sol minéral très mince ou rocheux (code 0), un drainage hydrique (code 7) ou un sol organique (codes 8 et 9), ni pour ceux dont le code terrain indiquait un sol dénudé humide, un sol dénudé sec, une ligne de transport d'énergie ou une aulnaie, ni pour ceux dont la particularité de la strate indiquait un corridor routier ou une bande riveraine. De toute évidence, ces territoires sont peu ou pas utilisés pour la plantation. Par conséquent, nous n'avons pas de données d'entraînement disponibles pour les couvrir. Dans l'ensemble, nos estimations s'étendent du domaine bioclimatique de l'érablière à caryer cordiforme à celui de la

sapinière à bouleau blanc pour l'EPB, alors qu'elles s'étendent du sous-domaine de l'érablière à tilleul de l'Ouest (mais pas celui de l'Est) au domaine de la pessière à mousses pour l'EPN et le PIG.

3. Résultats

Les valeurs d'IQS₂₅ observées varient de 3,8 à 14,9 m (moyenne de 10,0 m) pour l'EPB, de 3,0 à 13,5 m (moyenne de 9,1 m) pour l'EPN et de 5,0 à 19,0 m (moyenne de 11,9 m) pour le PIG (figure 1). Pour chacune des essences, le modèle présentant les meilleures performances lors de la validation indépendante intègre le groupe des variables climatiques. Pour l'EPN et le PIG, il intègre également le sous-domaine bioclimatique et le groupe des variables édaphiques, alors que pour l'EPB, il inclut le milieu physique (tableau 3). Le sous-domaine bioclimatique, la CEC et la température annuelle ou moyenne durant la saison de croissance font partie des trois variables les plus importantes pour l'EPN et le PIG. Pour l'EPB, les trois variables les plus importantes sont plutôt la température annuelle, la proportion des précipitations sous forme de neige et l'altitude.

Les meilleurs modèles présentent une REQM moyenne en validation indépendante de 1,6 m, 1,2 m et 1,5 m, respectivement pour l'EPB, l'EPN et le PIG (données non présentées), de même qu'un R² moyen de 0,299 pour l'EPB, de 0,543 pour l'EPN et de 0,527 pour le PIG (figure 2). Pour les 3 essences, le R² calculé sur l'ensemble des données (représenté par un point bleu sur la figure 2) est un peu plus grand que celui calculé lors de la validation indépendante (représenté par un point noir sur la figure 2), ce qui pourrait indiquer une possible surparamétrisation. Toutefois, celle-ci ne nous apparaît pas excessive, étant donné le faible écart entre les deux R² (points bleus et noirs sur la figure 2). Les valeurs du coefficient β sont très près de 1, ce qui indique que les valeurs d' \widehat{IQS}_{25} ne sont pas biaisées par rapport à la moyenne des observations d'IQS₂₅, et ce, pour les trois essences (figure 3). Cependant, la différence de pente entre la droite 1:1 et la droite de régression liant les valeurs prédites et observées pour l'EPN et le PIG (figure 3) indique que les valeurs estimées par les modèles sont légèrement biaisées par rapport à la variance. Ce biais s'explique en bonne partie par la tendance des modèles à sous-estimer la variance des IQS. En effet, les valeurs du coefficient α (qui représente le rapport entre la variance des données prédites et celle des données observées) varient de 0,57 à 0,68 (figure 3), ce qui reflète une variabilité plus petite dans les valeurs estimées que dans les valeurs observées. Les modèles ne reproduisent donc pas l'étendue des valeurs d'IQS₂₅. Par conséquent, les valeurs estimées par les modèles (\widehat{IQS}_{25}) doivent être interprétées en tant que valeurs relatives, par exemple pour cibler les zones les plus productives, et non prises comme des valeurs absolues correspondant aux valeurs observées sur le terrain.

Tableau 3. Variables explicatives retenues dans le modèle cartographique pour l'épinette blanche (EPB), l'épinette noire (EPN) et le pin gris (PIG). Les numéros indiquent l'ordre d'importance des variables dans le modèle, d'après l'indice de diminution de la précision moyenne. Les valeurs en gras indiquent qu'une variable fait partie des 5 variables les plus importantes.

Groupe de variables	Variable*	EPB	EPN	PIG
Climat et altitude	Humidité relative	6	5	9
	Température annuelle	1	1	10
	Date du premier jour de gel	8	17	16
	Aridité	11	14	14
	Nombre de jours secs	10	12	18
	Précipitations totales annuelles	12	6	11
	Température moyenne pendant la saison de croissance	7	9	3
	Déficit de pression de vapeur	5	15	5
	Proportion des précipitations sous forme de neige	2	13	7
	Radiation totale annuelle	4	7	6
	Altitude	3	21	4
Milieu physique	Milieu physique	9	—	—
Sous-domaine bioclimatique	Sous-domaine bioclimatique	—	2	1
Caractéristiques édaphiques (SIIGSOL, version 1.0.0) Profondeur : 0-5 cm	pH	—	19	21
	Proportion de carbone	—	10	20
	CEC	—	4	8
	Argile	—	8	13
	Limon	—	20	19
	Sable	—	18	15
Caractéristiques édaphiques (SIIGSOL; version 1.0.0) Profondeur : 15-30 cm	pH	—	11	12
	Proportion de carbone	—	16	17
	CEC	—	3	2

* Voir les tableaux 1 et 2 pour les définitions et les unités de mesure associées à chaque variable.

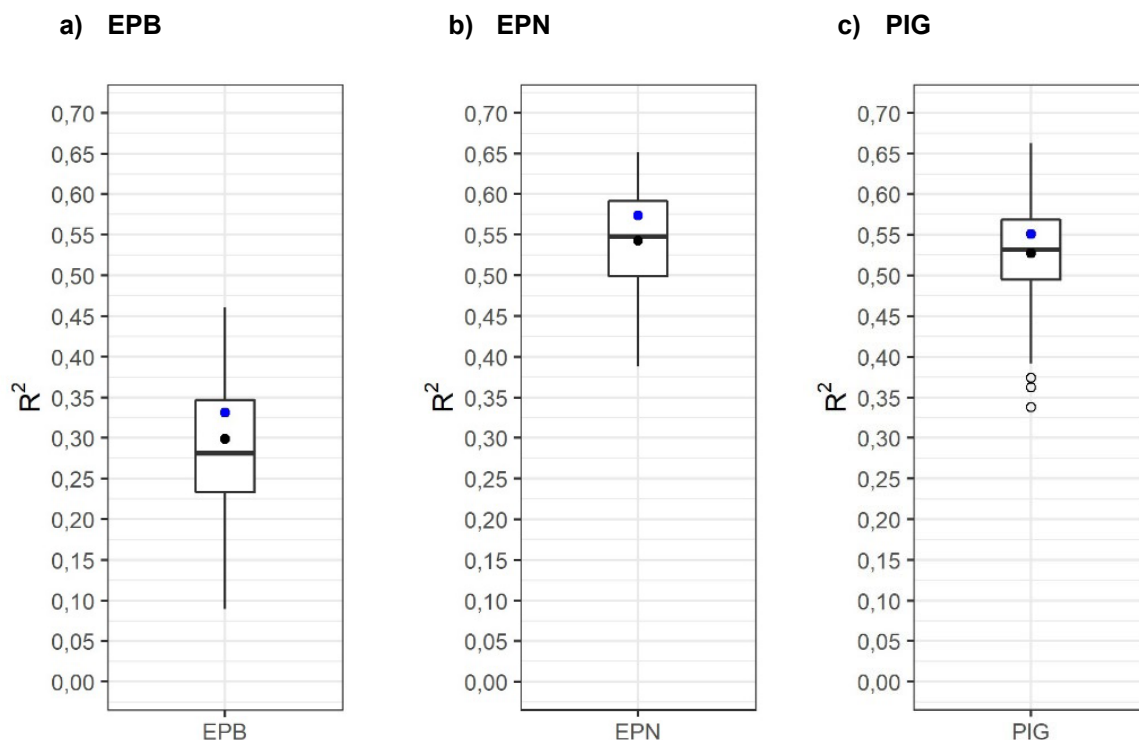
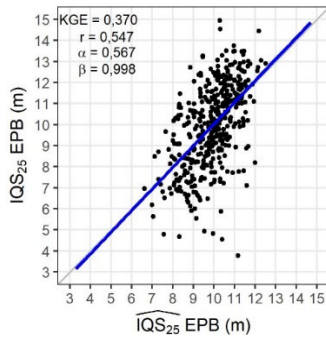


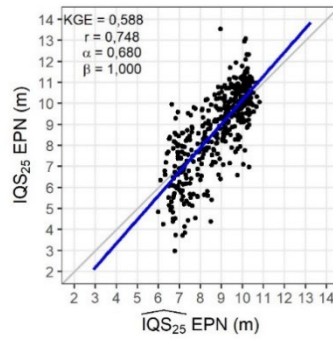
Figure 2. Diagrammes en boîte à moustaches (*box plot*) représentant la répartition des coefficients de détermination (R^2) des modèles cartographiques servant à estimer l' IQS_{25} de plantations a) d'épinette blanche (EPB), b) d'épinette noire (EPN) et c) de pin gris (PIG), pour les 100 sous-ensembles de données validation indépendante. Dans chaque boîte, la ligne foncée représente la médiane, le point noir correspond à la moyenne, et les limites inférieures et supérieures de la boîte représentent respectivement le 1^{er} et le 3^e quartile de la distribution; les moustaches s'étendent jusqu'à 1,5 fois l'écart interquartile; enfin, le point bleu représente le R^2 du modèle cartographique calibré sur l'ensemble des données.

Selon les résultats de la modélisation présentés à la figure 4, les valeurs d' \widehat{IQS}_{25} de l'EPB, de l'EPN et du PIG augmentent avec la température; dans les cas du PIG et de l'EPN, elles diminuent aussi des sous-domaines bioclimatiques les plus chauds (au sud) vers les plus froids (au nord). Également, on observe, pour l' \widehat{IQS}_{25} de l'EPN et du PIG, une relation de forme plutôt quadratique avec la CEC: l' \widehat{IQS}_{25} atteint un maximum vers une valeur de 3 pour le PIG et de 5 pour l'EPN (figure 4). On note aussi que l' \widehat{IQS}_{25} de l'EPB diminue lorsque la proportion des précipitations sous forme de neige devient plus importante (environ 33 %) et qu'il atteint des valeurs optimales à des altitudes de 300 à 400 m. Au-dessus de 400 m, l' \widehat{IQS}_{25} de l'EPB chute rapidement. Puisque la densité de points était parfois limitée pour certaines étendues de valeurs, nous demeurons prudents quant à la description de certaines relations présentées.

a) EPB



b) EPN



c) PIG

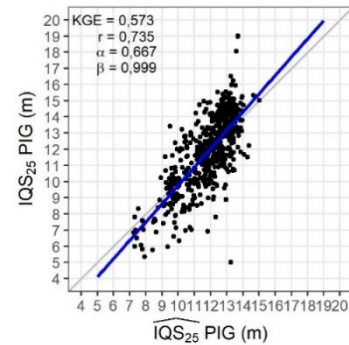


Figure 3. Relation entre l'indice de qualité de station observé (IQS_{25}) et celui estimé par le modèle cartographique (\widehat{IQS}_{25}) lors de la validation indépendante (moyenne des 100 répétitions) pour a) l'épinette blanche (EPB), b) l'épinette noire (EPN) et c) le pin gris (PIG). La ligne bleue correspond à la droite de régression entre les variables, alors que la ligne grise correspond à la droite 1:1. KGE = métrique de qualité d'ajustement Kling-Gupta; r = corrélation linéaire entre les valeurs observées et estimées; α = rapport entre l'écart type des valeurs estimées et celui des valeurs observées (biais conditionnel); β = rapport entre la moyenne des valeurs estimées et celle des valeurs observées (biais systématique).

La figure 5 présente les cartes de distribution géographique des \widehat{IQS}_{25} pour chacune des essences étudiées. Celles-ci sont disponibles sur demande auprès des auteurs.

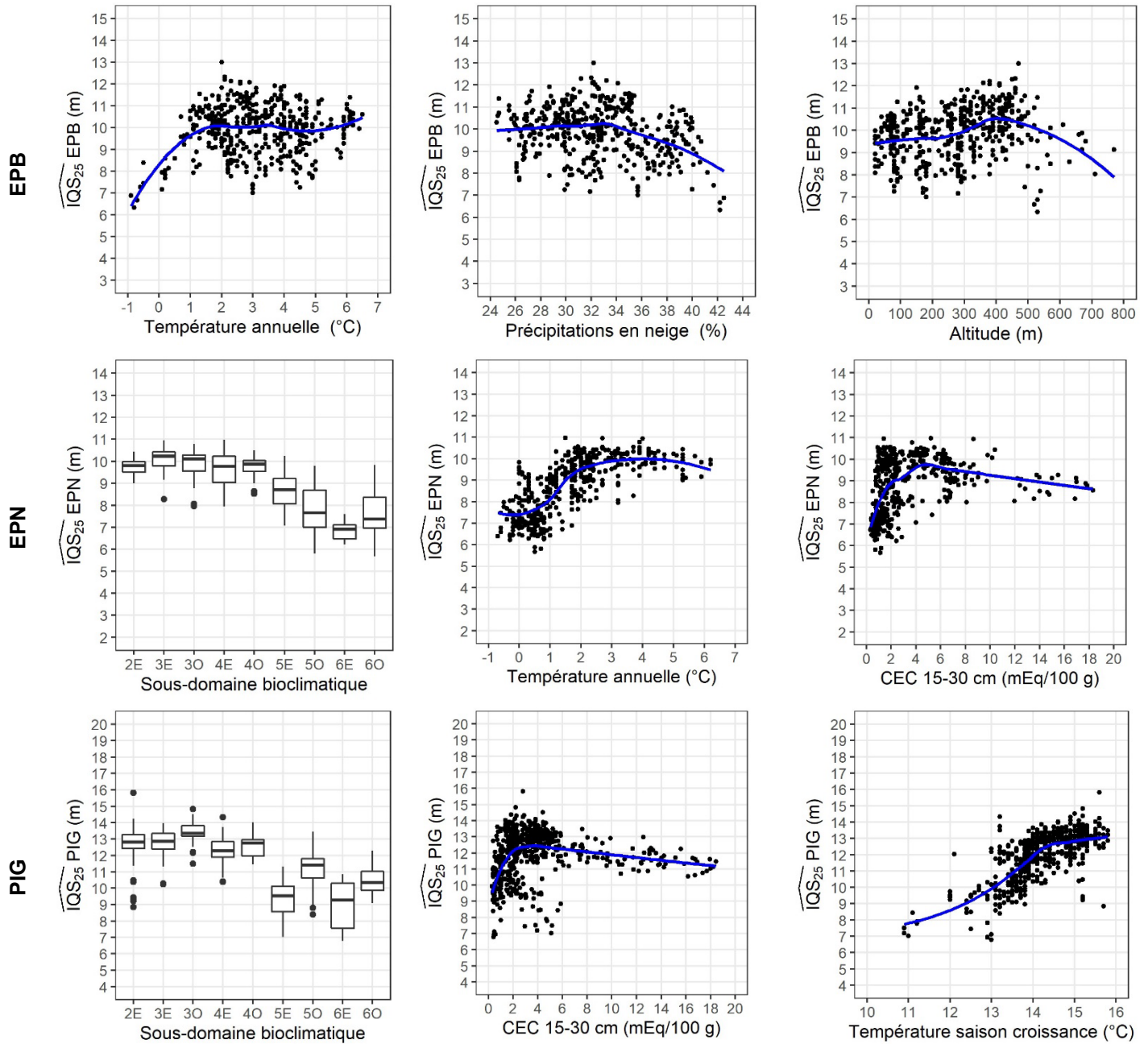
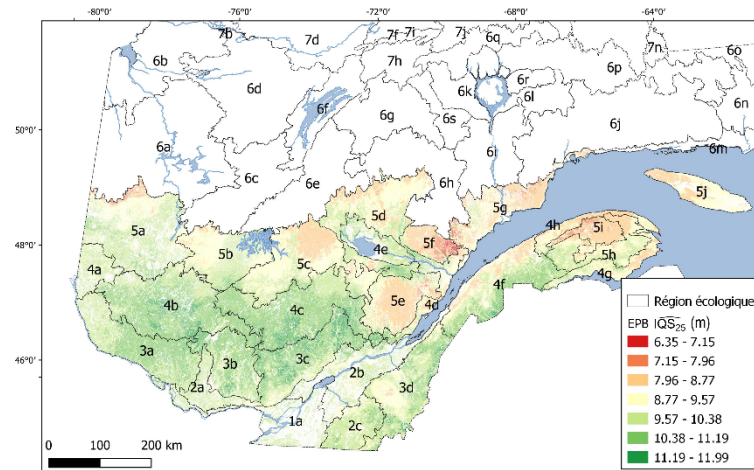
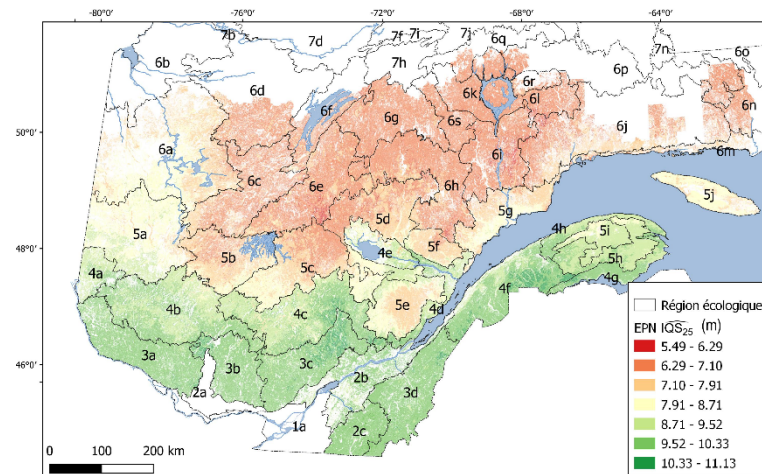


Figure 4. Relation entre l'indice de qualité de station estimé (\widehat{IQS}_{25}) et les 3 variables les plus importantes (colonnes) dans le modèle cartographique retenu pour l'épinette blanche (EPB, rangée du haut), l'épinette noire (EPN, rangée du centre) et le pin gris (FIG, rangée du bas). La ligne bleue est un lissage des valeurs d' \widehat{IQS}_{25} . CEC 15-30 cm = capacité d'échange cationique de la portion du sol à une profondeur de 15 à 30 cm.

a) EPB



b) EPN



c) PIG

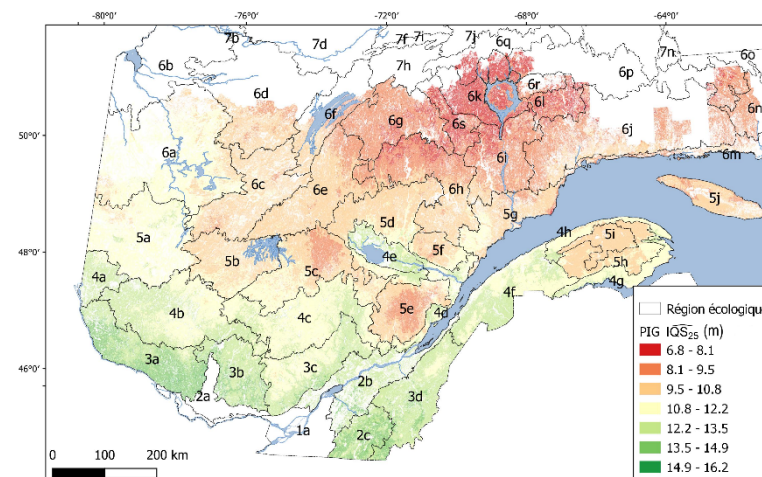


Figure 5. Cartes de l'indice de qualité de station estimé (\widehat{IQS}_{25}) des plantations a) d'épinette blanche (EPB), b) d'épinette noire (EPN) et c) de pin gris (PIG), à partir des polygones forestiers de la carte écoforestière.

4. Discussion

Nos résultats indiquent que les IQS₂₅ des plantations d'EPB, d'EPN et de PIG sont tous très sensibles aux variations climatiques. Ces résultats sont en accord avec les observations de Beaulieu *et al.* (2011), qui suggèrent que les valeurs d'IQS des 3 principales essences résineuses plantées au Québec s'expliquent en bonne partie par le nombre de degrés-jours et les quantités de précipitations en été.

Dans leur étude, Müssenberger *et al.* (2010) avaient également souligné l'importance déterminante des variables climatiques pour modéliser l'IQS potentiel de plusieurs espèces issues de la forêt naturelle du Québec. Dans leurs modèles, le nombre de degrés-jours de croissance et le déficit de pression de vapeur étaient les prédicteurs les plus importants. De manière générale, on reconnaît que la croissance en diamètre ou en hauteur des arbres dépend étroitement de la température ambiante et de la disponibilité en eau (Ryan 2010, Way et Oren 2010). Certains graphiques de la figure 4 appuient ces observations, puisqu'ils révèlent que les valeurs d'IQS₂₅ de l'EPB, de l'EPN et du PIG sont plus élevées lorsque la température est plus chaude. Néanmoins, les modèles ont été ajustés avec une faible densité de points ce qui pourrait favoriser l'expression des variables explicatives présentant un fort gradient à l'échelle de la province. Inversement, cela pourrait aussi limiter l'expression des variables explicatives ayant une structure spatiale localisée.

Les modèles indiquent également que les IQS₂₅ de l'EPN et du PIG seraient plus sensibles à la CEC. Ces résultats sont intéressants puisque même si les variables édaphiques sont réputées pour être de bons indicateurs de la productivité forestière, peu d'études avaient jusqu'à présent tenté d'en expliquer les variations sur l'IQS des plantations au Québec. Comme les données édaphiques ne sont disponibles que pour les stations échantillonnées et que celles-ci sont généralement peu nombreuses à l'échelle de la province, leur intégration dans des modèles spatiaux a été limitée jusqu'à présent. La CEC est une variable qui permet d'estimer le pouvoir d'un sol à retenir et échanger des cations, ce qui permet de décrire le potentiel de fertilité d'un sol. D'après nos résultats, les plus fortes valeurs d'IQS de plantations de PIG et d'EPN sont associées à des stations où les valeurs de CEC simulées se situent autour de 3 et 5 mEq/100 g, respectivement. Ceci indiquerait que les stations où les valeurs de CEC sont trop basses ou trop élevées pourraient limiter la croissance des épinettes noires et des pins gris dans les plantations. En effet, les stations associées à des valeurs de CEC relativement élevées peuvent être associées à des sols argileux ou ayant une grande capacité de rétention en eau et une forte teneur en matière organique. À l'inverse, les stations associées à de faibles valeurs de CEC peuvent avoir des sols sableux, présentant une faible capacité de rétention en eau et une faible teneur en matière organique. Dans l'est des États-Unis, Jiang *et al.* (2015) avaient également trouvé que les variables de sol comme le pH et le pourcentage de sol grossier étaient importants pour expliquer les variations de l'IQS d'essences résineuses.

Notre exercice de modélisation cartographique de l'IQS₂₅ de l'EPB n'a permis de retenir aucune des variables édaphiques testées. Toutefois, le code de milieu physique, qui combine un code de texture et de régime hydrique, a été retenu comme neuvième variable explicative. L'IQS₂₅ de l'EPB était plus sensible à la température annuelle moyenne, à la proportion de précipitations sous forme de neige et à l'altitude. Il est intéressant d'observer, toutefois, qu'un apport trop important en neige peut aussi nuire à la croissance de l'épinette blanche en plantation (figure 4a). De plus, l'épinette blanche de plantation semble moins bien pousser en haute altitude (et montre une croissance optimale autour de 300 et 400 m). De manière générale, l'épinette blanche est une espèce qui a besoin d'un milieu fertile et riche en nutriments pour bien se développer. Elle s'adapte à une grande variété de sols, mais elle préfère les sols calcaires et riches en matière organique, qui favorisent la disponibilité de l'azote, du potassium et du phosphore (MRN 2013).

Les résultats de nos travaux de modélisation ont affiché des R² moyens relativement modestes en validation indépendante (R² = 0,299 pour l'EPB; R² = 0,543 pour l'EPN; R² = 0,527 pour le PIG), mais néanmoins supérieurs à ceux obtenus dans l'étude de Beaulieu *et al.* (2011). De toute évidence, l'exercice de modélisation s'est avéré plus ardu pour l'EPB. Peut-être que pour cette espèce, la répartition spatiale des données que nous avons pour construire le modèle cartographique n'était pas assez étendue pour couvrir une vaste gamme de valeurs d'IQS. Il serait intéressant, dans le futur, de tester d'autres variables explicatives, mais aussi d'élargir la répartition spatiale de nos placettes de suivi, particulièrement pour les plantations d'EPB. L'ajout de nouvelles placettes contribuerait sûrement à améliorer les prévisions du modèle cartographique. Également, il serait intéressant de tester de nouveaux modèles lorsque nous aurons une version révisée du système SIIGSOL, grâce auquel les valeurs estimées auront été simulées à une échelle régionale plutôt qu'à une échelle provinciale.

Dans l'ensemble, les estimations d'IQS₂₅ ne montrent pas de biais systématique, c'est-à-dire qu'elles ne sont en moyenne ni surestimées ni sous-estimées. Toutefois, leur variabilité était inférieure à celle des données observées, de sorte que l'étendue des valeurs estimées était elle aussi réduite (figure 3). Le fait que nous ayons très peu de données de suivi dans des plantations établies dans des milieux tourbeux ou très secs peut avoir contribué à limiter le pouvoir de prévision des modèles pour les valeurs extrêmes. L'approche de modélisation non paramétrique que nous avons utilisée offre une plus grande flexibilité que les approches paramétriques. Toutefois, comme nous l'avons mentionné un peu plus tôt, d'autres efforts devront être consentis dans les prochaines années afin d'améliorer ces modèles d'IQS, particulièrement pour l'EPB.

Dans une optique de rentabilisation des investissements faits dans les plantations, les aménagistes pourraient vouloir définir un seuil d'IQS afin de faciliter diverses prises de décisions sylvicoles (CCSAMF 2003). Dans l'ensemble, et peu importe l'essence testée, on observe que les stations ayant les valeurs d'IQS₂₅ les plus élevées sont toujours situées au sud des différentes régions (figure 1). Si les aménagistes souhaitent augmenter la capacité de récolte et raccourcir le temps de révolution, ils gagneraient à tenir compte de cette tendance dans leurs décisions futures. À titre d'exemple, une plantation de PIG reboisée à 2 000 tiges/ha devrait atteindre un volume marchand de 370 m³/ha à l'âge de 50 ans si elle pousse sur

une station avec un IQS de 14 m, mais de seulement 116 m³/ha si elle pousse sur une station ayant un IQS de 7 m (Auger et Ward 2021).

Rappelons toutefois qu'à ce stade-ci, les valeurs d'IQS₂₅ estimées par les modèles ne devraient être utilisées que de manière stratégique et à l'échelle de la province ou des niveaux supérieurs du système hiérarchique de classification écologique. Un modèle destiné à une application régionale ou à l'échelle des niveaux inférieurs du système hiérarchique de classification écologique pourrait être développé à partir des valeurs d'IQS₂₅, mais pour ce faire, il faudrait soustraire au préalable les tendances longitudinales et latitudinales observées à l'échelle provinciale. Cet exercice pourrait permettre à d'autres facteurs biotiques et abiotiques de s'exprimer. L'ensemble de ces modifications pourrait améliorer la qualité des prévisions et des inférences statistiques destinées à une application plus fine aux échelles régionale et locale. Par ailleurs, les relations développées dans le cadre de ce travail entre les variables explicatives et les estimations des IQS₂₅ (figure 4) ne devraient pas servir de balises aux aménagistes, mais plutôt être utilisées pour mieux comprendre les modèles.

Dans le futur, il serait intéressant de tester différentes métriques à partir des données lidar pour expliquer la productivité des plantations du Québec (Bour *et al.* 2021). La disponibilité prochaine de suivis temporels pourrait permettre de poursuivre de nouvelles études de cartographie des IQS. En Norvège, une étude récente avec des mesures répétées obtenues au lidar a donné d'excellents résultats (Noordermeer *et al.* 2020). Peut-être pourrions-nous ainsi développer un nouvel indice de productivité pour les plantations du Québec?

5. Conclusion

Cette analyse nous a permis de développer des modèles d'inférence spatiale de l'IQS₂₅ pour les 3 principales essences résineuses plantées au Québec : l'épinette noire, l'épinette blanche et le pin gris. Elle nous a également permis de mettre à jour le premier modèle d'inférence spatiale que nous avons développé en 2019 pour les IQS₂₅ d'EPN en plantations et d'y intégrer les modèles de croissance de la hauteur dominante élaborés par Auger et Ward (2021).

À notre connaissance, cette étude est la deuxième qui tente d'offrir une valeur d'IQS₂₅ de plantations à l'échelle du polygone forestier de la carte écoforestière du Québec pour les plantations d'EPN. Pour l'EPB et le PIG, il s'agit d'une première. Les cartes présentées ici pourront servir d'outil pour mieux orienter le choix des aires d'intensification de la production ligneuse à l'échelle provinciale, une démarche importante qui s'inscrit dans la Stratégie nationale de production de bois (MFFP, 2020).

6. Remerciements

Nous aimerions remercier Jean Noël et Véronique Poirier pour l'aide apportée afin d'extraire les données à partir des cartes écoforestières et créer les cartes (figures 1 et 5). Également, nos remerciements s'adressent à Marie-Claude Lambert pour l'extraction des données de BioSIM et à Réjean Poliquin pour la vérification de certaines données de localisation. De plus, nous tenons à souligner le travail d'édition accompli par Denise Tousignant, Alexandre Dallaire-Théroux et Maude-Emmanuelle Hajjaj.

7. Références bibliographiques

- Auger, I. et C. Ward, 2021. *Tables de rendement pour les plantations d'épinette noire et les plantations de pin gris au Québec*. Gouvernement du Québec, ministère des Forêts de la Faune et des Parcs, Direction de la recherche forestière. Avis technique SSS-06. 25 p.
https://mffp.gouv.qc.ca/documents/forets/recherche/AT_SSS-06.pdf
- Barrette, J., I. Auger, J.-D. Sylvain, C. Ward et V. Laflèche, 2019. *Inférence spatiale de l'indice de qualité de station de l'épinette noire issue de plantations dans un contexte de gestion provinciale*. Gouvernement du Québec, ministère des Forêts de la Faune et des Parcs, Direction de la recherche forestière. Avis technique SSRF-13. 12 p. <https://mffp.gouv.qc.ca/nos-publications/inference-spatiale-indice-qualite-station-epinette-noire/>
- 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 Quebec*. Can. J. For. Res. 41(4): 682-693. <https://doi.org/10.1139/x11-006>
- Bour, B., V. Danneyrolles, Y. Boucher, R.A. Fournier et L. Guindon, 2021. *Modeling post-logging height growth of black spruce forests by combining airborne lidar and historical forestry maps in eastern canadian boreal forest*. For. Ecol. Manage. 502: 119697.
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119697>
- Breiman, L., 2001. *Random forests*. Mach. Learn. 45: 5-32 p. <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>
- Cannon, A.J., Sobie, S.R., Murdock, T.Q., 2015. *Bias correction of GCM precipitation by quantile mapping: How well do methods preserve changes in quantiles and extremes?* J. Clim. 28, 6938–6959. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00754.1>
- [CCSMAF] Comité consultatif scientifique du Manuel d'aménagement forestier, 2003. *Éclaircie commerciale pour le groupe de production prioritaire SEPM*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles du Québec, Direction de la recherche forestière. Avis scientifique. 80 p. <https://mffp.gouv.qc.ca/documents/forets/connaissances/recherche/Avis-scient-commerciale.pdf>
- Hastie, T., T. Robert et J. Friedman, 2009. *The elements of statistical learning: Data mining, inference, and prediction*. Springer-Verlag. New York, NY (États-Unis). 745 p. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-84858-7>

- Jiang, H., P.J. Radtke, A.R. Weiskittel, J.W. Coulston et P.J. Guertin, 2015. *Climate and soils-based models of site productivity in Eastern U.S. tree species*. Can. J. For. Res. 45(3): 325-342. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2014-0054>
- Liaw, A. et M. Wiener, 2002. *Classification and regression by randomforest*. R News 2(3): 18-22.
- [MFFP] ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, 2020. *Engagée dans la création de richesse : Stratégie nationale de production de bois*. Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs. 50 p. https://cdn-contenu.quebec.ca/cdn-contenu/adm/min/forets-faune-parcs/publications-adm/strategies/STR_production_bois_MFFP.pdf
- [MFFP] ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, 2021. *Guide d'utilisation de la carte écoforestière et des résultats d'inventaire écoforestier du Québec méridional*. Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, secteur des forêts, Direction des inventaires forestiers, 65 p.
- [MELCC] Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (2022, 17 février). *Québec annonce son intention de créer 10 nouvelles aires protégées dans le sud du Québec*. [https://www.environnement.gouv.qc.ca/infuseur/communiqu.asp?no=4705#:~:text=Québec%2C le 17 février 2022,en faire des aires protégées](https://www.environnement.gouv.qc.ca/infuseur/communiqu.asp?no=4705#:~:text=Québec%2C le 17 février 2022,en%20faire%20des%20aires%20protégées)
- [MRN] ministère des Ressources naturelles, 2013. *Le guide sylvicole du Québec, Tome 1 — Les fondements biologiques de la sylviculture*. Les publications du Québec. Québec, QC. 1 044 p.
- Müssenberger, F., S. Miron, M. Riopel, J. Bégin et J.-P. Saucier, 2010. « Équations non linéaires de la relation hauteur-âge à l'échelle provinciale ». Dans : Müssenberger, F., S. Miron, M. Riopel, V. Lafèche, J. Bégin et J.-P. Saucier (édit.). *Le potentiel d'accroissement d'une station écoforestière: Prédiction de l'indice de qualité de station et de l'accroissement annuel moyen potentiel par polygone forestier pour la forêt publique commerciale du Québec*. Université Laval. p. 59-135. ftp://ftp.mrnf.gouv.qc.ca/Public/DIF/Diffusion/rapportIQS/Rapport_IQS_FINAL.pdf
- Nguyen, T.T., Huang, J.Z., Nguyen, T.T., 2015. *Two-level quantile regression forests for bias correction in range prediction*. Machine Learning 101, 325–343. <https://doi.org/10.1007/s10994-014-5452-1>.
- Noordermeer, L., T. Gobakken, E. Næsset et O.M. Bollandsås, 2020. *Predicting and mapping site index in operational forest inventories using bitemporal airborne laser scanner data*. For. Ecol. Manage. 457: 117768. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117768>
- Ortuno, M., D. Gasser, S. Bilodeau-Gauthier et A. Malenfant, 2013. *Validation de la valeur prédictive de l'indice de qualité de station potentiel modélisé de l'épinette blanche et implications pour la sélection des aires d'intensification de la production ligneuse en forêt publique gaspésienne*. Consortium en foresterie Gaspésie—Les-Îles. Gaspé, QC. 77 p.

- Paradis, Steve, 2022. *Moins de bois disponible pour l'industrie forestière sur la Côte-Nord*. Le Soleil, mardi 22 février 2022. <https://www.lesoleil.com/2022/02/22/moins-de-bois-disponible-pour-lindustrie-forestiere-sur-la-cote-nord-c7c3c45258adb053c377c5c7dc711cc2>
- Pothier, D. et F. Savard, 1998. *Actualisation des tables de production pour les principales espèces forestières du Québec*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Direction de la recherche forestière. 183 p. <https://mffp.gouv.qc.ca/documents/forets/connaissances/actualisation-tables-production.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. 73 p. <https://mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Pregent-Guy/Memoire160.pdf>
- R Core Team, 2020. *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing. Vienne (Autriche). <https://www.R-project.org/>
- Régnière, J., R. Saint-Amant et A. Béchar, 2014. *BioSIM — guide de l'utilisateur*. Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts, Centre de foresterie des Laurentides. n° LAU-X-137F. 70 p. http://publications.gc.ca/collections/collection_2015/rncannrcan/Fo113-3-137-fra.pdf
- Richard, D., 2015. « Où en sommes-nous au Québec? Portrait des plantations récentes ». Dans: *Les défis forestiers du 21^e siècle : les plantations ont-elles un rôle à jouer? Colloque sur les plantations*. 18 et 19 mars 2015. Québec, QC. p. 10. http://www.rfq.uqam.ca/colloque2015/ColloquePlantations2015_CahierParticipant.pdf
- Ryan, M.G., 2010. *Temperature and tree growth*. *Tree Physiol.* 30(6): 667-668. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpq033>
- Skovsgaard, J.P. et Vanclay, J.K., 2007. *Forest site productivity: a review of the evolution of dendrometric concepts for even-aged stands*. *Forestry* 81(1): 13-31. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpm041>
- Sylvain, J.-D., F. Anctil et E. Thiffault, 2021. *Using bias correction and ensemble modelling for predictive mapping and related uncertainty: A case study in digital soil mapping*. *Geoderma* 403: 115-153. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115153>
- Ung, C.-H., P.-Y. Bernier, F. Raulier, R.A. Fournier, M.-C. Lambert et J. Régnière, 2001. *Biophysical site indices for shade tolerant and intolerant boreal species*. *For. Sci.* 47(1): 83-95. <https://doi.org/10.1093/forestscience/47.1.83>
- Wang, Y., F. Raulier et C.-H. Ung, 2005. *Evaluation of spatial predictions of site index obtained by parametric and nonparametric methods—a case study of lodgepole pine productivity*. *For. Ecol. Manage.* 214 (1-3): 201-211. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.04.025>

Way, D.A. et R. Oren, 2010. *Differential responses to changes in growth temperature between trees from different functional groups and biomes: A review and synthesis of data*. Tree Physiol. 30(6): 669-688. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpq015>

Julie Barrette, ing.f., Ph. D.

Service de la sylviculture et du rendement des forêts

Isabelle Auger, stat. ASSQ, M. Sc.

Service du soutien scientifique

Jean Daniel Sylvain, géographe, M. Sc.

Service de la sylviculture et du rendement des forêts

Correspondance :

Julie Barrette
Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs
Direction de la recherche forestière
2700, rue Einstein, bureau B.1.145
Québec (Québec) G1P 3W8
Tél. : 418 643-7994 poste 706578
Courriel : julie.barrette@mffp.gouv.qc.ca

On peut citer tout ou une partie de ce texte en indiquant la référence. Citation recommandée :

Barrette, J., I. Auger et J.-D. Sylvain, 2022. *Cartographie des indices de qualité de station des plantations monospécifiques d'épinette blanche, d'épinette noire et de pin gris au Québec*. Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de la recherche forestière. Avis technique SSRF-30. 21 p.