

Avis technique

SSRF-35

Direction de la recherche forestière

Titre :	Quelle courbe de rendement devrait-on utiliser pour simuler l'évolution des plantations monospécifiques d'épinette rouge?
Auteur(s) :	Julie Barrette, ing.f., Ph. D., Guillaume Drolet, ing.f., M. Sc., Isabelle Auger, stat. ASSQ, M. Sc. et Martin Perron, biologiste, Ph. D.
Date :	Août 2024

L'épinette rouge (EPR) est une essence qui a été peu plantée au Québec, et pour laquelle il n'existe pas de courbe de rendement en plantation. Afin d'estimer la performance des plantations d'EPR, nous avons comparé la croissance en hauteur de cette essence à celle de l'épinette noire (EPN) et de l'épinette blanche en plantations monospécifiques, à l'aide de données provenant du lidar aéroporté et d'inventaires sur le terrain. Les résultats montrent que la croissance en hauteur de l'EPR est très semblable à celle de l'EPN. Ainsi, nous recommandons d'utiliser les courbes de rendement de l'EPN en plantation pour simuler la croissance des plantations d'EPR.

1. Contexte

Les plantations d'épinette rouge (*Picea rubens* Sargent; EPR) occupent une superficie relativement faible du territoire forestier québécois, et les relevés d'inventaire disponibles pour cette essence sont plutôt rares. À l'heure actuelle, il y a environ 500 hectares de plantations d'EPR photo-interprétées au Québec. Celles-ci sont principalement situées dans les domaines bioclimatiques de l'érablière à bouleau jaune (domaine 3) et de la sapinière à bouleau jaune (domaine 4). Étant donné le nombre restreint de suivis pour cette essence en plantation, aucune courbe de rendement n'a jamais été mise au point. Le Forestier en Chef se demande donc laquelle des courbes actuellement disponibles il devrait utiliser pour simuler l'évolution des plantations monospécifiques d'EPR. Parmi les épinettes, des courbes sont présentement disponibles pour les plantations monospécifiques d'épinette blanche (*Picea glauca* (Moench) Voss; EPB) (Prégent *et al.* 2010), d'épinette noire (*Picea mariana* (Mill). B.S.P.; EPN) (Auger et Ward 2021) et d'épinette de Norvège (*Picea abies* (L.) H. Karst.; EPO) (Prégent *et al.* 2016).

Sur le plan génétique, l'EPR est semblable à l'EPN; l'espèce descend en fait d'une population d'EPN isolée lors des glaciations du Pléistocène (période allant de 2,58 millions d'années à 11 700 années avant aujourd'hui; Perron *et al.* 2000). En milieu naturel, l'EPR pousse principalement dans le nord-est des États-Unis et dans certaines provinces du sud-est du Canada (Burns et Honkala 1990). C'est une espèce très

tolérante à l'ombre, qui préfère croître sous couvert plutôt qu'à découvert (Dumais *et al.* 2007). Par conséquent, lorsqu'elle est plantée pour former une plantation monospécifique sans la protection d'un couvert forestier, l'EPR peut souffrir de dessiccation hivernale lors de stress hydriques (Morgenstern *et al.* 1981). En forêt naturelle, l'EPR est reconnue comme une espèce de fin de succession qu'on trouve en forêts mixtes. Au contraire, l'EPN est reconnue comme une espèce pionnière qu'on trouve particulièrement en peuplements purs dans la forêt boréale (Burns et Honkala 1990).

Cet avis technique vise donc à déterminer si la performance de l'EPR (croissance en hauteur) peut se comparer à celle des autres épinettes pour lesquelles nous avons déjà des courbes de rendement. L'EPN est celle qui offre le plus faible rendement au Québec (Auger et Ward 2021); elle est suivie par l'EPB (Prégent *et al.* 2010), puis par l'EPO, qui est de toute évidence l'épinette qui offre le plus haut rendement en plantation au Québec (Prégent *et al.* 2016). Comme l'EPR possède sensiblement le même matériel génétique que l'EPN, nous avons limité notre comparaison à l'EPN et à l'EPB.

2. Méthode

En raison du faible nombre de plantations d'EPR réalisées historiquement au Québec et du nombre restreint de placettes de suivi pour cette essence, nous avons utilisé les données de la carte écoforestière en combinaison avec les données de hauteur du couvert obtenues par lidar aéroporté pour comparer l'évolution des plantations d'EPB et d'EPN à celles des plantations d'EPR.

Malgré le nombre restreint de placettes pour l'EPR en plantation, nous avons aussi analysé celles qui étaient disponibles dans le réseau de suivi de la DRF ($n = 20$ placettes), afin de comparer leur évolution à celle des plantations d'EPN.

2.1. Sélection des polygones de plantation

Dans les bases de données géographiques de la carte écoforestière à jour (MRNF 2023a), nous avons sélectionné les polygones qui correspondaient aux plantations d'épinette noire (code d'essence EN), d'épinette blanche (code d'essence EB) et d'épinette rouge (code d'essence EU) réalisées de 1956 à 2013. Pour ce faire, nous avons retenu uniquement les polygones dont la valeur du champ REB_ESS1 (qui signifie : reboisement de l'essence n° 1) correspondait au code d'essence EN, EB ou EU, afin d'identifier les plantations monospécifiques en EPN, EPB et EPR. De plus, nous avons retenu uniquement les polygones dont l'origine correspondait à des plantations (codes P, PL, PLB, PLN ou PLR) et dont l'année d'origine était connue. Par la suite, nous avons retiré les polygones qui avaient subi des perturbations naturelles sévères ou partielles à partir des couches de perturbations naturelles et anthropiques (MRNF 2023b) avant et après 1976 (voir : [Données, cartes et résultats d'inventaire forestier - Gouvernement du Québec](#)). Nous avons toutefois conservé les polygones qui avaient reçu des traitements sylvicoles (perturbations anthropiques), puisque ceux-ci ont généralement un effet faible ou nul sur la hauteur dominante (p. ex., Albaugh *et al.* 2022, Sharma *et al.* 2002). En effet, cette variable est davantage influencée par les caractéristiques intrinsèques

du site et du climat (p. ex., voir Barrette *et al.* 2023 et Weiskittel *et al.* 2011) ainsi que par le niveau d'amélioration génétique des plants (Perron *et al.* 2023).

Nous avons ensuite restreint le choix des polygones aux groupements d'essences (GR_ESS) photo-interprétés qui correspondaient encore à des plantations dans la carte écoforestière à jour (MRNF 2023a). Par conséquent, selon le type de plantation, nous avons conservé uniquement les groupements d'essences présentés dans le tableau 1.

Tableau 1. Groupements d'essences photo-interprétés retenus dans la carte écoforestière mise à jour (MRNF 2023a) et nombre de polygones retenus pour chacun des types de plantations.

Type	Groupements d'essences photo-interprétés retenus	Code d'essence	Nombre de polygones retenus
Plantation monospécifique d'épinette noire	Épinette noire	EN	1 891
Plantation monospécifique d'épinette blanche	Épinette blanche	EB	1 332
Plantation monospécifique d'épinette rouge	Épinette rouge	EU	52

Afin d'obtenir une base de comparaison similaire pour l'EPN et l'EPB, nous avons restreint notre choix des polygones aux sous-domaines bioclimatiques 3 Est (3E), 4 Est (4E) et 4 Ouest (4O), soit les seuls où l'on trouvait des données photo-interprétées pour l'EPR dans la carte écoforestière. De plus, nous avons conservé uniquement les polygones dont la végétation potentielle correspondait aussi à celle des polygones de plantations d'EPR (tableau 2), soit :

- dans le sous-domaine 3E, les polygones sur les végétations potentielles de la bétulaie jaune à sapin et érable à sucre (MJ1), de la bétulaie jaune à sapin (MJ2), de la pessière blanche ou cédrière issue d'agriculture (RB1) et de la sapinière à épinette rouge (RS5);
- dans le sous-domaine 4E, ceux sur les végétations potentielles de la sapinière à bouleau jaune (MS1), de la sapinière à bouleau blanc (MS2), de la sapinière à érable rouge (MS6), de la pessière blanche ou cédrière issue d'agriculture (RB1), de la sapinière à épinette noire (RS2) et de la sapinière à épinette rouge (RS5);
- dans le sous-domaine 4O, ceux sur les végétations potentielles MJ1, MJ2 et RS2.

Tableau 2. Nombre de polygones retenus par essence, par sous-domaine bioclimatique et par végétation potentielle.

Essence*	Sous-domaine bioclimatique†	Végétation potentielle‡	Nombre de polygones retenus
EPB	3E	MJ1	71
		MJ2	40
		RB1	37
		RS5	4
	4E	MS1	892
		MS2	110
		MS6	35
		RB1	65
		RS2	12
		RS5	19
	4O	MJ1	13
		MJ2	28
RS2		6	
EPN	3E	MJ1	27
		MJ2	94
		RB1	1
		RS5	26
	4E	MS1	1 162
		MS2	158
		MS6	40
		RB1	17
		RS2	27
		RS5	88
	4O	MJ1	16
		MJ2	133
RS2		102	
EPR	3E	MJ1	2
		MJ2	1
		RB1	2
		RS5	16
	4E	MS1	9
		MS2	3
		MS6	1
		RB1	1
		RS2	2
		RS5	4
	4O	MJ1	2
		MJ2	6
RS2		3	

* EPN = épinette noire; EPR = épinette rouge.

† Sous-domaines bioclimatiques : 3E = érablière à bouleau jaune de l'Est; 3O = érablière à bouleau jaune de l'Ouest; 4E = sapinière à bouleau jaune de l'Est; 4O = sapinière à bouleau jaune de l'Ouest.

‡ Végétations potentielles : MJ1 = bétulaie jaune à sapin et érable à sucre; MJ2 = bétulaie jaune à sapin; MS1 = sapinière à bouleau jaune; RB1 = pessière blanche ou cédrière issue d'agriculture; RS2 = sapinière à épinette noire; RS5 = sapinière à épinette rouge

Finalement, pour réduire les effets de bordure qui pourraient influencer les résultats lors de l'extraction des données de hauteur du couvert provenant du lidar aéroporté (section 2.2), nous avons exclu une zone tampon de 25 mètres à l'intérieur du contour de chaque polygone retenu.

La figure 1 présente l'ensemble des polygones retenus pour l'analyse comparative de chaque type de plantation dans les sous-domaines bioclimatiques 3E, 4E et 4O.

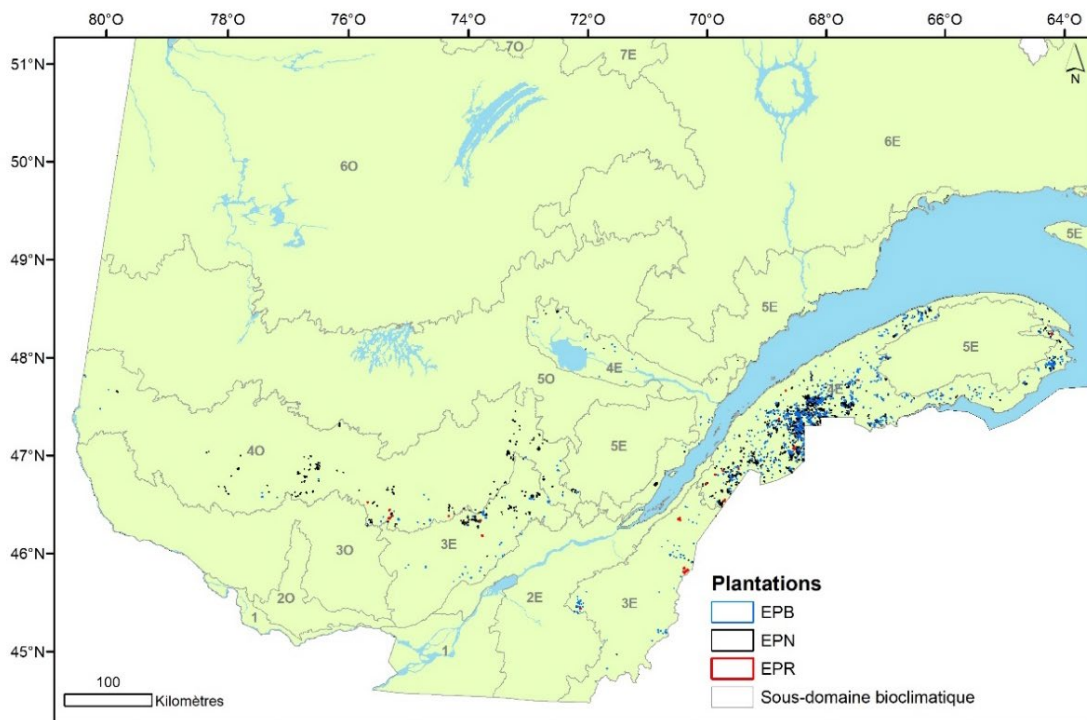


Figure 1. Carte de la répartition des polygones retenus pour l'analyse des données de hauteur du couvert provenant du lidar aéroporté, par type de plantation (EPB = épinette blanche; EPN = épinette noire; EPR = épinette rouge).

2.2. Extraction des données de hauteur du couvert provenant du lidar aéroporté

Pour obtenir une estimation de la hauteur dominante dans les polygones sélectionnés, nous avons utilisé les nuages de points provenant de lidar aéroporté (survolis réalisés de 2009 à 2020 au-dessus des sous-domaines sélectionnés). Ces survols avaient une densité d'échantillonnage moyenne de 2,5 points/m². Plusieurs mesures de hauteur ont été calculées à partir des fichiers de nuages de points (*.laz) disponibles pour les polygones sélectionnés. Dans l'environnement de calcul R (version 4.1.2, R Core Team 2021), nous avons utilisé les bibliothèques *lidR* (Roussel *et al.* 2020, Roussel et Auty 2024) et *sf* (Pebesma 2018, Pebesma et Bivand 2023) pour 1) transformer les coordonnées planimétriques des polygones dans les mêmes systèmes de représentation que ceux des nuages de points, 2) extraire les points lidar correspondant aux polygones retenus, 3) normaliser la hauteur des points et 4) calculer la hauteur du couvert correspondant au 95^e percentile des données lidar ($H_{Lidar95}$).

Nous avons ensuite calculé l'âge de chaque plantation au moment du survol lidar en soustrayant l'année de plantation de l'année du survol. Ainsi, nous avons pu établir une relation entre la hauteur du couvert (lidar) et l'âge pour chacun des types de plantations.

Nous avons choisi de travailler principalement avec la variable $H_{Lidar95}$ après avoir constaté que ces valeurs étaient les plus proches des valeurs de hauteur dominante mesurées sur le terrain (H_{DomT}). En effet, une analyse de similitude entre les valeurs des plus hauts percentiles des données lidar (soit le 95^e, 98^e, 99^e et le 100^e) et les valeurs de H_{DomT} pour un même emplacement géolocalisé a permis de démontrer que le 95^e et le 98^e percentile s'avéraient de bons choix pour représenter H_{DomT} pour les plantations d'EPN et d'EPR des domaines bioclimatiques 3 et 4 (voir l'annexe pour plus de détails). Sachant que l'indice de qualité de station (IQS) en plantation est calculé à partir des 100 plus hautes tiges/ha et qu'une densité initiale d'environ 2 000 tiges/ha a souvent été utilisée pour le reboisement au Québec, le choix du 95^e percentile nous semblait approprié dans le cadre de la présente étude. En effet, les 100 plus hautes tiges d'une plantation établie avec 2 000 tiges/ha correspondent au 5 % supérieur.

Ainsi, nous avons comparé les relations moyennes de $H_{Lidar95}$ en fonction de l'âge des 3 types de plantations, pour les 3 sous-domaines bioclimatiques (3E, 4E et 4O) et les végétations potentielles sélectionnées à l'aide de graphiques générés dans le logiciel R. Ces graphiques ont été produits à partir de la librairie *ggplot2* (Wickham 2016), en ajustant les relations pour chaque essence selon une régression linéaire. De plus, nous avons ajouté une marque à 25 ans afin de faciliter la lecture de $H_{Lidar95}$ à cet âge, laquelle devrait correspondre à l'indice de qualité de station (IQS). Rappelons qu'en plantation, l'IQS est calculé à partir des hauteurs des 100 plus hautes tiges à l'hectare, et qu'il correspond à la hauteur dominante à 25 ans (p. ex.,: Prégent *et al.* 2010).

2.3. Extraction des données d'inventaire sur le terrain

L'analyse des données de $H_{Lidar95}$ montre que la croissance en hauteur de l'EPR semble se rapprocher davantage de celle de l'EPN que de celle de l'EPB. Par conséquent, pour la suite des comparaisons utilisant des données d'inventaire prises sur le terrain, nous avons restreint nos analyses aux plantations monospécifiques d'EPR et d'EPN. Pour celles-ci, nous avons extrait les données de H_{DomT} et d'âge des plantations à partir des données d'inventaire du réseau de placettes de suivi en plantations de la DRF. La variable H_{DomT} a été calculée à partir des 100 plus hautes tiges à l'hectare (soit l'équivalent des 4 plus hautes tiges mesurées dans une parcelle de 400 m²). Comme pour les données lidar, nous avons sélectionné uniquement les placettes d'EPN réparties dans les sous-domaines 3E, 3O, 4E et 4O, c'est-à-dire où l'EPR

était présente (figure 2). De plus, nous avons conservé seulement les placettes d'EPN caractérisées par les mêmes végétations potentielles que celles où se trouvaient des plantations d'EPR, soit :

- dans le sous-domaine 3E, les placettes sur les végétations potentielles MJ1, MJ2 et RS5;
- dans le sous-domaine 3O, celles sur la végétation potentielle MJ1;
- dans le sous-domaine 4E, celles sur la végétation potentielle MS1;
- dans le sous-domaine 4O, celles sur les végétations potentielles MJ1, MJ2 et RS2.

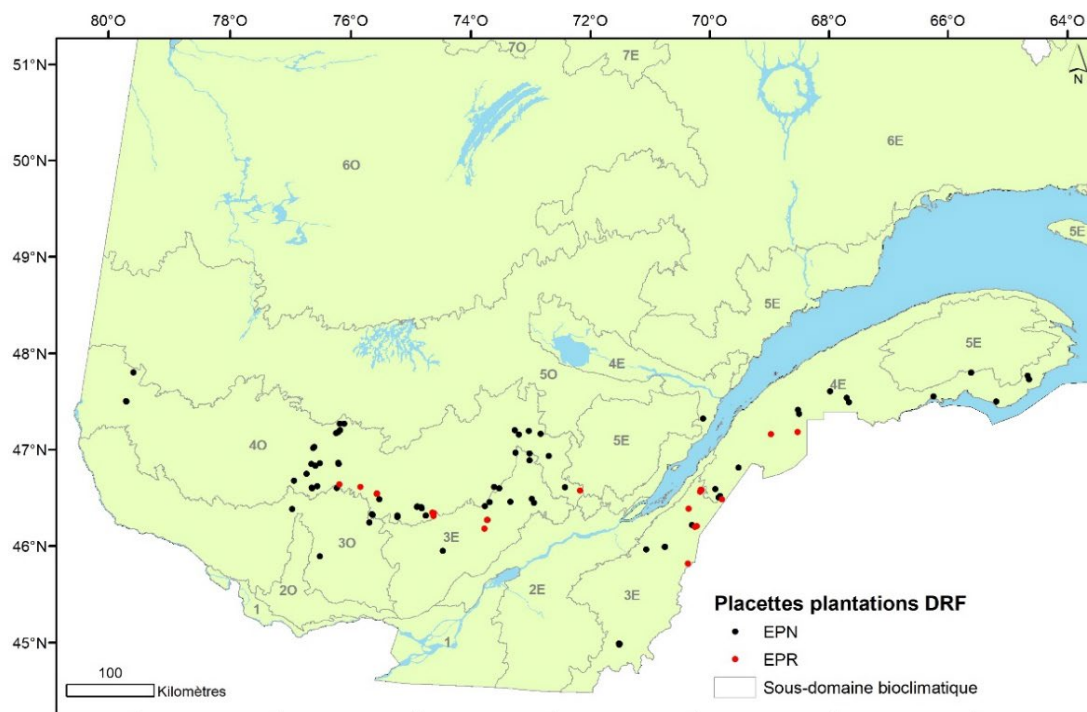


Figure 2. Carte de la répartition des placettes de la Direction de la recherche forestière (DRF) situées dans des plantations monospécifiques d'épinette rouge (EPR; $n = 20$ placettes) et d'épinette noire (EPN; $n = 81$ placettes) et utilisées dans l'analyse comparative.

Au total, nous avons utilisé 81 placettes d'EPN et 20 placettes d'EPR pour cette analyse comparative (tableau 3).

Tableau 3. Nombre de placettes retenues (*n*) pour l'extraction des données d'inventaire prises sur le terrain, par sous-domaine bioclimatique, par végétation potentielle et par essence.

Sous-domaine bioclimatique*	Végétation potentielle†	Nombre de placettes (<i>n</i>)‡	
		EPN	EPR
3E	MJ1	5	2
	MJ2	12	6
	RS5	2	1
3O	MJ1	4	1
4E	MS1	14	3
4O	MJ1	12	3
	MJ2	25	3
	RS2	7	1
Total		81	20

* Sous-domaines bioclimatiques : 3E = érablière à bouleau jaune de l'Est; 3O = érablière à bouleau jaune de l'Ouest; 4E = sapinière à bouleau jaune de l'Est; 4O = sapinière à bouleau jaune de l'Ouest.

† Végétations potentielles : MJ1 = bétulaie jaune à sapin et érable à sucre; MJ2 = bétulaie jaune à sapin; MS1 = sapinière à bouleau jaune; RS2 = sapinière à épinette noire; RS5 = sapinière à épinette rouge.

‡ Essences : EPN = épinette noire; EPR = épinette rouge.

Par la suite, nous avons comparé les relations entre H_{DomT} et l'âge des plantations d'EPR et d'EPN à l'aide de la librairie *ggplot2* du logiciel R et d'une régression LOESS (*locally estimated scatterplot smoothing*). Les essences ont été comparées par sous-domaine bioclimatique, pour les végétations potentielles sélectionnées.

Pour ces mêmes placettes, nous avons aussi examiné la relation entre la hauteur (H_T) et le diamètre à hauteur de poitrine (DHP, mesuré à 1,3 m au-dessus du sol), par essence, pour l'ensemble des arbres étudiés dans les placettes. Encore ici, nous avons comparé ces relations par sous-domaine bioclimatique, pour les végétations potentielles sélectionnées, suivant la même méthode décrite précédemment.

3. Résultats

3.1. Données de hauteur provenant du lidar aéroporté

La valeur de $H_{Lidar95}$ à 25 ans est plus grande dans les plantations monospécifiques d'EPB que dans celles d'EPN, et ce, pour les 3 sous-domaines bioclimatiques (3E, 4E et 4O) et les végétations potentielles sélectionnées pour l'analyse (figure 3). La disponibilité limitée des données lidar pour les plantations monospécifiques d'EPR ne nous a pas permis d'établir une relation claire ni de comparer la croissance de cette essence à celle des deux autres avec un niveau de confiance suffisant (figure 3). Toutefois, les hauteurs atteintes par l'EPR dans le sous-domaine 4E semblent indiquer que la croissance de cette essence se rapprocherait davantage de celle de l'EPN que de celle de l'EPB.

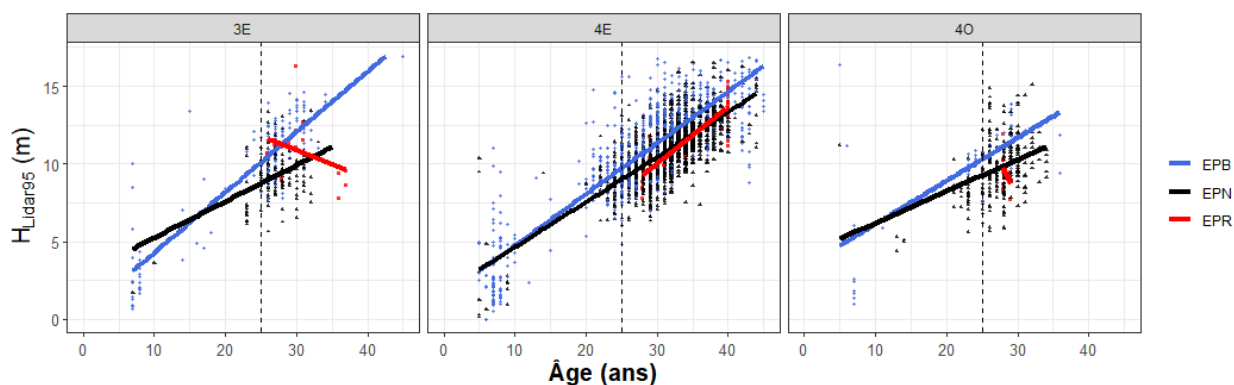


Figure 3. Évolution de la hauteur moyenne du couvert (95^e percentile des données lidar; $H_{Lidar95}$) en fonction de l'âge de la plantation, par sous-domaine bioclimatique, pour les plantations monospécifiques d'épinette blanche (EPB), d'épinette noire (EPN) et d'épinette rouge (EPR) se trouvant sur les mêmes végétations potentielles. Les lignes colorées correspondent aux régressions linéaires ajustées pour chaque essence. Les lignes noires pointillées verticales correspondent à un âge de plantation de 25 ans. Sous-domaines bioclimatiques : 3E = érablière à bouleau jaune de l'Est; 4E = sapinière à bouleau jaune de l'Est; 4O = sapinière à bouleau jaune de l'Ouest.

3.2. Données d'inventaire sur le terrain

Les observations de terrain indiquent elles aussi que l'EPR semble croître comme l'EPN (figures 4 et 5), de sorte que H_{DomT} atteint environ 9,3 m à 25 ans (figure 4). Dans l'ensemble, les croissances en hauteur de l'EPR et de l'EPN par sous-domaine bioclimatique sont très semblables.

Les relations entre la H_T et le DHP, par sous-domaine bioclimatique, sont également très semblables pour l'EPR et l'EPN (figure 5). Il convient de noter que les plantations d'EPR utilisées pour cette comparaison sont encore jeunes (environ 35 ans), de sorte qu'il est difficile de prédire avec certitude comment ces relations continueront d'évoluer. À ce stade-ci, il est clair que la croissance en diamètre de l'EPR présente des similitudes marquées avec celle de l'EPN.

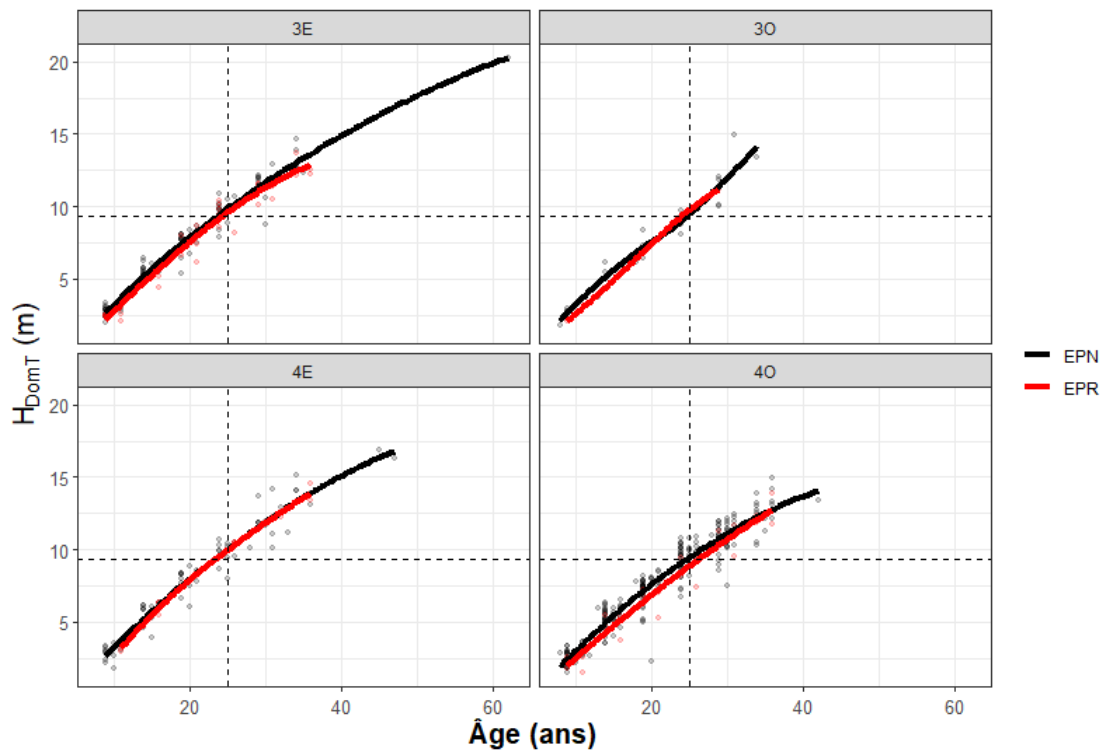


Figure 4. Évolution de la croissance en hauteur dominante mesurée sur le terrain (H_{DomT}) en fonction de l'âge, par sous-domaine bioclimatique, pour les plantations monospécifiques d'épinette rouge (EPR) et d'épinette noire (EPN) suivies par la Direction de la recherche forestière sur les végétations potentielles où l'on trouve les deux essences. Les lignes colorées correspondent à des régressions LOESS (*locally estimated scatterplot smoothing*) par essence. Les lignes noires pointillées correspondent respectivement à un âge de plantation de 25 ans (ligne verticale) et à une H_{DomT} de 9,3 m (ligne horizontale). Sous-domaines bioclimatiques : 3E = érablière à bouleau jaune de l'Est; 3O = érablière à bouleau jaune de l'Ouest; 4E = sapinière à bouleau jaune de l'Est; 4O = sapinière à bouleau jaune de l'Ouest.

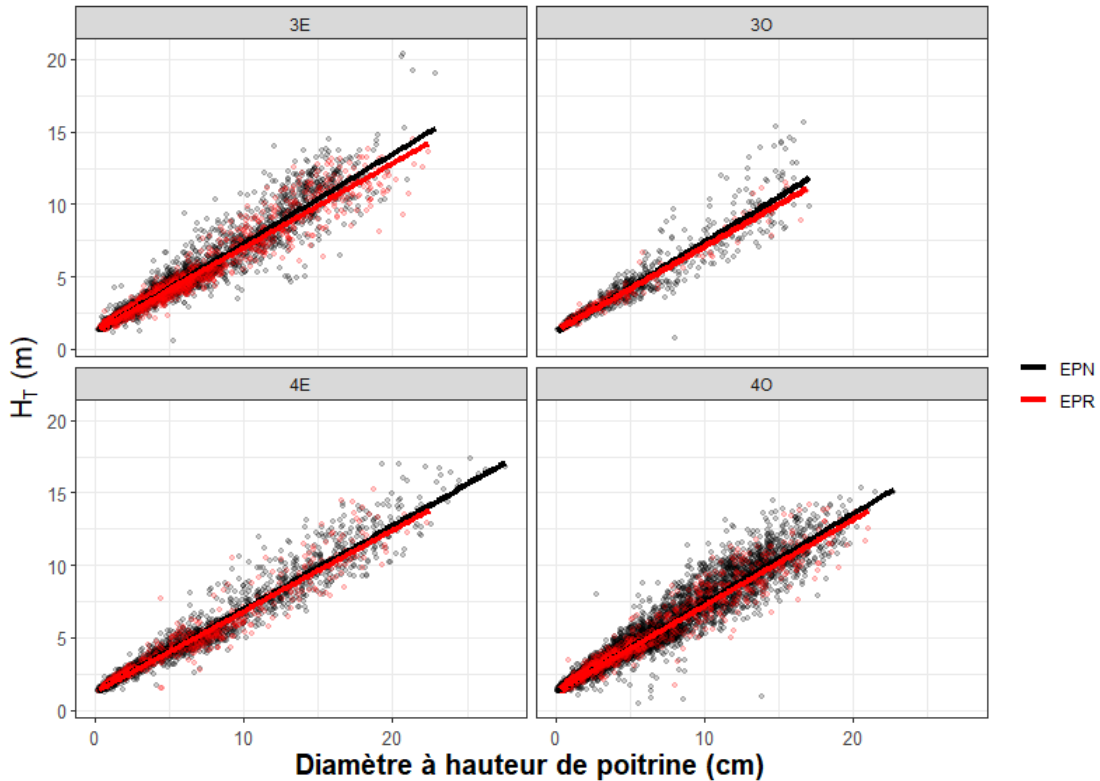


Figure 5. Relations entre la hauteur mesurée sur le terrain (H_T) et le diamètre à hauteur de poitrine des arbres dans les plantations monospécifiques d'épinette rouge (EPR) et d'épinette noire (EPN) suivies par la Direction de la recherche forestière, par sous-domaine bioclimatique, pour les végétations potentielles où l'on trouve les deux essences. Les lignes colorées correspondent à des régressions linéaires ajustées pour chaque essence. Sous-domaines bioclimatiques : 3E = érablière à bouleau jaune de l'Est; 3O = érablière à bouleau jaune de l'Ouest; 4E = sapinière à bouleau jaune de l'Est; 4O = sapinière à bouleau jaune de l'Ouest.

4. Comparaison avec les IQS des tables de rendement

Les valeurs moyennes de $H_{Lidar95}$ à 25 ans sont comparables aux valeurs d'IQS rapportées pour l'EPB par Prigent *et al.* (2010) et pour l'EPN par Auger et Ward (2021).

En effet, dans leur étude, Prigent *et al.* (2010) rapportent des valeurs moyennes d'IQS de 10,44 m (minimum = 8,11 m et maximum = 14,39 m) pour les plantations monospécifiques d'EPB dans le domaine bioclimatique de l'érablière à bouleau jaune et de 10,46 m (minimum = 7,73 m et maximum = 14,22 m) pour celles dans le domaine de la sapinière à bouleau jaune. Avec les données lidar, nous avons obtenu une $H_{Lidar95}$ moyenne d'environ 10 m à 25 ans.

Pour les plantations monospécifiques d'EPN, Auger et Ward (2021) rapportent des valeurs moyennes d'IQS de 9,9 m (minimum = 6,6 m et maximum = 12,3 m) dans le domaine bioclimatique de l'érablière à bouleau jaune et de 9,9 m (minimum = 6,9 m et maximum = 13,1 m) dans celui de la sapinière à bouleau jaune. Avec les données lidar, nous avons obtenu une $H_{Lidar95}$ moyenne d'environ 9 m à 25 ans, ce qui est légèrement inférieur à la valeur observée par Auger et Ward (2021). Cette $H_{Lidar95}$ s'approche toutefois des valeurs de H_{DomT} mesurées dans les placettes d'inventaire des sous-domaines 3E, 3O, 4E et 4O et pour les végétations potentielles sélectionnées. Rappelons que les valeurs moyennes d'IQS rapportées dans Auger et Ward (2021) ont été estimées pour l'ensemble des végétations potentielles présentes dans les sous-domaines d'études, et non seulement pour la sélection des végétations potentielles de la présente analyse.

5. Recommandation

La comparaison des graphiques basés sur les données d'inventaire prises sur le terrain démontre que les relations entre la hauteur dominante et l'âge, tout comme celle entre la hauteur et le DHP, sont similaires pour l'EPN et l'EPR, et que ces deux essences ont une croissance semblable. Ces observations sont cohérentes avec les connaissances en génétique qui ont montré que l'EPR est proche de l'EPN d'un point de vue évolutif.

À la lumière des résultats obtenus à l'aide des données lidar et à partir des données d'inventaire prises sur le terrain, nous recommandons d'utiliser les courbes de croissance actuellement disponibles pour l'EPN (Auger et Ward, 2021) pour simuler l'évolution des plantations d'EPR. Toutefois, nous tenons à souligner que cette recommandation ne vaut que pour les sous-domaines et les végétations potentielles utilisées dans cette étude, et qu'elle ne vise à répondre qu'au besoin actuel.

Remerciements

Nous remercions Jean Noël pour la production des cartes présentées aux figures 1 et 2 ainsi que Véronique Poirier pour l'aide apportée lors de la préparation des données lidar. Nous remercions également les chercheurs et techniciens impliqués dans les inventaires sur le terrain au fil des années.

Références bibliographiques

- Albaugh, T.J., D.R. Carter, R.L. Cook, O.C. Campoe, R.A. Rubilar et J.L. Creighton, 2022. *Improving Pinus taeda site index from rotation to rotation with silvicultural treatments*. For. Ecol. Manage. 526 : 120581. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120581>
- 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 et J.-D. Sylvain, 2023. *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 Ressources naturelles et des Forêts, Direction de la recherche forestière. Avis technique SSRF-30. 21 p. https://mffp.gouv.qc.ca/documents/forets/recherche/AT_SSRF-30.pdf
- Burns, R.M., et B.H. Honkala, 1990. *Silvics of North America. Volume 1: Conifers. Volume 2: Hardwoods*. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Washington, DC (États-Unis). Agriculture Handbook No. 654. 877 p. https://www.srs.fs.usda.gov/pubs/misc/ag_654/volume_1/picea/rubens.htm
- Dumais, D., M. Prévost et P. Raymond, 2007. *L'épinette rouge, une espèce à bien connaître... pour une sylviculture mieux adaptée!* Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Direction de la recherche forestière. Avis de recherche forestière n° 9. 2 p. <https://mffp.gouv.qc.ca/documents/forets/connaissances/recherche/Avis09.pdf>
- Gupta, H.V., H. Kling, K.K. Yilmaz, et G.F. Martinez, 2009. *Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling*. J. Hydrol. 377(1-2): 80–91. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.003>
- Morgenstern, E.K., A.G. Corriveau et D.P. Fowler, 1981. *A provenance test of red spruce in nine environments in eastern Canada*. Can. J. For. Res. 11: 124-131. <https://doi.org/10.1139/x81-017>
- [MRNF] Ministère des Ressources naturelles et des Forêts, 2023a. *Carte écoforestière à jour*. Jeu de données dans Données Québec (2017), mise à jour du 29 août 2023. <https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/carte-ecoforestiere-avec-perturbations>
- [MRNF] Ministère des Ressources naturelles et des Forêts, 2023b. *Récolte et autres interventions sylvicoles*. Jeu de données dans Données Québec (2017), mise à jour du 25 août 2023. <https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/recolte-et-reboisement>
- Pebesma, E., 2018. *Simple features for R: Standardized support for spatial vector data*. The R Journal 10(1) : 439-446. <https://doi.org/10.32614/RJ-2018-009>
- Pebesma, E. et R. Bivand, 2023. *Spatial data science: With applications in R*. Chapman and Hall/CRC Press. 314 p. <https://doi.org/10.1201/9780429459016>
- Perron, M., D.J. Perry, C. Andalo et J. Bousquet, 2000. *Evidence from sequence-tagged-site markers of a recent progenitor-derivative species pair in conifers*. PNAS 97(21) 11331-11336. <https://doi.org/10.1073/pnas.200417097>

- Perron, M., J. Barrette, I. Auger et J. DeBlois, 2023. *Intégration du gain génétique des arbres améliorés dans les courbes de rendement en plantation : prudence et patience*. MRNF. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles et des Forêts, Direction de la recherche forestière. Avis technique SGEF-29. https://mffp.gouv.qc.ca/documents/forets/recherche/AT_SGEF-29.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/documents/forets/connaissances/recherche/Memoire160.pdf>
- Prégent, G., G. Picher et I. Auger, 2016. *Tarif de cubage, tables de rendement et modèles de croissance pour les plantations d'épinette de Norvège au Québec*. Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de la recherche forestière. Mémoire de recherche forestière n° 176. 95 p.
<https://mffp.gouv.qc.ca/documents/forets/connaissances/recherche/Memoire176.pdf>
- R Core Team, 2021. *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Version 4.1.2. <https://www.R-project.org>
- Roussel, J.R., D. Auty, N.C. Coops, P. Tompalski, T.R.H. Goodbody, A. Sánchez Meador, J.F. Bourdon, F. De Boissieu et A. Achim, 2020. *lidR: An R package for analysis of Airborne Laser Scanning (ALS) data*. Remote Sens. Environ. 251: 112061. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112061>
- Roussel, J.R. et D. Auty, 2024. *Airborne LiDAR data manipulation and visualization for forestry applications*. R package version 4.0.4. <https://rdocumentation.org/packages/lidR/versions/4.0.4>
- Sharma, M., R.L. Amateis et H.E. Burkhart, 2002. *Top height definition and its effects on site index determination in thinned and unthinned loblolly pine plantations*. For. Ecol. Manage. 168: 163-175.
[https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(01\)00737-X](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(01)00737-X)
- Weiskittel, A.R., N. L. Crookston et P.J. Radtke, 2011. *Linking climate, gross primary productivity, and site index across forests of the western United States*. Can. J. For. Res. 41:1710-1721.
<https://doi.org/10.1139/g11-x11-086>

Wickham, H., 2016. *ggplot2: Elegant graphics for data analysis*. Second edition. Springer-Verlag, New York, NY (États-Unis). 260 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-24277-4>

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

Service de la sylviculture et du rendement des forêts

Guillaume Drolet, ing.f., M. Sc.

Service de la sylviculture et du rendement des forêts

Isabelle Auger, stat. ASSQ, M. Sc.

Service du soutien scientifique

Martin Perron, biologiste, Ph. D.

Service de la génétique et de l'écologie forestière

Correspondance :

Julie Barrette

Ministère des Ressources naturelles et des Forêts

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@mrnf.gouv.qc.ca

On peut citer ce texte en indiquant la référence. Citation recommandée :

Barrette, J., G. Drolet, I. Auger et M. Perron, 2024. *Quelle courbe de rendement devrait-on utiliser pour simuler l'évolution des plantations monospécifiques d'épinette rouge?* Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles et des Forêts, Direction de la recherche forestière. Avis technique SSRF-35. 19 p.

Annexe. Analyse de similitude entre les plus hauts percentiles de hauteur lidar et les hauteurs dominantes mesurées sur le terrain

Afin de déterminer le percentile le plus approprié pour représenter la hauteur dominante des plantations d'épinette noire et des plantations d'épinette rouge, nous avons conduit, pour une même géolocalisation, une analyse de similitude entre les valeurs de H_{DomT} et les valeurs des plus hauts percentiles (95^e, 98^e, 99^e et 100^e) extraits des données lidar (H_{Lidar}). Cette analyse a été réalisée en calculant la mesure de qualité d'ajustement Kling-Gupta (KGE; Gupta *et al.* 2009; équation 1) qui se décompose en 3 parties : la corrélation linéaire (r) entre les valeurs observées (mesures sur le terrain) et estimées (mesures au lidar); 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.

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

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

et où $cov_{obs,est}$ est la covariance entre les valeurs observées (terrain) et estimées (lidar), σ est l'écart type et \bar{y} est la moyenne.

Les valeurs estimées dans l'analyse de similitude sont représentées par les divers percentiles de H_{Lidar} . Ces valeurs ont été obtenues à partir des nuages de points normalisés pour chacune des coordonnées spatiales des placettes utilisées dans cette étude (figure 2). Nous avons extrait les nuages de points en simulant un rayon de 11,28 m autour du centre de chacune des placettes, de manière à couvrir une superficie de 400 m² comme lors des inventaires forestiers. Pour cette opération, nous avons utilisé les mêmes librairies dans l'environnement de calcul R (version 4.1.2, R Core Team 2021) que celles mentionnées au point 2.2.

Par la suite, nous avons ajusté la valeur de la hauteur dominante (H_{DomT}) calculée pour chacune des placettes, pour ramener celle-ci au même nombre d'années de croissance qu'au moment du relevé (passage lidar). Pour ce faire, nous avons calculé l'accroissement annuel de la hauteur dominante (soit la moyenne de H_{DomT} divisée par l'âge de la plantation) et nous avons ajusté cette valeur en ajoutant ou soustrayant l'accroissement annuel calculé pour le nombre d'années de différence (entre le passage lidar

et le mesurage sur le terrain). Ceci nous a permis d'obtenir la hauteur dominante ajustée « terrain » : H_{DomAT} . Pour chacune des placettes, nous avons conservé la valeur de H_{DomAT} correspondant à l'année du mesurage sur le terrain la plus proche de l'année du passage lidar. Cette valeur correspond à la valeur observée de l'analyse de similitude.

De plus, afin d'améliorer notre compréhension des écarts (ou des différences) entre H_{DomAT} et H_{Lidar} , nous avons calculé la proportion de surface terrière occupée par les feuillus dans chacune des placettes retenues dans le cadre de cette étude, à partir des relevés d'inventaire réalisés sur le terrain par la DRF. Ceci nous a permis de constater que la différence entre les deux types de valeurs s'accroissait lorsque cette proportion augmentait (figure A1). Par conséquent, nous avons retranché les placettes dont la proportion de feuillus aurait pu influencer les valeurs des plus hauts percentiles extraits au lidar (et donc, les résultats de l'analyse de similitude). Nous avons choisi de conserver uniquement les placettes dont la proportion de surface terrière occupée par les feuillus était tout près de zéro (<1 %). Nous avons aussi retiré les placettes pour lesquelles l'écart entre le passage lidar et le mesurage sur le terrain dépassait 5 ans. Ceci a réduit notre jeu de données à 44 placettes.

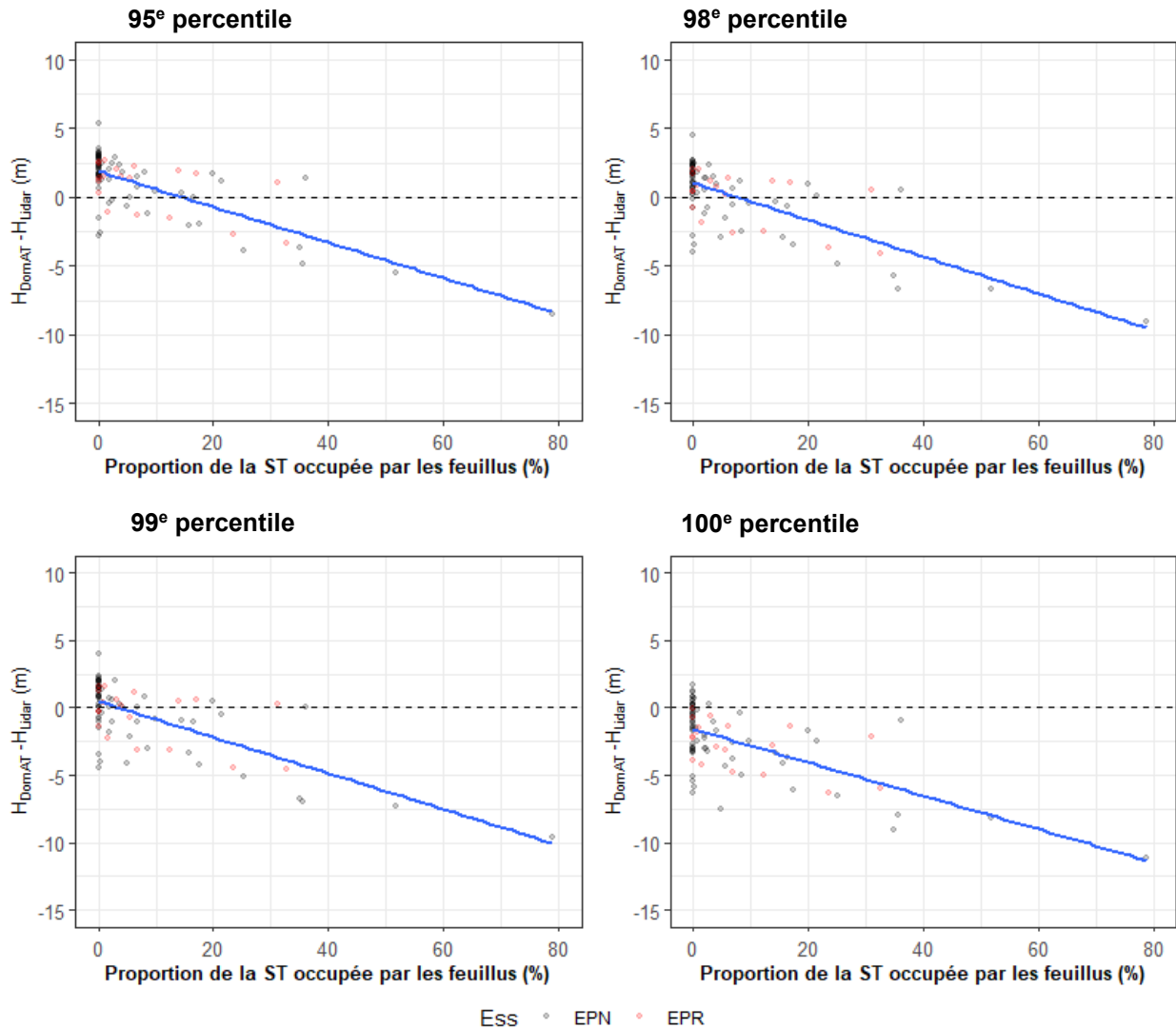


Figure A1. Différence en mètres entre la hauteur dominante ajustée (mesure sur le terrain : H_{DomAT}) et la hauteur lidar (H_{Lidar}) des plus hauts percentiles en fonction de la proportion de surface terrière (ST) occupée par les feuillus (%), par essence (ESS : EPN = épinette noire, cercles noirs; EPR = épinette rouge, cercles rouges). La ligne bleue correspond à une régression linéaire ajustée pour les deux essences.

Finalement, avant de conduire l'analyse de similitude, nous avons vérifié l'influence de la densité de points lidar sur la mesure de différence entre la valeur ajustée de H_{DomAT} et les valeurs de H_{Lidar} des plus grands percentiles. Cette vérification nous a permis de constater que la densité de points n'influençait pas la différence (résultat non présenté).

L'analyse de similitude a donc été réalisée sur un total de 44 placettes. Les résultats de l'analyse sont présentés à la figure A2 avec les valeurs des 3 composantes de la mesure de qualité d'ajustement KGE. Dans l'ensemble, on constate que les valeurs de H_{Lidar} des 95^e, 98^e et 99^e percentiles sont plus près des valeurs de H_{DomAT} . Les paramètres d'ajustement KGE sont légèrement meilleurs (plus près de 1) pour le 95^e percentile, mais ils sont aussi très proches de ceux calculés pour le 98^e percentile. Les valeurs de H_{Lidar} du 99^e percentile sont moins biaisées par rapport à la moyenne (β), mais leur dispersion autour de la droite 1:1 est plus grande, ce qui réduit la valeur du KGE. Par conséquent, les valeurs de H_{Lidar} des 95^e et 98^e percentiles semblent être des choix appropriés pour représenter la hauteur dominante des plantations d'épinette noire et d'épinette rouge retenues dans le cadre de cette étude.

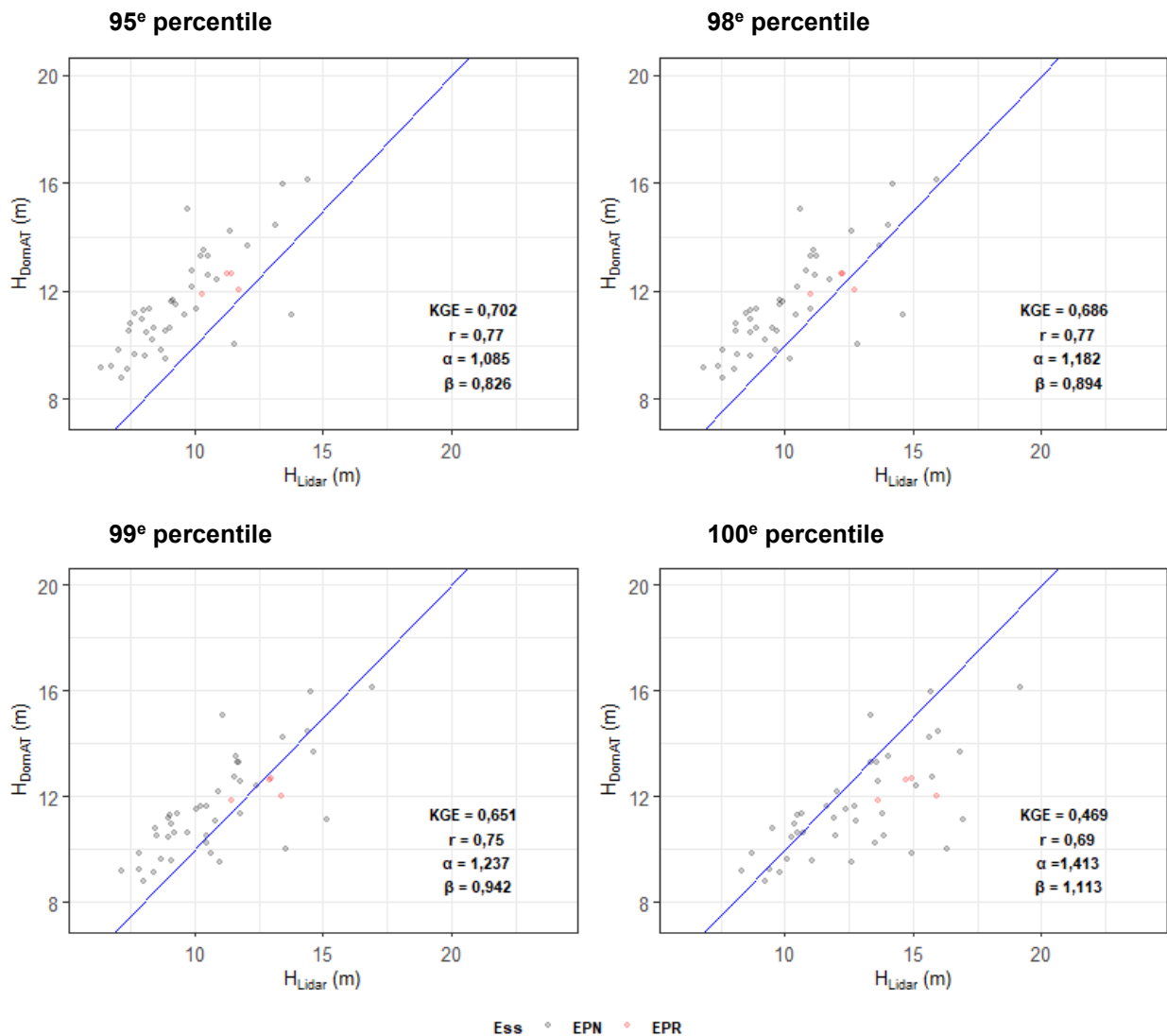


Figure A2. Analyse de similitude entre la hauteur dominante ajustée (mesures sur le terrain : H_{DomAT}) et la hauteur (mesures lidar : H_{Lidar}) des plus hauts percentiles. La ligne bleue correspond à la droite 1 : 1.