

Une nouvelle relation hauteur-diamètre tenant compte de l'influence de la station et du climat pour 27 essences commerciales du Québec

Isabelle Auger

Résumé

Les modèles de croissance forestière utilisés dans la planification de l'aménagement forestier s'appuient sur des estimations de la hauteur des arbres obtenues à partir d'une relation hauteur-diamètre (HD) généralisée applicable pour des arbres d'âges et de grandeurs variés. Dans ce contexte, Fortin et al. (2009b) ont étalonné une seule relation HD qui utilise l'essence comme variable explicative en plus de tenir compte des caractéristiques de la station et du climat pour 20 essences commerciales du Québec. Toutefois, les paramètres associés à ces variables ne dépendent pas tous de l'essence, entraînant des incohérences dans la prévision de la hauteur de certaines essences. Nous avons mis au point une nouvelle relation HD étalonnée par essence, testé de nouvelles variables explicatives et modélisé de nouvelles espèces afin d'améliorer la fiabilité des prévisions de hauteur. Pour ce faire, nous avons utilisé un modèle linéaire mixte, inspiré du modèle de 2009. Le rapport du diamètre à hauteur de poitrine (DHP) sur le DHP moyen quadratique des arbres de la placette est une variable explicative importante pour la majorité des essences, et c'est l'indice de rang social de l'arbre le mieux corrélé à la hauteur. L'intégration du sous-domaine bioclimatique permet de mieux prendre en compte les disparités régionales que les 4 regroupements de régions écologiques précédemment utilisés. La végétation potentielle a été retenue pour 15 essences. Ce nouveau modèle produit des prévisions légèrement plus précises, mais surtout, certains biais reliés à l'essence ont diminué. Cette nouvelle relation HD servira à estimer la hauteur des arbres dans les modèles de croissance forestière Artémis-2014, Natura-2014 et SaMARE et elle devrait être utilisée pour estimer la hauteur des arbres dans le prochain calcul de possibilité forestière.

Mots-clés : indice de rang social, modèle hauteur-diamètre généralisé, modèle linéaire mixte, peuplements complexes, relation hauteur-diamètre

Abstract

Forest growth models that are used in forest management planning rely on tree height estimations obtained from a generalized height-diameter (HD) relationship that is applicable to trees of various ages and sizes. In this context, Fortin et al. (2009b) calibrated a single HD relationship for 20 of Quebec's commercial tree species, which uses tree species as an independent variable and takes into account both station characteristics and climate. However, since all the parameters associated with these variables were not related to tree species, the model's height predictions were sometimes incoherent. This study aimed to develop a new HD relationship calibrated by species, to test new independent variables and to model new species, in order to obtain more reliable height predictions. We did this using a mixed linear model inspired from that of 2009. The ratio of diameter at breast height (DBH) over the quadratic mean DBH of trees in a given plot was an important independent variable for most species; among social rank indexes, it correlated best with height. The inclusion of bioclimatic subdomain allows to better account for regional disparities than the previous 4 groups of ecological regions. Potential vegetation was retained in the new model for 15 species. This new model provides slightly more precise predictions, but more importantly, certain biases related to species are reduced. The new HD relationship will be used to estimate tree height in the Artémis-2014, Natura-2014 and SaMARE forest growth models, and should be used to estimate tree height in the forthcoming allowable cut calculations.

Keywords: complex stands, generalized height-diameter model, linear mixed model, height-diameter relationship, social rank index

Correspondance : isabelle.auger@mffp.gouv.qc.ca



Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs
Direction de la recherche forestière
2700, rue Einstein
Québec (Québec) G1P 3W8
Téléphone : 418 643-7994
Télécopieur : 418 643-2165
Courriel : recherche.forestiere@mffp.gouv.qc.ca
Site Internet : www.mffp.gouv.qc.ca

1. Introduction

La hauteur d'un arbre est une caractéristique dendrométrique importante en foresterie, car elle permet, entre autres, d'estimer le volume d'un arbre. Toutefois, dans la majorité des inventaires forestiers, la hauteur n'est généralement mesurée que sur un sous-échantillon d'arbres. Une relation hauteur-diamètre (HD) dite « locale » est ensuite mise au point à partir de ce sous-échantillon pour estimer la hauteur de tous les arbres. Lorsque des estimations sont nécessaires à une échelle plus vaste, comme celle de la province, l'utilisation d'une seule relation HD généralisée (au sens qu'entendent Mehtätalo *et al.* 2015 et Temesgen et von Gadow 2004) est moins longue et moins coûteuse, car elle permet d'estimer la hauteur des arbres d'âges, d'essences et de grandeurs variés, sans avoir à établir une relation HD pour chaque peuplement (Temesgen *et al.* 2014, Weiskittel *et al.* 2011). Les relations HD généralisées sont essentielles pour estimer les volumes de bois sur pied, de même que dans les modèles de croissance forestière utilisés dans la planification de l'aménagement forestier et qui fonctionnent à partir d'inventaires forestiers. Dans ce contexte, Fortin *et al.* (2009b) ont mis au point une relation HD tenant compte de l'influence de la station et du climat pour 20 essences commerciales du Québec. Cette relation HD a servi à estimer la hauteur des arbres dans les simulateurs de croissance forestière Artémis-2009 (Fortin et Langevin 2010), Natura-2009 (Pothier et Auger 2011) et Matapedia (Fortin *et al.* 2014), 3 modèles mis au point par la Direction de la recherche forestière du ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP).

Fortin *et al.* (2009b) ont paramétré une seule relation HD pour 20 essences en utilisant l'essence comme variable explicative, en plus de variables telles que la surface terrière marchande dans la placette, le rang social de l'arbre, la température annuelle moyenne, la classe de drainage, la région écologique et l'occurrence d'une perturbation légère. Toutefois, le fait que les paramètres associés à ces variables ne dépendent pas tous de l'essence a entraîné des incohérences dans la prévision de la hauteur de certaines d'entre elles. Par exemple, la classe de drainage engendre le même effet sur la prévision de la hauteur pour toutes les essences, alors que celles-ci ont des tolérances différentes au drainage du sol (MRN 2013). La relation HD de Fortin *et al.* (2009b) a été étalonnée à partir des données des 3 premiers inventaires écoforestiers des placettes-échantillons permanentes (PEP) de la Direction des inventaires

forestiers (DIF) du MFFP. La disponibilité récente des données du 4^e inventaire permet d'augmenter la taille de la base de données et de vérifier si de nouvelles essences peuvent être modélisées. Ainsi, il serait possible de diminuer le nombre d'essences pour lesquelles on doit utiliser la relation HD d'une autre essence pour estimer leur hauteur dans les modèles de croissance.

L'objectif de cette étude était de mettre au point une nouvelle relation HD étalonnée par essence, inspirée de la relation de Fortin *et al.* (2009b). Nous avons testé de nouvelles variables explicatives et modélisé de nouvelles essences lorsque la taille d'échantillon le permettait, afin d'améliorer la fiabilité des prévisions de hauteur. Les prévisions obtenues avec le nouveau modèle ont été comparées à celles du modèle de Fortin *et al.* (2009b). Cette nouvelle relation HD servira à estimer la hauteur des arbres dans les modèles de croissance forestière Artémis-2014 (Power 2016), Natura-2014 (Auger, soumis) et SaMARE (Fortin *et al.* 2009a).

2. Matériel et méthodes

2.1. Données

Nous avons ajouté les données des placettes-échantillons permanentes et temporaires du quatrième inventaire écoforestier de la DIF du MFFP à la base de données utilisée dans Fortin *et al.* (2009b). Cet ajout de 106 850 observations d'études d'arbres aux 144 262 déjà présentes dans leur base de données porte le total à 251 112 observations. Ces arbres études constituent un sous-échantillon d'arbres sélectionnés selon un plan d'échantillonnage systématique parmi les arbres des placettes. Le lecteur peut se référer à Fortin *et al.* (2009b) pour une présentation détaillée des informations disponibles dans le réseau des PEP et sur la sélection des observations.

Fortin *et al.* (2009b) n'avaient retenu que les essences pour lesquelles ils disposaient d'un minimum de 500 observations. L'ajout des nouvelles données dans l'étalonnage du modèle de 2016 a permis de tenir compte d'une nouvelle essence, soit le peuplier baumier (*Populus balsamifera* L.), pour laquelle le nombre d'observations dépasse maintenant le seuil de 500. Avec le modèle de 2009, la hauteur des arbres pour les essences sans relation HD devait être estimée en empruntant les paramètres d'une autre essence dans les modèles de croissance

tels Artémis, Natura ou SaMARE, ce qui, après vérification, engendrait des biais non négligeables. Nous avons donc assoupli la règle demandant au moins 500 observations par essence et établi le minimum nécessaire pour obtenir des estimations de paramètres stables à 100 observations. D'autres études ont déjà établi des relations HD avec moins de 500 observations. Par exemple, Temesgen et von Gadow. (2004) et Temesgen *et al.* (2014) ont utilisé un seuil de 30 observations, et Temesgen *et al.* (2007) ont utilisé un seuil de 100 observations. Une essence était représentée par 28 observations dans l'étude de Staudhammer et LeMay (2000), et une autre, par 102 observations dans l'étude de Huang *et al.* (1992). Cet abaissement de seuil a permis d'inclure 6 nouvelles essences dans l'analyse,

pour lesquelles de 145 à 459 observations étaient disponibles : le frêne d'Amérique (*Fraxinus americana* L.), le pin rouge (*Pinus resinosa* Ait.), le bouleau gris (*Betula populifolia* Marsh.), l'orme d'Amérique (*Ulmus americana* L.), le cerisier tardif (*Prunus serotina* Ehrh.) et l'érable argenté (*Acer saccharinum* L.).

Les données provenant des PEP impliquent des mesures répétées. Plus spécifiquement, la base de données contenait 167 424 arbres qui provenaient de l'inventaire de 80 976 placettes et avaient été mesurés de 1 à 6 fois. Le tableau 1 présente la moyenne et l'étendue des hauteurs et des diamètres à hauteur de poitrine (DHP, mesuré à une hauteur de 1,3 m) pour chaque essence du jeu de données, et le tableau 2 présente les caractéristiques des placettes.

Tableau 1. Moyenne (étendue entre parenthèses) des caractéristiques des arbres des 27 essences du jeu de données (RDHP : rapport entre le DHP de l'arbre et le DHP moyen quadratique des arbres la placette).

Code de l'essence*	Nom vernaculaire	Nom latin	Nombre d'observations	Hauteur (m)	DHP (cm)	RDHP
BOG	Bouleau gris	<i>Betula populifolia</i> Marsh.	387	12,4 (5,8–19,1)	12,5 (9,1–28,2)	0,89 (0,41–1,79)
BOJ	Bouleau jaune	<i>Betula alleghaniensis</i> Britt.	11 723	15,7 (5,0–30,8)	24,6 (9,1–87,5)	1,09 (0,26–3,51)
BOP	Bouleau à papier	<i>Betula papyrifera</i> Marsh.	25 235	13,6 (4,2–30,5)	16,8 (9,1–68,5)	0,96 (0,26–3,74)
CET	Cerisier tardif	<i>Prunus serotina</i> Ehrh.	311	14,7 (7,6–25,6)	17,3 (9,1–49,7)	1,01 (0,33–2,27)
CHR	Chêne rouge	<i>Quercus rubra</i> L.	1 271	15,8 (5,2–30,8)	23,4 (9,1–68,7)	1,18 (0,29–2,60)
EPB	Épinette blanche	<i>Picea glauca</i> (Moench) Voss	12 425	13,2 (3,7–32,5)	20,4 (9,1–73,8)	1,07 (0,21–3,03)
EPN	Épinette noire	<i>Picea mariana</i> (Mill.) B.S.P.	56 340	11,7 (3,7–27,1)	14,4 (9,1–48,2)	1,00 (0,29–2,97)
EPR	Épinette rouge	<i>Picea rubens</i> Sarg.	2 908	13,2 (3,6–31,3)	18,4 (9,1–60,1)	1,02 (0,26–2,64)
ERA	Érable argenté	<i>Acer saccharinum</i> L.	145	18,2 (6,8–37,3)	22,1 (9,1–67,5)	0,98 (0,26–2,97)
ERR	Érable rouge	<i>Acer rubrum</i> L.	14 626	14,9 (4,3–29,9)	17,5 (9,1–71,0)	0,94 (0,22–3,36)
ERS	Érable à sucre	<i>Acer saccharum</i> Marsh.	20 966	16,9 (5,4–36,8)	21,8 (9,1–81,4)	0,95 (0,21–3,57)
FRA	Frêne d'Amérique	<i>Fraxinus americana</i> L.	459	17,3 (7,0–30,1)	20,2 (9,1–56,9)	1,05 (0,31–2,64)
FRN	Frêne noir	<i>Fraxinus nigra</i> Marsh.	1 601	15,3 (4,6–30,3)	17,7 (9,1–57,5)	0,89 (0,31–2,40)
HEG	Hêtre à grandes feuilles	<i>Fagus grandifolia</i> Ehrh.	3 859	16,4 (5,7–31,6)	20,8 (9,1–79,7)	0,90 (0,20–2,83)
MEL	Mélèze laricin	<i>Larix laricina</i> (Du Roi) K. Koch	1 301	13,7 (3,8–31,1)	16,3 (9,1–51,6)	1,12 (0,38–2,54)
ORA	Orme d'Amérique	<i>Ulmus americana</i> L.	331	13,4 (5,8–27,7)	16,1 (9,1–60,4)	0,88 (0,27–2,74)
OSV	Ostryer de Virginie	<i>Ostrya virginiana</i> (Mill.) K. Koch	909	13,4 (5,5–22,3)	13,5 (9,1–35,6)	0,69 (0,27–1,60)
PEB	Peuplier baumier	<i>Populus balsamifera</i> L.	733	15,9 (6,5–34,9)	19,3 (9,1–68,2)	1,03 (0,22–2,84)
PEG	Peuplier à grandes dents	<i>Populus grandidentata</i> Michx	1 434	18,7 (6,7–34,8)	22,2 (9,1–63,1)	1,19 (0,34–3,39)
PET	Peuplier faux-tremble	<i>Populus tremuloides</i> Michx	11 838	16,3 (4,0–32,9)	19,2 (9,1–65,8)	1,12 (0,30–3,86)
PIB	Pin blanc	<i>Pinus strobus</i> L.	1 960	16,9 (4,3–36,2)	27,1 (9,1–103)	1,27 (0,29–4,26)
PIG	Pin gris	<i>Pinus banksiana</i> Lamb	9 349	13,3 (3,7–29,3)	16,0 (9,1–52,6)	1,08 (0,39–3,10)
PIR	Pin rouge	<i>Pinus resinosa</i> Ait.	396	17,5 (4,8–32,8)	26,5 (9,2–62,8)	1,23 (0,41–3,01)
PRU	Pruche du Canada	<i>Tsuga canadensis</i> (L.) Carr.	1 879	13,8 (4,5–31,1)	23,7 (9,1–76,0)	1,03 (0,25–2,93)
SAB	Sapin baumier	<i>Abies balsamea</i> (L.) Mill.	61 296	11,6 (2,7–29,8)	15,0 (9,1–49,3)	0,88 (0,21–2,80)
THO	Thuya occidental	<i>Thuja occidentalis</i> L.	6 648	10,9 (3,4–22,9)	19,6 (9,1–81,4)	0,98 (0,24–3,52)
TIL	Tilleul d'Amérique	<i>Tilia americana</i> L.	782	17,9 (5,3–33,8)	22,6 (9,1–55,2)	1,06 (0,21–2,82)

* Les essences qui n'avaient pas été modélisées par Fortin *et al.* (2009b) apparaissent en caractères gras.

Tableau 2. Moyenne (étendue entre parenthèses) des caractéristiques des placettes pour les 27 essences du jeu de données. Les codes des essences sont définis au tableau 1.

Code de l'essence*	Nombre de mesures/nombre de placettes	Surface terrière marchande (m ² /ha)	Altitude (m)	Température annuelle moyenne (°C)	Précipitations totales annuelles (mm)
BOG	276/205	13,6 (0,2–49,9)	163 (10–520)	5,2 (0,7–7,0)	1 098 (936–1 467)
BOJ	8 548/5 829	21,8 (0,4–75,3)	364 (10–780)	2,8 (0,5–7,3)	1 046 (770–1 524)
BOP	16 773/11 810	20,1 (0,2–74,6)	385 (10–1 030)	2,1 (–3,5–6,9)	1 024 (768–1 551)
CET	247/181	17,7 (0,5–40,5)	248 (10–530)	4,7 (1,8–7,2)	1 095 (785–1 488)
CHR	857/515	21,7 (0,7–58,5)	270 (20–440)	4,1 (2,3–6,8)	984 (680–1 251)
EPB	9 975/7 068	22,4 (0,2–93,9)	358 (10–1 000)	2,3 (–3,8–6,5)	1 036 (709–1 552)
EPN	26 514/18 393	17,6 (0,2–92,5)	376 (10–1 080)	1,1 (–4,3–6,9)	960 (724–1 553)
EPR	22 791/16 74	23,8 (0,5–76,9)	369 (20–820)	2,8 (–0,6–6,5)	1 082 (846–1 497)
ERA	57/30	22,9 (1,2–51,3)	92 (10–500)	5,8 (1,7–7,2)	971 (784–1 295)
ERR	10 306/7 064	21,4 (0,2–60,7)	308 (10–730)	3,3 (0,1–7,2)	1 037 (675–1 524)
ERS	11 184/7 237	22,4 (0,2–69,4)	346 (10–750)	3,2 (0,7–7,3)	1 047 (748–1 479)
FRA	370/228	20,2 (1,1–53,6)	233 (40–550)	5,0 (1,9–7,1)	1 098 (790–1 479)
FRN	1 151/766	20,6 (0,2–74,9)	275 (10–560)	3,7 (1,0–7,1)	1 017 (765–1 394)
HEG	2 530/1 515	22,6 (0,8–57,8)	326 (20–670)	3,7 (1,6–7,2)	1 052 (825–1 524)
MEL	993/710	14,9 (0,2–67,7)	294 (10–823)	2,0 (–3,8–6,9)	974 (773–1 354)
ORA	273/201	18,6 (1,1–47,7)	190 (10–560)	5,1 (2,6–7,2)	1 028 (721–1 312)
OSV	728/447	21,1 (0,2–52,5)	255 (20–500)	4,4 (2,0–7,3)	1 020 (791–1 452)
PEB	499/381	23,0 (0,4–71,9)	246 (10–560)	3,0 (–0,3–7,3)	1 005 (773–1 378)
PEG	987/590	22,9 (0,5–59,9)	255 (20–570)	4,0 (1,2–7,2)	1 008 (773–1 354)
PET	7 678/5 439	20,2 (0,2–75,0)	313 (10–850)	2,3 (–2,6–7,2)	982 (748–1 532)
PIB	1 374/869	23,5 (0,5–74,6)	264 (10–520)	3,8 (1,2–7,1)	966 (680–1 227)
PIG	4 594/3 140	17,4 (0,2–54,3)	347 (20–590)	1,1 (–3,1–6,1)	921 (765–1 249)
PIR	306/230	28,4 (1,4–64,7)	251 (20–510)	3,9 (1,4–6,9)	973 (790–1 311)
PRU	1 197/748	28,8 (0,9–64,2)	236 (20–520)	4,6 (2,5–7,2)	1 047 (790–1 524)
SAB	36 675/26 948	22,0 (0,2–122)	380 (10–1 090)	2,1 (–4,1–7,0)	1 032 (713–1 552)
THO	4 220/2 840	29,2 (0,2–127)	296 (10–590)	3,1 (–0,3–7,2)	1 032 (713–1 393)
TIL	645/366	23,7 (0,9–60,5)	230 (10–450)	4,5 (2,6–7,1)	1 013 (773–1 330)

* Les essences qui n'avaient pas été modélisées par Fortin *et al.* (2009b) apparaissent en caractères gras.

2.2. Forme du modèle de 2009

La relation HD mise au point par Fortin *et al.* (2009b) est un modèle linéaire mixte dont la variable explicative de base est le DHP :

$$h_{ijk} = 1,3 + A_{ijk} \ln(DHP_{ijk} + 1) + (B_{ijk} + b_{is}) (\ln(DHP_{ijk} + 1))^2 + \varepsilon_{ijk} \quad [1]$$

où

h_{ijk} est la hauteur de l'arbre j dans la placette i lors du mesurage k (m),

DHP_{ijk} est le DHP de ce même arbre (cm),

A_{ijk} et B_{ijk} sont les paramètres généraux de l'équation,

b_{is} est un effet aléatoire de placette pour l'essence s ,

et

ε_{ijk} est le terme d'erreur résiduelle.

Dans le modèle de Fortin *et al.* (2009b), le paramètre A_{ijk} est une fonction linéaire qui dépend de l'essence, de la surface terrière marchande dans la placette, de la température annuelle moyenne, du rang social de l'arbre, de la classe de drainage, de la région

écologique et de l'occurrence d'une perturbation légère; le paramètre B_{ijk} est une fonction linéaire qui dépend de l'essence, de la surface terrière marchande dans la placette et du rang social.

Fortin *et al.* (2009b) avaient privilégié une approche globale et ajusté un seul modèle mettant en interaction l'essence et d'autres variables. Cette approche permet de tirer avantage du grand nombre d'observations lors des inférences statistiques, mais elle peut mener à certains problèmes de cohérence lorsqu'une variable explicative n'est pas en interaction avec l'essence. Après plusieurs essais, seuls les effets du DHP et de la surface terrière marchande dans la placette avaient pu être mis en interaction avec l'essence dans le modèle de 2009. Ainsi, les relations entre la hauteur et la température annuelle moyenne, le rang social, la classe de drainage, la région écologique et la perturbation étaient les mêmes pour toutes les essences. Par exemple, la hauteur estimée d'un arbre avec un DHP de 20 cm sur un site de drainage « xérique »¹ était 34 cm de moins que le même arbre sur un site de drainage « hydrique », autant pour le bouleau jaune (*Betula alleghaniensis* Britt.) que pour l'épinette noire (*Picea mariana* [Mill.] B.S.P.) ou pour toute autre essence. Les paramètres associés aux classes de drainage ne dépendant pas de l'essence, l'écart estimé entre les différentes classes était calculé à partir de la moyenne de toutes les essences présentes dans chaque classe. Toutefois, puisque les essences n'étaient pas également distribuées dans chacune d'elles, la moyenne d'une classe de drainage représentait la hauteur des essences majoritaires qui n'étaient pas nécessairement les mêmes dans une autre classe. Par exemple, l'épinette noire représentait 60 % des arbres sur les sites avec un drainage « hydrique » et 23 % sur les sites avec un drainage « mésique ». L'écart entre les classes n'incluait donc pas seulement une différence due au drainage, mais aussi une due à l'essence. Il en va de même pour les régions. Dans le modèle de 2009, la différence de hauteur estimée entre la région ouest et la région nord-est, pour un arbre avec un DHP de 20 cm, était de 82 cm, peu importe l'essence. La région nord-est, qui correspond en pratique au sous-domaine bioclimatique de la pessière à mousses de l'Est, était constituée à 67 % d'épinettes noires

et à 26 % de sapins baumiers (*Abies balsamea* [L.] Mill.), de bouleaux à papier (*Betula papyrifera* Marsh.) et de pins gris (*Pinus banksiana* Lamb.). Par contraste, la région ouest contenait un peu de toutes les essences, puisqu'elle comprenait tous les sous-domaines bioclimatiques de l'Ouest. Il était donc difficilement justifiable d'appliquer le même écart de 82 cm entre ces deux régions à la fois au bouleau jaune et à l'épinette noire. À noter que ces différences diminuent en même temps que le DHP.

La variable explicative représentant le rang social (différence au carré entre le DHP de l'arbre et le DHP moyen des arbres de la placette) présentait aussi un problème dans le modèle de Fortin *et al.* (2009b), puisqu'elle n'avait pas la même étendue selon l'essence. Ainsi, le mélèze laricin (*Larix laricina* [Du Roi] K. Koch) n'atteignait qu'une valeur maximale de 530 cm², tandis que le pin blanc (*Pinus strobus* L.) pouvait avoir une valeur aussi grande que 4800 cm². Cette différence d'étendue n'était pas prise en compte dans le modèle de 2009, puisque le paramètre associé au rang social ne dépendait pas de l'essence. À cet égard, l'approche globale utilisée par Fortin *et al.* (2009b) semblait incohérente.

2.3. Nouveau modèle

Le nouveau modèle conserve la forme linéaire générale de l'équation [1], malgré certains avantages possibles d'une forme non linéaire, pour les mêmes raisons que celles évoquées dans Fortin *et al.* (2009b). Cette équation est utilisée depuis 2009 sans que des problèmes reliés à sa forme soient soulevés. Ceci pourrait s'expliquer par le fait que la non-linéarité issue de la forme sigmoïdale provenant de la section inférieure de la courbe, représentée par les petits arbres, n'est pas présente dans la base de données (Huang *et al.* 1992, Yuancai et Parresol 2001). L'utilisation du logarithme du DHP dans l'équation [1] permet d'obtenir une courbe de forme concave, sans problème d'extrapolation.

Pour pallier les incohérences mentionnées dans la section précédente, nous avons étalonné l'équation [1] séparément pour chaque essence. Cette approche a aussi permis d'individualiser le choix des variables explicatives influençant la hauteur de chacune des essences. Nous avons modélisé les covariances entre les termes d'erreur résiduelle d'un même arbre avec une fonction autorégressive continue de premier ordre, soit le type SP(POW) de l'énoncé REPEATED de la procédure MIXED de SAS

¹ Fortin *et al.* (2009b) ont associé les termes « xérique » au regroupement des classes de drainage 0 (excessif) et 1 (rapide), « mésique » au regroupement des classes de drainage 2 (bon) et 3 (modéré), « subhydrique » à la classe de drainage 4 (imparfait) et « hydrique » au regroupement des classes de drainage 5 (mauvais) et 6 (très mauvais) – et ce, même si ces termes qualifient habituellement le régime hydrique.

(SAS Institute 2011). Cette fonction s'ajustait mieux aux données que la fonction utilisée dans le modèle de 2009.

2.3.1 Variables explicatives

Des tests préliminaires ont montré que le rang social, tel que défini dans Fortin *et al.* (2009b), n'était relié à la hauteur que pour quelques essences. Nous avons donc testé deux autres expressions du rang social de l'arbre : d'abord, le rapport entre la surface terrière des arbres ayant un DHP plus grand que celui de l'arbre mesuré et la surface terrière marchande dans la placette, et ensuite, le rapport entre le DHP de l'arbre et le DHP moyen quadratique des arbres de la placette (RDHP).

Le modèle de 2009 tenait compte de la région (regroupement de plusieurs régions écologiques). Dans le modèle de 2016, nous avons testé deux autres variables représentant la variabilité régionale : le sous-domaine bioclimatique (Saucier *et al.* 1998), soit une variable moins agrégée que celle du modèle de 2009, et une variable dichotomique représentant les sous-domaines de l'Est et de l'Ouest (Est vs Ouest), plus agrégée que celle du modèle de 2009.

Le type écologique, une variable qui n'avait pas été testée dans le modèle de 2009, est une unité de classification écologique du territoire québécois qui englobe à la fois la végétation potentielle et le milieu physique (Saucier *et al.* 1998). Nous avons testé ces

deux composantes séparément dans le modèle de 2016, en plus des classes de drainage telles que définies dans Fortin *et al.* (2009b). Le chapitre 4 du tome 1 du *Guide sylvicole du Québec* (MRN 2013) fournit une description complète des végétations potentielles et des milieux physiques. Le tableau 3 présente la liste des variables disponibles pour la modélisation.

Certaines essences sont associées à un grand nombre de végétations potentielles, de sorte qu'il est difficile de toutes les prendre en compte individuellement dans l'étalonnage du modèle. *A priori*, nous avons donc regroupé les végétations potentielles comprenant moins de 60 observations avec une végétation potentielle similaire, selon les recommandations de M. Jean-Pierre Saucier (communication personnelle). Nous avons appliqué la même procédure aux variables du sous-domaine bioclimatique, du milieu physique et de l'occurrence d'une perturbation légère. Les règles de similarités appliquées pour le regroupement de sous-domaines bioclimatiques consistaient à regrouper l'est et l'ouest d'un même domaine bioclimatique, puis à regrouper deux domaines si nécessaire. Les classes de milieu physique ont été regroupées selon le régime hydrique, la texture ou le dépôt et en fonction du nombre de données disponibles. Les perturbations naturelles et anthropiques ont été regroupées lorsque le nombre d'observations l'exigeait. Les regroupements sont propres à chaque essence.

Tableau 3. Liste des variables disponibles pour la modélisation. Les variables en caractère gras à l'intérieur d'un même thème ne peuvent être en même temps dans un modèle.

Variables à l'échelle de l'arbre	Variables à l'échelle de la mesure	Variables à l'échelle de la placette
Caractéristique dendrométrique • Diamètre à hauteur de poitrine (DHP; cm)	Caractéristiques dendrométriques • Densité de tiges marchandes (tiges/ha) • Surface terrière marchande (m ² /ha) • DHP moyen quadratique des arbres de la placette (cm)	Caractéristiques climatiques • Altitude (m) • Température annuelle moyenne sur la période 1981–2010 (°C) • Précipitations totales annuelles sur la période 1981–2010 (mm)
Rang social • Rapport entre la surface terrière des arbres dont le DHP est plus grand que celui de l'arbre et la surface terrière marchande dans la placette • RDHP : Rapport entre le DHP de l'arbre et le DHP moyen quadratique des arbres de la placette • Différence au carré entre le DHP de l'arbre et le DHP moyen quadratique des arbres de la placette (cm ² , indice de Fortin <i>et al.</i> 2009)	Caractéristique de la station • Occurrence d'une perturbation légère (3 classes)	Caractéristiques de la station • Classe de drainage (4 classes) • Milieu physique (10 classes) • Végétation potentielle (32 classes) • Sous-domaine bioclimatique (11 classes) • Regroupement de régions écologiques (4 classes, regroupements de Fortin <i>et al.</i> 2009b) • Domaines bioclimatiques Est vs Ouest (2 classes)

2.3.2 Sélection des variables

Des tests préliminaires ont montré que la forme de la courbe n'était pas adéquate lorsque le paramètre général B_{ijk} dépendait d'une variable explicative. Celui-ci n'a donc pas été exprimé par une fonction linéaire. Nous avons utilisé le critère d'information bayésien (BIC, Schwarz 1978) pour sélectionner les variables explicatives du paramètre A_{ijk} , en ajoutant une variable à la fois et en choisissant celle associée à la plus grande réduction du BIC à chaque étape. Nous avons arrêté le processus lorsque l'ajout d'une variable ne faisait pas diminuer la valeur du BIC d'au moins 15 unités. Anderson (2008) recommande de ne pas ignorer les modèles dont l'écart est plus grand que 2 unités, mais Burnham et Anderson (2002) reconnaissent que des modèles qui diffèrent par moins de 10 unités sont tout de même relativement semblables. Dans la présente étude, nous avons fixé le seuil à 15 unités afin que l'effet de l'ajout d'une variable soit assez important sur la prévision, mais que le modèle reste parcimonieux.

À cause de la trop forte corrélation entre l'altitude et la température annuelle moyenne, d'une part, et entre la surface terrière marchande et la densité de tiges marchandes, d'autre part, nous avons exclu la seconde variable lorsque l'une des deux était sélectionnée (Tableau 3). Il en a été de même pour les deux variables de rang social de l'arbre et pour le groupe constitué du sous-domaine bioclimatique, du regroupement de régions écologiques et des domaines bioclimatiques (Est vs Ouest).

2.4. Évaluation du modèle

Une validation croisée a permis d'évaluer les prévisions marginales du modèle (obtenues en fixant l'effet aléatoire à 0). Nous avons réparti les placettes aléatoirement en 10 groupes et étalonné le modèle 10 fois, en omettant successivement chacun des 10 groupes et en recalculant les prévisions après chaque étalonnage pour le groupe n'ayant pas été inclus. Après ces 10 étalonnages, nous avons évalué visuellement le modèle à l'aide de graphiques des hauteurs observées en fonction des hauteurs estimées, puis calculé le biais, la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (REQM) et l'efficacité du modèle (EF, semblable au coefficient de détermination) pour chacune des essences, de la manière suivante :

$$\text{biais} = \sum_{l=1}^n (h_l - \hat{h}_l) / n \quad [2]$$

$$\text{REQM} = \sqrt{\sum_{l=1}^n (h_l - \hat{h}_l)^2 / n} \quad [3]$$

$$\text{EF} = 1 - \left[\sum_{l=1}^n (h_l - \hat{h}_l)^2 / \sum_{l=1}^n (h_l - \bar{h})^2 \right] \quad [4]$$

où

$\hat{h}_l$ est la prévision marginale de la hauteur (m) obtenue en fixant l'effet aléatoire et le terme d'erreur résiduelle à 0,

h_l est la hauteur observée,

$\bar{h}$ est la moyenne des h_l , et

n est le nombre d'observations.

Le biais est un écart systématique par rapport à la vraie valeur, et la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne est une mesure de la précision (Weiskittel *et al.* 2011). Nous avons calculé les valeurs relatives du biais et de la REQM en divisant les résultats des équations [2] et [3] par la moyenne des valeurs observées. Nous avons comparé ces 3 statistiques à celles obtenues avec la validation croisée de 2009 (modèle de 2009 avec les données de 2009) par essence pour le REQM et l'EF, et par essence en fonction du sous-domaine bioclimatique, de la végétation potentielle et du milieu physique pour le biais.

3. Résultats

Le modèle de prévision de la hauteur a été étalonné pour 27 essences commerciales du Québec. La figure 1 présente le graphique de la hauteur en fonction du DHP par essence, avec la forme générale du modèle. Les résidus normalisés ne montraient aucune divergence par rapport aux postulats de normalité et d'homogénéité des variances.

Pour la majorité des essences, le RDHP était la variable de rang social sélectionnée par le BIC. Toutefois, pour l'épinette blanche (EPB) et le pin rouge (PIR), la variable sélectionnée était le rapport entre la surface terrière des arbres dont le DHP est plus grand que celui de l'arbre et la surface terrière marchande dans la placette. Pour le sapin baumier

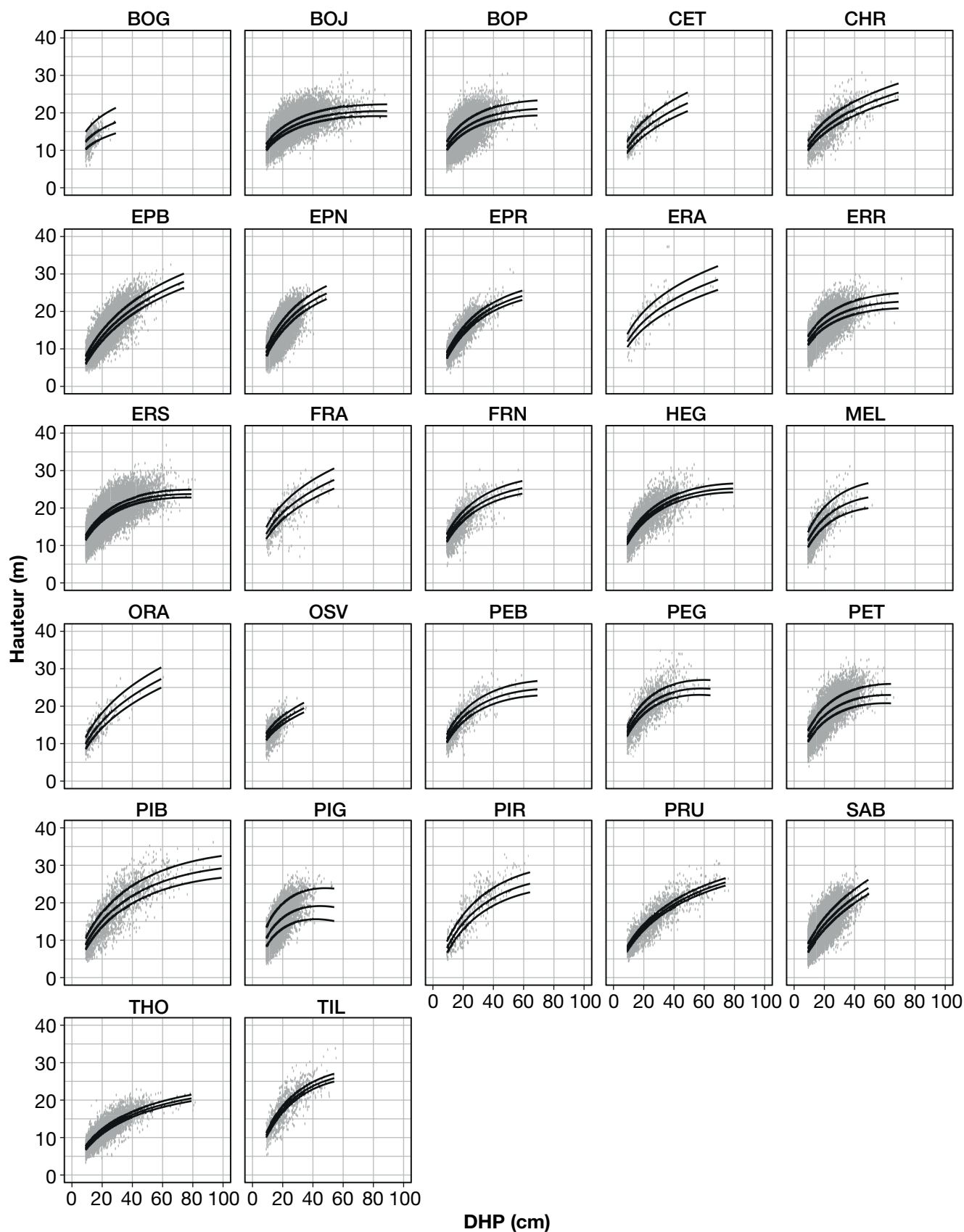


Figure 1. Hauteur observée des arbres en fonction de leur DHP, pour chacune des essences. De bas en haut, les courbes représentent la hauteur estimée pour des surfaces terrières marchandes dans la placette de 5, 20 et 40 m², respectivement. Les codes des essences sont définis au tableau 1.

(SAB) et le bouleau jaune (BOJ), c'était l'indice de rang social de Fortin *et al.* (2009b). Malgré tout, par souci d'uniformité, nous avons retenu le rapport entre le DHP de l'arbre et le DHP moyen pour ces 4 essences. Ce choix n'a entraîné aucune diminution majeure d'ajustement du modèle.

L'efficacité du modèle de 2016 varie de 0,424 à 0,822 selon l'essence, ce qui représente une augmentation de 0,006 à 0,046 pour 19 des 20 essences étalonnées dans le modèle de 2009 (Tableau 4). Les valeurs du REQM du modèle de 2016 varient de 1,4 à 3,2 m selon l'essence et ne sont pas très différentes de celles estimées en 2009, quoique toujours inférieures (de 1 à 9 % de la valeur de 2009 pour la majorité des essences). Le biais relatif par essence du modèle de 2016 est toujours inférieur ou égal à 1,6 % en valeur absolue.

Plusieurs types de variables explicatives ont été utilisés dans les modèles, en plus du DHP de l'arbre et de la surface terrière marchande dans la placette. Certains types de variables ont été impliqués dans les modèles de la plupart des essences, tandis que d'autres l'ont été pour seulement quelques-unes. Les valeurs des paramètres de l'équation [1] pour les 27 essences sont présentées aux annexes 1 à 4. Sur demande auprès de l'auteur, elles sont aussi disponibles sous forme de chiffrier. Le tableau 5, quant à lui, présente l'ordre de sélection des variables explicatives pour chacune des essences, avec la réduction du BIC qui leur est associée. Le RDHP se retrouve dans le modèle de 20 essences, tandis que la végétation potentielle influence la prévision de la hauteur de 15 essences. Au moins une variable climatique (altitude, température annuelle moyenne ou précipitations totales annuelles) est utilisée pour

Tableau 4. Biais, racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (REQM) et efficacité du modèle de la présente étude (2016) et du modèle de Fortin *et al.* (2009b) pour chacune des essences. La valeur relative (%) est présentée entre parenthèses, de même que la différence entre les deux modèles (Diff. : différence des valeurs absolues pour le biais, différence des valeurs pour la REMQ et l'efficacité). Les codes des essences sont définis au tableau 1.

Code de l'essence*	Biais (m)			REQM (m)			Efficacité		
	2009	2016	Diff.	2009	2016	Diff.	2009	2016	Diff.
BOG		-0,18 (-1,5)			1,7 (13,7)			0,454	
BOJ	0,07 (0,4)	-0,03 (-0,2)	-0,04	2,4 (14,9)	2,2 (13,7)	0,19 (8,2)	0,610	0,641	0,032
BOP	0,13 (1,0)	0,01 (0,1)	-0,12	2,2 (16,3)	2,0 (15,0)	0,16 (7,3)	0,617	0,653	0,036
CET		-0,06 (-0,4)			1,9 (13,1)			0,707	
CHR	-0,17 (-1,1)	-0,09 (-0,6)	-0,08	2,7 (17,2)	2,6 (16,6)	0,07 (2,5)	0,630	0,640	0,010
EPB	-0,17 (-1,3)	-0,21 (-1,6)	0,05	2,3 (17,8)	2,2 (16,8)	0,08 (3,4)	0,773	0,783	0,010
EPN	0,04 (0,4)	-0,10 (-0,9)	0,06	1,7 (14,9)	1,6 (14,1)	0,05 (3,2)	0,749	0,769	0,020
EPR	-0,07 (-0,6)	-0,14 (-1,0)	0,06	2,0 (16,0)	1,9 (14,6)	0,07 (3,6)	0,755	0,781	0,027
ERA		0,03 (0,2)			3,2 (17,6)			0,653	
ERR	0,04 (0,3)	-0,12 (-0,8)	0,07	2,2 (15,2)	2,1 (14,0)	0,15 (6,8)	0,599	0,645	0,046
ERS	0,22 (1,3)	0,00 (0,0)	-0,22	2,4 (14,3)	2,2 (13,2)	0,21 (8,5)	0,655	0,688	0,033
FRA		-0,19 (-1,1)			2,5 (14,7)			0,673	
FRN	-0,02 (-0,2)	-0,16 (-1,0)	0,13	2,4 (15,6)	2,2 (14,3)	0,18 (7,7)	0,671	0,712	0,041
HEG	0,21 (1,3)	0,03 (0,2)	-0,18	2,6 (15,8)	2,5 (15,0)	0,16 (6,2)	0,695	0,703	0,008
MEL	0,02 (0,1)	-0,08 (-0,6)	0,07	2,1 (16,1)	2,1 (15,3)	0,01 (0,5)	0,759	0,766	0,007
ORA		-0,18 (-1,3)			2,0 (15,0)			0,706	
OSV	-0,05 (-0,4)	-0,07 (-0,5)	0,02	2,1 (15,9)	2,0 (14,9)	0,13 (6,0)	0,384	0,424	0,040
PEB		-0,08 (-0,5)			2,1 (13,4)			0,786	
PEG	0,18 (1,0)	-0,10 (-0,5)	-0,09	2,6 (14,2)	2,4 (12,8)	0,24 (9,1)	0,737	0,769	0,032
PET	0,14 (0,9)	-0,06 (-0,4)	-0,08	2,2 (13,7)	2,1 (12,9)	0,10 (4,5)	0,774	0,789	0,014
PIB	0,26 (1,5)	-0,08 (-0,5)	-0,18	3,0 (17,7)	2,8 (16,3)	0,26 (8,7)	0,779	0,811	0,032
PIG	0,07 (0,5)	0,05 (0,4)	-0,02	1,9 (14,8)	1,9 (14,0)	0,04 (2,0)	0,786	0,800	0,013
PIR		0,13 (0,7)			3,0 (17,0)			0,776	
PRU	0,00 (0,0)	-0,11 (-0,8)	0,11	2,1 (15,4)	2,1 (15,4)	0,01 (0,3)	0,815	0,822	0,006
SAB	-0,05 (-0,5)	-0,14 (-1,2)	0,09	1,8 (16,1)	1,8 (15,9)	-0,01 (-0,5)	0,721	0,718	-0,003
THO	-0,03 (-0,3)	-0,06 (-0,6)	0,03	1,5 (13,1)	1,4 (13,1)	0,05 (3,4)	0,786	0,798	0,011
TIL	-0,01 (-0,1)	0,09 (0,5)	0,08	2,6 (14,4)	2,5 (14,1)	0,06 (2,2)	0,724	0,737	0,013

* Les essences qui n'avaient pas été modélisées par Fortin *et al.* (2009b) apparaissent en caractères gras.

Tableau 5. Ordre de sélection des variables explicatives et leur effet de réduction sur le critère bayésien d'information (ΔBIC) pour chacune des essences. ST : surface terrière marchande; TMOY : température annuelle moyenne; RDHP : rapport du DHP de l'arbre sur le DHP moyen quadratique des arbres de la placette; VP : végétation potentielle; SDOM : sous-domaine bioclimatique; PTOT : précipitations totales annuelles; ALT : altitude; PERT : perturbation légère; MP : milieu physique. Les codes des essences sont définis au tableau 1.

Code de l'essence*	Variable 1		Variable 2		Variable 3		Variable 4		Variable 5		Variable 6		Variable 7		Variable 8	
	Nom	ΔBIC	Nom	ΔBIC	Nom	ΔBIC	Nom	ΔBIC	Nom	ΔBIC	Nom	ΔBIC	Nom	ΔBIC	Nom	ΔBIC
BOG	ST	-131														
BOJ	ST	-714	VP	-563	RDHP	-229	TMOY	-228	PTOT	-26						
BOP	ST	-1817	SDOM	-2182	VP	-474	ALT	-551	RDHP	-324	MP	-58	PERT	-40	PTOT	-24
CET	ST	-38	VP	-20												
CHR	ST	-76	MP	-51												
EPB	ST	-1279	SDOM	-375	VP	-58	RDHP	-54	TMOY	-29						
EPN	ST	-4927	SDOM	-4232	VP	-605	RDHP	-880	TMOY	-155	PTOT	-176	MP	-61	PERT	-32
EPR	ST	-237	PTOT	-151	RDHP	-54	VP	-24								
ERA	ST	-19														
ERR	ST	-1330	TMOY	-968	RDHP	-235	VP	-172	MP	-24	PTOT	-22	PERT	-16		
ERS	RDHP	-873	TMOY	-794	ST	-289	VP	-305	SDOM	-58	PTOT	-23				
FRA	ST	-53	MP	-19												
FRN	ST	-131	SDOM	-73	RDHP	-34	ALT	-15	VP	-20						
HEG	RDHP	-205	ALT	-70	ST	-49										
MEL	ST	-403	SDOM	-84	RDHP	-31										
ORA	ST	-54														
OSV	ST	-37	MP	-17												
PEB	ST	-101	RDHP	-15	VP	-16										
PEG	RDHP	-170	ST	-91	MP	-40	VP	-18								
PET	ST	-1853	RDHP	-671	SDOM	-310	VP	-107	PTOT	-46	MP	-25	TMOY	-17		
PIB	ST	-312	RDHP	-89	PERT	-42	SDOM	-25								
PIG	ST	-3810	RDHP	-657	SDOM	-88	PERT	-82	MP	-39						
PIR	ST	-110	RDHP	-21												
PRU	ST	-114	VP	-31	RDHP	-18	PTOT	-12								
SAB	ST	-7420	VP	-1335	SDOM	-2947	ALT	-230	PTOT	-69	MP	-35	RDHP	-13		
THO	ST	-338	SDOM	-382	TMOY	-82	RDHP	-85	VP	-47	PTOT	-20				
TIL	ST	-46	RDHP	-34												

* Les essences qui n'avaient pas été modélisées par Fortin *et al.* (2009b) apparaissent en caractères gras.

13 essences. Le milieu physique et le sous-domaine bioclimatique sont reliés à la hauteur de 10 et de 11 essences, respectivement. La perturbation légère est la variable que l'on retrouve le moins souvent, soit pour seulement 5 des 27 essences.

L'ajustement global du modèle pour chacune des essences est présenté à la figure 2. Les graphiques de la hauteur observée en fonction de la hauteur estimée présentent simultanément une image du biais et de la précision du modèle pour chaque essence. Une relation sans biais est représentée par une pente de 1 (ligne noire). La comparaison de la ligne verte (nouveau modèle) et de la ligne noire permet de juger de l'ampleur du biais. La précision est représentée par l'étalement des points autour de la ligne noire. Plus les points sont concentrés autour de cette ligne, plus la précision et l'efficacité du modèle sont grandes. Ce graphique permet aussi de vérifier l'étendue des hauteurs estimées et la présence de valeurs aberrantes. Aucun biais majeur ni valeur estimée aberrante n'est observé pour le modèle de 2016. Aux fins de comparaison, l'ajustement du modèle de 2009 est aussi présenté (Figure 2, couleur orange). La différence de longueur entre les lignes verte et orange montre que les valeurs estimées du modèle de 2016 ont une étendue plus grande que celles du modèle de 2009.

Les tableaux 6 à 8 présentent les biais des prévisions obtenues avec les deux modèles, par sous-domaine bioclimatique, végétation potentielle et milieu physique, respectivement. Dans la majorité des cas, les biais sont plus petits avec les prévisions du modèle de 2016. Le biais relatif a diminué d'au moins 5 % dans au moins un sous-domaine pour 10 des 20 essences modélisées par Fortin *et al.* (2009b) (Tableau 6). Le biais relatif a aussi diminué d'au moins 5 % dans au moins une végétation potentielle pour 15 essences (Tableau 7). La diminution du biais dans le modèle de 2016 en fonction du milieu physique est moindre (diminution d'au moins 5 % dans au moins un milieu pour seulement 7 essences, tableau 8). Dans l'ensemble, le biais relatif n'a augmenté de plus de 5 % avec le modèle de 2016 que dans 2 cas : celui de l'épinette rouge (*Picea rubens* Sarg.) sur la végétation potentielle RS1 (6,2 %, tableau 7) et celui de l'érable à sucre (*Acer saccharum* Marsh.) dans le sous-domaine bioclimatique 5est (6,3 %, tableau 6).

La figure 3 présente la relation entre les variables explicatives et la hauteur estimée pour 3 arbres de référence : une épinette noire (EPN), un érable à

sucré (ERS) et un sapin baumier (SAB) ayant chacun un DHP de 20 cm et un RDHP de 1,3 (DHP moyen quadratique de 15,4 cm), dans une placette ayant une surface terrière marchande de 20 m²/ha n'ayant pas subi de perturbation légère (classe « aucune »), située à 300 m d'altitude sur un milieu physique de code 2 (dépôt de mince à épais, de texture moyenne et un régime mésique, MRN 2013) et recevant 1000 mm de précipitations totales annuelles. Pour le SAB et l'EPN, la placette est située dans le sous-domaine bioclimatique de la pessière à mousses de l'Est (6est), dans la végétation potentielle de la sapinière à épinette noire (RS2), avec une température annuelle moyenne de 1 °C. Pour l'ERS, la placette est située dans le sous-domaine de l'érablière à bouleau jaune de l'Ouest (3ouest), dans la végétation potentielle de l'érablière à bouleau jaune (FE3), avec une température annuelle moyenne de 3,5 °C.

D'après les prévisions de hauteur, une EPN et un ERS de 20 cm de DHP d'un rang social inférieur (RDHP < 1) dépassent respectivement de 1,0 et de 1,3 m un arbre semblable, mais de rang social supérieur (RDHP > 1), c'est-à-dire dans une placette dont le DHP moyen quadratique est plus petit, donc plus dense, puisque la surface terrière marchande est fixe (Figure 3b). Le rang social n'est que faiblement associé à la hauteur du SAB (Figure 3b). Pour un même sous-domaine et une même végétation potentielle, des augmentations de la température annuelle moyenne de 3 °C pour l'EPN et de 2 °C pour l'ERS sont associées à des augmentations de hauteur de 0,9 et de 1,2 m, respectivement (Figure 3g). Une variation de 20 m²/ha de surface terrière marchande dans la placette fait varier la prévision de la hauteur de 0,8 à 1,7 m selon l'essence (Figure 3a). Une EPN serait plus grande de 50 cm sur la végétation potentielle RE2 que sur la végétation potentielle RS2, tandis que le SAB serait plus petit de 59 cm et que l'ERS aurait 1,0 m de moins sur la végétation potentielle MJ1 que sur la végétation potentielle FE3 (Figure 3e). Le sous-domaine est une variable importante pour la prévision de la hauteur de l'EPN et du SAB, qui mesureraient respectivement 1,0 et 1,8 m de plus dans le sous-domaine bioclimatique 5ouest que dans le sous-domaine 6est, pour une même végétation potentielle et une même température annuelle moyenne (Figure 3d). Le milieu physique (Figure 3f), l'occurrence d'une perturbation légère (Figure 3c), l'altitude (Figure 3h) et les précipitations totales annuelles (Figure 3i) ne sont que faiblement associés à la hauteur de l'EPN, de l'ERS et du SAB.

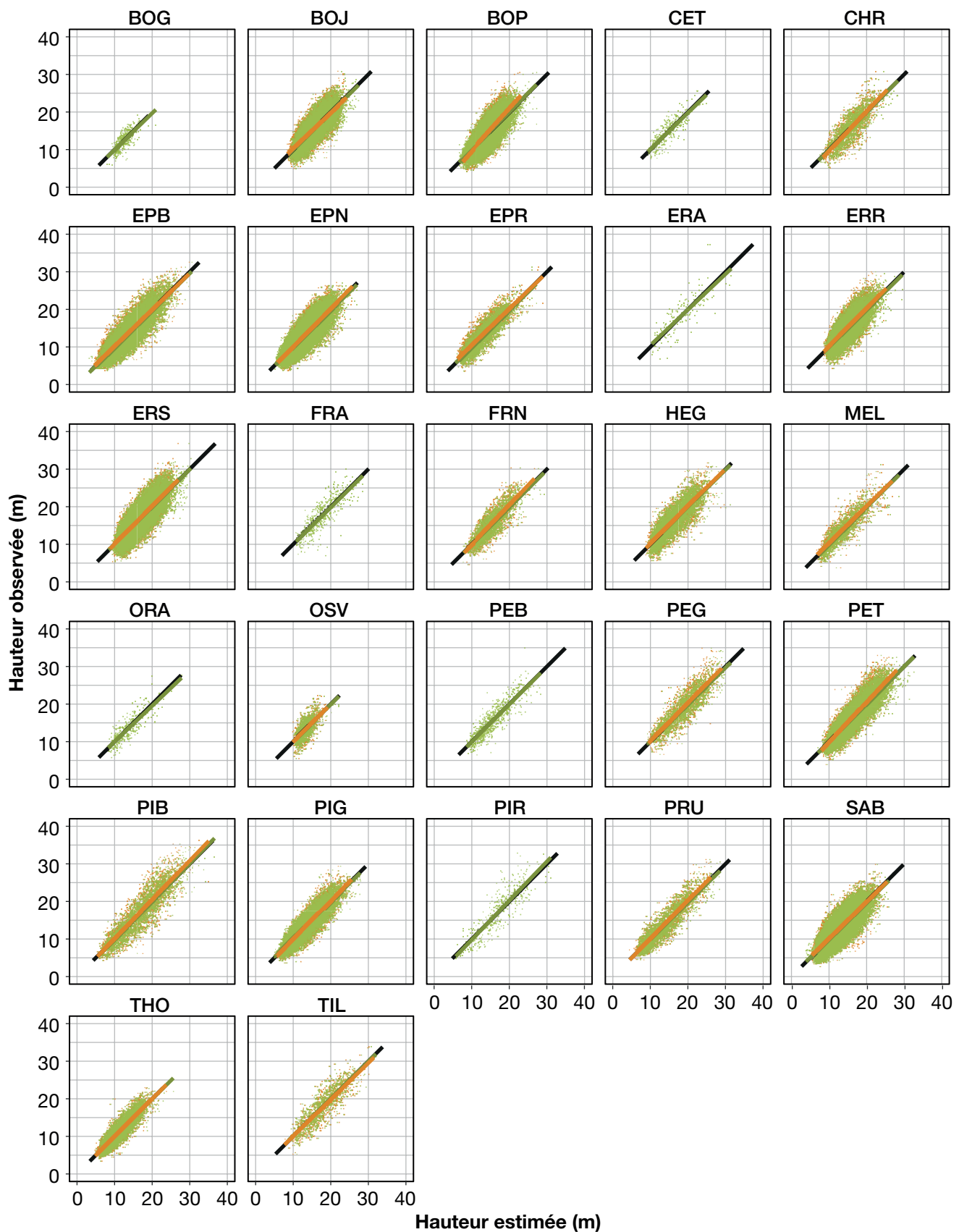


Figure 2. Hauteur observée des arbres en fonction de leur hauteur estimée par le modèle de la présente étude (vert) et de la hauteur estimée par le modèle de Fortin *et al.* (2009) (orange), pour chacune des essences. La ligne noire représente une relation sans biais (pente de 1) ainsi que l'étendue des données observées. Les codes des essences sont définis au tableau 1.

Tableau 6. Biais relatif (%) des prévisions faites avec les modèles de Fortin *et al.* (2009b) et de la présente étude (2016), par sous-domaine bioclimatique, pour chacune des essences. Seules les classes avec au moins 30 observations sont montrées. Les codes des essences sont définis au tableau 1.

Sous- domaine	Modèle	Code de l'essence*																										
		BOG	BOJ	BOP	CET	CHR	EPB	EPN	EPR	ERA	ERR	ERS	FRA	FRN	HEG	MEL	ORA	OSV	PEB	PEG	PET	PIB	PIG	PIR	PRU	SAB	THO	TIL
1	2009	-3,4	8,2			5,1	-8,5				5,0	2,4		-0,1	-0,7		-2,0			3,6	-1,2	-6,1	-4,3		-2,8	-1,3	-8,4	-4,2
	2016	6,1	-6,9	-1,1	-1,3	1,7	-0,4	5,8		-0,2	-0,9	0,0	-0,3	-0,9	-2,1		-2,0	-0,4		1,0	-0,4	-2,4	9,1		-0,2	0,1	-1,7	-1,2
2est	2009	3,0	7,2				-13,7	-5,9	0,5	4,7	6,5			-10,1	5,3	1,6	3,5			-2,0	-4,4	-7,8			-1,4	-1,1	-1,7	
	2016	-0,9	0,1	-1,5	-2,4		-6,2	-1,6	1,6	-0,4	-0,4	0,7	0,7	-2,3	-0,7	-0,5	-4,4	-1,5	-3,9	-1,9	-1,1	-3,9	0,7	0,7	-7,5	-0,4	-1,2	-1,4
2ouest	2009	2,7	9,7			-1,9	-8,2			1,3	1,8			2,8	0,5		-5,8			2,9	3,7	-8,9			-3,3	-1,0	1,0	-0,1
	2016	-1,0	2,0	0,9	0,9	-1,0	-1,5			-1,4	0,5	-6,5	1,4	0,0			1,7	-2,3	3,3	2,5	0,3	-0,6	-5,8		-1,1	-0,1	-0,7	2,0
3est	2009	4,0	4,0				-3,4	-6,3	-1,2	2,8	2,0			-1,7	1,1	-5,2	-4,2			1,0	0,2	1,3	-8,3		-2,3	-0,4	0,1	
	2016	-5,0	0,0	-0,4	-2,0	5,7	-1,4	-1,2	-2,7	-0,5	-0,3	-0,8	-0,8	-1,7	-1,9	-1,6	-3,1	-7,2	-2,8	-2,6	-0,5	-0,5	-2,2	-1,1	-4,3	-1,5	-0,8	
3ouest	2009	1,9	6,6			-3,0	0,0	-1,5	1,5	-2,2	1,4			2,5	1,1	10,5	2,7			1,3	3,4	6,5	-2,1		3,3	0,2	0,3	0,5
	2016	0,8	0,2	2,4	-1,8	-1,1	-1,7	1,6		-1,0	0,4	1,0	-1,2	1,9	0,5	1,4	1,6	3,9	0,0	-0,4	0,3	1,0	4,4	-0,3	-0,8	-0,4	0,5	
4est	2009	0,8	-0,2				-2,2	-9,5	2,7	0,4	1,5			-7,0	-0,1	-5,7						0,1			3,2		-2,0	0,8
	2016	-1,1	-0,6				-1,7	-1,3	1,2	-0,6	-0,7			-0,3	-2,8	-0,7		-1,3	-3,1	-0,8				2,6		-1,7	-0,9	
4ouest	2009	-3,1	1,5				-1,6	-0,2	-2,4	-6,4	-5,1			-4,3		5,0				-7,2	2,4	-2,8	1,2			-2,4	-0,4	
	2016	-0,6	0,4				-1,7	-1,3	-1,3	-1,2	0,1			-2,0	1,4	-1,1		5,2	-6,4	-0,1	-0,4	0,0	-4,5		-2,3	0,3		
5est	2009	0,6	-4,6				1,6	-5,5	5,0	-1,2	1,7									0,5				-10,1		0,9	3,5	
	2016	-0,1	0,9				-1,7	0,3	-1,5	-3,1	-8,0					3,8				0,0			-0,9		0,0	0,6		
5ouest	2009	-4,8	-0,2				1,4	1,8		-4,5						3,7				-0,2		2,3				-0,6	-1,6	
	2016	1,4	-0,6				-2,0	-1,1	-0,7	-0,8				1,1	0,1	0,1		-1,8		-0,3		0,7			-2,0	1,2		
6est	2009	-6,7					9,3	0,6								-3,1				-6,4		2,2				0,8		
	2016	0,8					-0,4	-0,8								-0,8				-3,4		-0,7			0,3			
6ouest	2009	-3,6						3,4								-11,3				0,5		-0,9				1,7		
	2016	0,2					1,3	-0,7								-4,5				0,1		-0,2			-0,5	-14,0		

* Les essences qui n'avaient pas été modélisées par Fortin *et al.* (2009b) apparaissent en caractères gras.

Note de recherche forestière n° 146
Une nouvelle relation hauteur-diamètre tenant compte...

Végétation potentielle		Modèle		Code de l'essence*																									
				BOG	BOJ	BOP	CET	CHR	EPB	EPN	EPR	ERA	ERR	ERS	FRA	FRN	HEG	MEL	ORA	OSV	PEB	PEG	PET	PIB	PIG	PIR	PRU	SAB	THO
FC1	2009					-10,2					-12,2												6,2						
	2016					-4,8					-10,8												-2,8						
FE1	2009											-1,8					-11,0												
	2016											-5,1	-1,3	-3,1			6,5	-3,1											
FE2	2009	8,8	13,4				-0,6				6,6	5,1		0,9			4,5		6,2	0,9	1,3				-0,8	-3,0		1,3	
	2016	0,6	1,1	-1,1	10,5	0,1		0,6			-0,8	0,6	0,7	6,5	-0,5		3,8	2,6	4,3	-1,3	3,5				0,5	-1,2		1,8	
FE3	2009	5,2	11,4	10,5	0,8			-1,5			5,4	1,4	5,1	2,7			3,7		2,8	4,2					0,5	-1,1	-0,5	4,2	
	2016	0,1	0,8	1,4	5,1	0,3	-2,1	-1,9			-0,7	-0,1	-1,3	-2,4	1,6		1,3	0,8	-1,3	-1,3	-2,2				-0,3	-0,5	-1,0	2,9	
FE4	2009	8,9									5,5	4,4		0,2															
	2016	0,3									-1,9	-0,6		-2,4															
FE5	2009					6,6					6,1	1,0		-4,6			2,2		10,9						0,3		-0,8		
	2016	2,9				5,7					-2,8	-0,5		-3,0			1,5		5,7	9,6					2,1		0,7		
FE6	2009	-1,9	10,7			1,5	-5,3				0,2	-5,9		-3,8			-2,3		-1,1	-7,1	3,0				-2,4		-4,8		
	2016	-3,2	-0,9			0,6	0,1				0,4	0,2	0,4	-1,7			-1,2		-4,5	-5,4	-0,3				-0,6		-1,6		
FO1	2009					-10,0																							
	2016					-6,6					1,4	-2,7	-3,2		-2,6		-5,8	-15,9											
ME1	2009																		-5,6										
	2016																		-0,7					0,1		-4,2			
MF1	2009	-0,6	1,6				1,9				0,1			-0,8												-2,5	1,9		
	2016	0,6	-2,7				-0,3				-1,7			-1,3					5,7		1,0					-0,5	1,1		
MJ1	2009	1,2	2,9				-2,7	-10,8	-3,0		1,0	-6,3		3,2	-3,3				-2,7	1,7					-1,7	-0,2	3,7		
	2016	2,2	-0,3	-0,8	3,9	-4,9	-2,1	-0,4	-0,9		-0,8	0,0		-0,3	-1,5		2,5	-4,7		-3,3	-1,0	3,8			-1,7	-0,9	0,8	0,0	
MJ2	2009	-5,0	3,5				-1,5	-6,4	-3,5		-3,9	-7,7		-2,1					3,6	3,6	0,9	-7,2			1,0	-0,5	1,8		
	2016	2,0	-0,6	0,3			-1,4	-1,1	-1,4		-0,8	1,1		-2,1	-6,1	-3,6	-5,9		-0,6	0,7	0,0	0,0	-1,8	-7,4	1,2	-1,5	0,0	-8,6	
MS1	2009	-0,5	1,1				0,6	-6,0	-0,7		1,4	-5,6		-11,2					2,3						-9,5	1,5	6,1		
	2016	0,2	-0,5				-1,8	2,8	-0,1		-0,8	0,1		2,0					-0,5		-1,1				-7,3	-1,6	4,4		
MS2	2009	-6,6	1,1				1,3	-3,3	6,0		-4,8								-1,2	2,0	-7,6	0,8			1,2	1,6			
	2016	0,1	-0,2	0,2			-1,5	-0,2	1,0		-0,1		-7,6		-2,5		-1,8	1,1	-0,2	-7,5	0,0				-0,9	0,4			
MS4	2009						-51,6																			-47,6			
	2016						-20,0																			-13,1			

Tableau 7. (suite et fin)

Végétation potentielle	Modèle	Code de l'essence*															
		BOG	BOJ	BOP	CET	CHR	EPB	EPN	EPR	ERA	ERR	ERS	FRA	FRN	HEG	MEL	ORA
MS6	2009	-1,2					-3,7	-9,9			-2,1						
	2016	-1,3					-3,6	-0,9	2,3		-0,8						
RB1	2009	-5,5					-16,3	3,8								-5,0	
	2016	5,4					-4,2	2,2								-6,9	
RB5	2009						-8,6										
	2016						-3,3	-2,0									
RC3	2009	-1,8	-11,2				-1,6	-4,4			-0,2			-13,2			
	2016	3,4	-1,5				0,0	1,2	-2,2		0,6			-2,8		-10,8	
RE1	2009	-23,0						-0,3									
	2016	-15,3						-0,8						-7,8			
RE2	2009	-5,9					-6,4	1,9			-5,1			1,2			
	2016	0,6					-2,5	-1,2	-1,7		-0,9			2,2			
RE3	2009	-8,6						3,3						1,5			
	2016	2,8					-3,1	-1,4	4,0					-0,2			
RE4	2009							-15,9									
	2016							-0,1									
RP1	2009			3,3		-9,6	-6,0	-2,4			-6,0	-14,1					
	2016	-1,1	0,6			-5,5	-1,8	-2,0	-1,4		-2,6	-4,2					
RS1	2009	-8,1	1,8				0,6	2,4	-0,5		-1,0			-5,2			
	2016	-11,1	-0,2	0,9			-0,6	3,0	-6,7		-0,3	-2,5		-1,0			
RS2	2009	-4,8					2,9	-1,7	-3,8		-10,6						
	2016	1,9	-0,1				-1,3	-0,7	-2,5		-1,4						
RS3	2009	-10,1					-0,3	0,1						5,7			
	2016	0,4					-1,9	-0,4	-4,9		-2,4			2,5			
RS4	2009							-12,8									
	2016							-2,6									
RS5	2009			0,5			-4,9	-10,0	0,0		2,7						
	2016	-3,4	0,0				-5,3	-0,7	-0,1		-0,2			-3,3			
RT1	2009	-1,7									-0,8	-0,4		-2,1			
	2016	0,2	0,5				1,0		-2,9		-1,0	3,7		-1,8			

* Les essences qui n'avaient pas été modélisées par Fortin et al. (2009b) apparaissent en caractères gras.

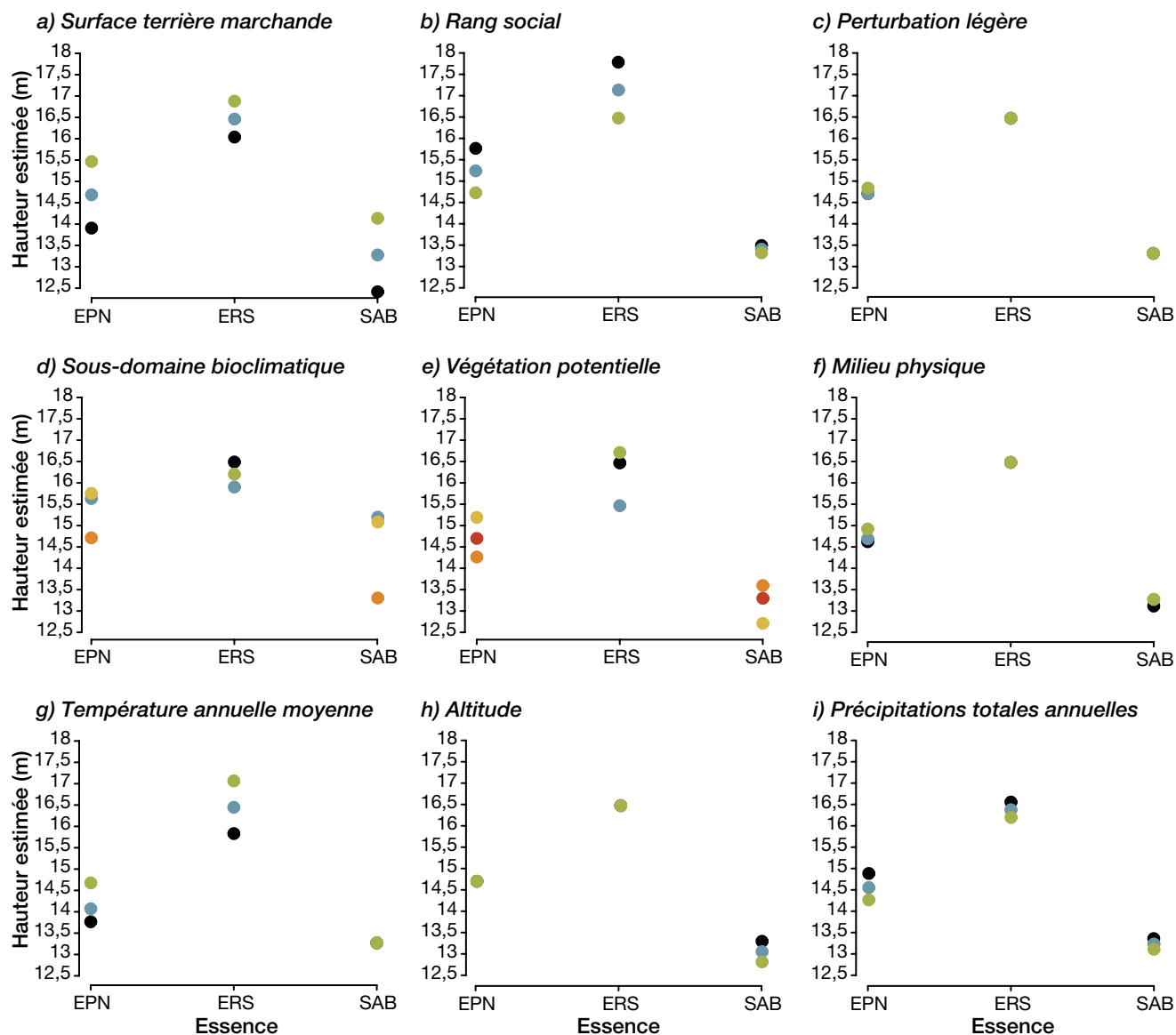
Tableau 8. Biais relatif (%) des prévisions faites avec les modèles de Fortin *et al.* (2009b) et de la présente étude (2016), par milieu physique, pour chacune des essences. Seules les classes avec au moins 30 observations sont montrées. Les codes des essences sont définis au tableau 1.

Code du milieu physique [†]	Modèle	Code de l'essence*															
		BOG	BOJ	BOP	CET	CHR	EPB	EPN	EPR	ERA	ERR	ERS	FRA	FRN	HEG	MEL	ORA
0	2009	-2,0	-2,1	-5,8	0,3	-0,7	-2,7	-4,3	0,2	-6,0	-9,7	-6,3	-3,0	0,8	-2,1	-1,8	-1,1
	2016	-4,2	-0,1	0,3	-1,3	-0,5	-5,8	-1,3	-1,2	-0,2	-5,9	-4,9	0,4	0,3	-3,4	-0,1	-0,3
1	2009	-3,0	2,5	-2,5	-1,3	4,2	3,0	4,2	3,0	-0,8	-2,5	1,3	2,8	-0,4	5,0	1,8	-5,3
	2016	3,3	-1,3	0,0	4,4	-0,4	-0,9	-1,3	0,5	0,2	-2,5	1,3	-0,9	0,1	2,0	0,4	1,8
2	2009	1,2	2,3	2,5	-1,3	-0,7	-0,4	0,1	1,2	2,7	1,7	-0,7	2,4	1,7	3,0	0,0	1,9
	2016	-0,2	0,4	0,2	1,4	-1,6	-1,5	-0,9	-1,0	-0,9	0,2	-1,5	-0,7	0,6	0,5	0,4	1,1
3	2009	0,2	0,8	0,0	-3,6	-15,1	3,8	4,4	0,0	-0,2	5,0	-2,8	2,6	0,3	-3,3	5,3	-1,8
	2016	-2,8	-0,2	-2,7	-0,3	-0,7	0,0	-0,2	-4,8	2,4	-2,8	2,9	-0,1	1,2	-1,8	1,1	1,2
4	2009	-11,3	-7,5	1,8	2,0	1,5	4,8	-1,7	-1,9	-1,0	5,1	-1,3	-0,2	-0,5	-0,9	-2,4	-0,9
	2016	-6,0	-1,1	2,1	-1,8	-3,1	2,7	0,0	0,7	0,8	1,6	0,3	-5,6	0,7	-3,2	0,7	0,4
5	2009	-0,9	-2,7	-0,2	1,6	0,8	-1,7	-1,0	0,0	-0,5	-0,9	-2,9	-1,3	1,7	0,2	0,0	-0,5
	2016	-4,1	-0,2	-0,8	-1,7	-1,0	0,0	-2,7	0,7	-7,1	-6,4	0,0	-1,5	-1,3	1,5	-0,5	-0,9
6	2009	-2,3	1,9	-5,4	3,0	-2,2	-2,7	-2,4	-1,7	2,6	-6,4	0,0	-1,5	-1,3	1,5	-0,5	-2,4
	2016	-2,2	0,1	-3,8	-0,2	2,1	-4,2	-3,7	-3,7	1,2	1,2	1,2	1,5	1,2	1,2	1,6	2,6
7	2009	-10,3	3,7	-0,1	-0,3	-4,3	-0,1	-3,9	-0,6	-1,7	-8,2	-1,8	-2,1	-9,6	1,2	-0,8	-0,9
	2016	-2,1	-9,5	-0,7	-0,6	-1,7	-5,2	0,1	2,9	-1,4	1,3	-0,2	-4,9	1,6	2,2	3,7	2,2
8	2009	-2,1	-9,5	-0,1	-0,3	-4,3	-0,1	-3,9	-0,6	-1,7	-8,2	-1,8	-2,1	-9,6	1,2	-0,8	-0,9
	2016	-0,4	-0,8	-0,7	-0,6	-1,7	-5,2	0,1	2,9	-1,4	1,3	-0,2	-4,9	1,6	2,2	3,7	2,2
9	2009	-9,5	0,2	-2,1	3,2	-3,2	-1,3	-0,2	-0,2	-0,2	-0,2	-0,2	-0,2	-0,2	-0,2	-0,2	-0,2
	2016	-9,5	0,2	-2,1	3,2	-3,2	-1,3	-0,2	-0,2	-0,2	-0,2	-0,2	-0,2	-0,2	-0,2	-0,2	-0,2

* Les essences qui n'avaient pas été modélisées par Fortin *et al.* (2009b) apparaissent en caractères gras.

† Définition des codes du milieu physique (MRN 2013) :

- 0 : dépôt très mince, de texture variée, xérique à hydrique
- 1 : dépôt minéral de mince à épais, de texture grossière, mésique
- 2 : dépôt minéral de mince à épais, de texture moyenne, mésique
- 3 : dépôt minéral de mince à épais, de texture fine, mésique
- 4 : dépôt minéral de mince à épais, de texture grossière, subhydrique
- 5 : dépôt minéral de mince à épais, de texture moyenne, subhydrique
- 6 : dépôt minéral de mince à épais, de texture fine, subhydrique
- 7 : dépôt minéral de mince à épais, ombrotrophe, hydrique
- 8 : dépôt organique ou minéral, de mince à épais, minérotrophe, hydrique
- 9 : dépôt organique mince à épais, ombrotrophe, hydrique

**a) Surface terrière marchande**

- faible (10 m²/ha)
- moyenne (20 m²/ha)
- forte (30 m²/ha)

d) Sous-domaine bioclimatique

- 3QUEST
- 4QUEST
- 3EST
- 6EST
- 5QUEST

g) Température annuelle moyenne

- froide (EPN, SAB : -2 °C, ERS : 2,5 °C)
- moyenne (EPN, SAB : -1 °C, ERS : 3,5 °C)
- chaude (EPN, SAB : 1 °C, ERS : 4,5 °C)

b) Rang social

- inférieur (rdhp = 0,7)
- moyen (rdhp = 1,0)
- supérieur (rdhp = 1,3)

e) Végétation potentielle

- FE3
- MJ1
- FE2
- MS2
- RE2
- RS2

h) Altitude

- basse (300 m)
- moyenne (500 m)
- élevée (700 m)

c) Perturbation légère

- aucune
- anthropique
- naturelle

f) Milieu physique

- 0 : dépôt très mince, de texture variée; xérique à hydrique
- 2 : dépôt minéral de mince à épais, de texture moyenne; mésique
- 5 : dépôt minéral de mince à épais, de texture moyenne; subhydrique

i) Précipitations totales annuelles

- faible (950 mm)
- moyenne (1 050 mm)
- forte (1 150 mm)

Figure 3. Estimation de la hauteur pour 3 essences selon a) la surface terrière marchande, b) le rang social, c) l'occurrence et le type de perturbation légère, d) le sous-domaine bioclimatique, e) la végétation potentielle, f) le milieu physique, g) la température annuelle moyenne, h) l'altitude et i) les précipitations totales annuelles. Les codes des essences sont définis au tableau 1.

4. Discussion

La nouvelle relation HD étalonnée par essence est légèrement plus précise que celle de Fortin *et al.* (2009b), mais surtout, elle réduit les biais associés à l'essence, ce qui augmente le degré de confiance envers les prévisions du modèle de 2016. Le développement de modèles distincts pour chacune des essences est une façon de faire répandue (par exemple : Huang et Titus 1994, Huang *et al.* 1992, Sharma 2016, Staudhammer et LeMay 2000, Temesgen et von Gadow 2004, Temesgen *et al.* 2007 et Temesgen *et al.* 2014). Ainsi, chacune des variables explicatives choisies pour une essence est assurée d'être corrélée à la hauteur de l'essence en question, et détient ses propres valeurs de paramètres. Par exemple, la température annuelle moyenne est présente pour seulement 7 des 20 essences, mais la valeur de son coefficient varie maintenant de 0,08 à 0,21, comparativement à une valeur unique de 0,09 dans le modèle de 2009. Un plus faible gradient nord-sud peut expliquer l'absence de cette variable pour certaines essences. L'étalonnage par essence a aussi permis d'inclure de nouvelles variables qui caractérisent la station, comme l'altitude, les précipitations totales annuelles, le sous-domaine bioclimatique, la végétation potentielle et le milieu physique. Celles-ci ont permis, en partie, de prévoir les hauteurs sur une plus grande étendue. D'autres variables, comme l'occurrence d'une perturbation légère, ne sont présentes que pour quelques essences.

Pour 3 types de variables, la variable explicative a changé dans le modèle de 2016 comparativement au modèle de 2009. Il s'agit du regroupement de régions écologiques, des caractéristiques physiques de la station et de l'indice de rang social.

Le regroupement des régions écologiques en 11 sous-domaines bioclimatiques s'est avéré une meilleure approche que les 4 regroupements de régions écologiques utilisés dans le modèle de 2009. Cette subdivision n'a été sélectionnée pour aucune essence, alors que le sous-domaine fait partie des variables explicatives pour 11 des 27 essences dans le modèle de 2016. La division en sous-domaines bioclimatiques est plus raffinée et permet de mieux prendre en compte les disparités régionales.

Le milieu physique est présent pour 10 essences dans le modèle de 2016. Cette variable décrit mieux le caractère physique de la station que la classe de drainage utilisée seule dans le modèle de 2009. En

effet, le milieu physique est une composante du type écologique qui intègre aussi l'épaisseur et la texture du dépôt.

Pour le rang social, le RDHP s'est avéré une meilleure variable explicative que l'indice social de Fortin *et al.* (2009b) et que le rapport entre la surface terrière des arbres ayant un DHP plus grand que celui de l'arbre mesuré et la surface terrière marchande dans la placette. Ces deux dernières variables n'ont été sélectionnées chacune que pour 2 essences sur les 20 qui incluaient une variable de rang social. La performance de plusieurs indices de rang social dans une même forme de modèle de prévision de la hauteur a rarement été comparée. Temesgen *et al.* (2007) ont comparé la surface terrière des arbres ayant un DHP plus grand que celui de l'arbre mesuré et un autre indice de compétition de cime des arbres plus grands pour 10 essences; l'indice de compétition de cime donnait alors de meilleurs résultats pour un plus grand nombre d'essences. Temesgen et von Gadow (2004) ont testé la surface terrière des arbres ayant un DHP plus grand que celui de l'arbre mesuré et le RDHP, mais dans des modèles de formes différentes. Huang et Titus (1994) n'ont testé que le RDHP, alors que Staudhammer et LeMay (2000) ont testé le rapport du DHP sur le DHP maximal des arbres de la placette. Finalement, Temesgen *et al.* (2014) n'ont testé que la surface terrière des arbres ayant un DHP plus grand que celui de l'arbre mesuré.

La végétation potentielle n'avait pas été testée dans le modèle de 2009 et s'avère être une variable explicative importante pour 15 essences dans le modèle de 2016. Elle exprime en partie la richesse du site, son exposition, sa pente et son altitude. Elle représente aussi une portion de territoire à l'échelle locale, ce qui explique peut-être son importance malgré la présence de variables climatiques ou d'une subdivision écologique dans le modèle (Saucier *et al.* 1998). Huang *et al.* (2000) ont introduit avec succès « l'écoregion » dans leur modèle pour l'épinette blanche (*Picea glauca* [Moench] Voss), une division représentant des conditions biogéoclimatiques différentes.

Tous les paramètres de base d'un modèle peuvent varier de placette en placette par l'ajout d'un effet aléatoire (Hall et Bailey 2001). Toutes les sources de corrélation devraient aussi être prises en compte dans le modèle (Weiskittel *et al.* 2011). Dans l'étude de Fortin *et al.* (2009b), un effort particulier avait été mis afin de bien modéliser l'incertitude associée aux prévisions de hauteur. Ainsi, un effet aléatoire de

placette et une structure de covariance avaient été ajoutés au modèle pour tenir compte des corrélations spatiales et temporelles. Fortin *et al.* (2009b) n'avaient réussi à mettre qu'un seul effet aléatoire de placette. Ils avaient choisi de le mettre sur le paramètre B_{ijk} et n'avaient pas réussi à ajouter un effet aléatoire de mesurage. Ceci pourrait en partie s'expliquer par la complexité d'un modèle étalonné simultanément pour l'ensemble des essences. Il était justifié de penser qu'un étalonnage par essence comme celui de la présente étude permettrait de tenir compte de ces deux aspects dans le modèle. Toutefois, l'ajustement aux essences individuelles présentait aussi des problèmes de convergence, et ce, pour toutes les essences. Tout comme dans le modèle de 2009, nous n'avons pas pu inclure simultanément tous les effets aléatoires dans le modèle de 2016. L'omission de l'effet aléatoire de mesurage entraîne un biais dans l'estimation de l'erreur type des paramètres (Weiskittel *et al.* 2011), ce qui influencera l'utilisation stochastique du modèle (pour le calcul d'intervalles de confiance), mais non l'utilisation déterministe (sans les effets aléatoires), qui est la plus répandue. De plus, la variance résiduelle et la corrélation temporelle avaient été modélisées en fonction du type d'essences (résineuses ou feuillues) dans le modèle de 2009. Dans la présente étude, toutes deux sont estimées plus finement, puisqu'on retrouve une erreur et une corrélation par essence. La corrélation spatiale a été modélisée à l'aide d'un effet aléatoire de placette, dont l'écart-type est pratiquement toujours plus petit dans la présente étude (moyenne de 0,17 pour le modèle de 2009, et de 0,002 à 0,045 de moins pour le modèle de 2016). Ceci pourrait s'expliquer par un plus grand nombre de variables explicatives à l'échelle de la placette dans le nouveau modèle. Il est important de modéliser le plus précisément possible l'incertitude associée aux prévisions de hauteur, en particulier lorsque le modèle est utilisé dans une simulation de croissance forestière et que les variances et les corrélations des modèles sont utilisées pour estimer un intervalle de confiance autour des prévisions.

Quelques mises en garde doivent être formulées concernant l'utilisation des relations HD de cette étude. Premièrement, ces relations ne devraient pas être utilisées pour estimer la hauteur des arbres dont le DHP est inférieur à 9 cm, puisque de tels arbres ne sont pas présents dans la base de données ayant servi à l'étalonnage des modèles. Deuxièmement, avec un ajustement pour chaque essence, le modèle peut se retrouver plus facilement en extrapolation

lorsqu'on l'utilise avec certaines essences moins abondantes, comme l'érable argenté. Il est aussi important de souligner que ce modèle empirique est basé sur des données observationnelles. Ce genre de modèle indique l'association entre les variables explicatives et la variable réponse, et non un lien de cause à effet. Ainsi, une variable explicative peut être retenue dans le modèle sans toutefois qu'il y ait une interprétation biologique.

5. Conclusion

Cette étude présente une nouvelle relation HD étalonnée par essence, inspirée du modèle de Fortin *et al.* (2009b). L'étalonnage séparé pour chacune des essences a permis de sélectionner des variables explicatives et des valeurs des coefficients propres à chacune. Ainsi, les prévisions sont légèrement plus précises, mais surtout, certains biais liés à l'essence sont réduits. Ceci a aussi permis d'estimer plus finement la variance résiduelle et la corrélation temporelle dans les modèles. De plus, l'ajout de plus de 100 000 observations et l'utilisation d'un seuil moins restrictif quant au nombre minimal d'observations par essence a permis d'étalonner une relation HD pour 27 essences, soit 7 de plus que dans le modèle de 2009. L'ajustement obtenu est aussi plus robuste et plus représentatif pour la majorité d'entre elles.

Cette étude a permis de confirmer qu'un indice de rang social est un facteur important pour estimer la hauteur d'un arbre, puisque cette variable est présente dans le modèle la plupart des essences. Le RDHP est un indice mieux corrélé à la hauteur que celui utilisé dans Fortin *et al.* (2009b). Comme dans l'étude de 2009, une subdivision écologique est nécessaire pour bien tenir compte de la variabilité climatique. L'incorporation du sous-domaine bioclimatique, qui comprend 11 regroupements au lieu de 4, permet une subdivision plus fine que précédemment. La végétation potentielle est une nouvelle variable explicative qui n'avait pas été testée dans le modèle de 2009. Son importance est attestée par sa présence dans le modèle pour 15 essences et par le fait qu'elle faisait souvent partie des variables explicatives les plus importantes du modèle de 2016. La végétation potentielle exprime en partie la richesse du site, son exposition, sa pente et son altitude, mais représente aussi une portion de territoire à l'échelle locale, ce qui explique peut-être son importance malgré la présence d'autres variables climatiques, d'une subdivision écologique, ou des deux.

Le modèle de relation HD de Fortin *et al.* (2009b) a été utilisé pour estimer la hauteur des arbres pour ensuite estimer leur volume à l'aide d'un tarif de cubage dans le calcul de la possibilité forestière de 2013–2018 (BFEC 2013). Le nouveau modèle présenté ici devrait être utilisé dans le prochain calcul, puisqu'il est plus robuste et généralement moins biaisé que le modèle de 2009.

Remerciements

Ces travaux ont été réalisés dans le cadre du projet interne 142332123 de la Direction de la recherche forestière (DRF). L'auteure remercie la Direction des inventaires forestiers du ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs pour les données, de même que M. Stéphane Tremblay de la DRF pour ses conseils sur l'interprétation du modèle. Elle remercie aussi M. Mathieu Fortin d'AgroParisTech, l'éditrice associée, Mme Marie-Claude Lambert, ainsi que les réviseurs anonymes pour leurs conseils et commentaires sur une version préliminaire de ce manuscrit, Mme Denise Tousignant pour l'édition du document, Mme Nathalie Langlois pour sa révision typographique et Mme Maripierre Jalbert pour sa mise en page.

Références bibliographiques

- Anderson, D.R., 2008. *Model based inference in the life sciences, a primer on evidence*. Springer, New York, NY (États-Unis). 184 p.
- Auger, I., (soumis). *Comparaison des prévisions des modèles de croissance forestière Natura-2009 et Natura-2014 sur une période de 30 ans*. Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de la recherche forestière, Note de recherche forestière.
- [BFEC] Bureau du forestier en chef, 2013. *Manuel de détermination des possibilités forestières 2013–2018*. Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Bureau du forestier en chef, Roberval, Québec. 247 p. [http://forestierenchef.gouv.qc.ca/wp-content/uploads/2013/01/MDPF_VF.pdf]
- Burnham, K.P. et D.R. Anderson, 2002. *Model selection and multimodel inference: a practical information-theoretic approach*, 2nd édition. Springer-Verlag. New York, NY (États-Unis). 488 p.
- Fortin, M. et L. Langevin, 2010. *ARTÉMIS-2009 : un modèle de croissance basé sur une approche par tiges individuelles pour les forêts du Québec*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Direction de la recherche forestière. Mémoire de recherche forestière n° 156. 48 p. [<https://www.mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Fortin-Mathieu/Memoire156.pdf>]
- Fortin, M., S. Bédard et J. DeBlois, 2009a. *SaMARE : un modèle par tiges individuelles destiné à la prévision de la croissance des érablières de structure inéquienne du Québec méridional*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Direction de la recherche forestière. Mémoire de recherche forestière n° 155. 43 p. [<https://www.mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Fortin-Mathieu/Memoire155.pdf>]
- Fortin, M., S. Bernier, J.-P. Saucier et F. Labbé, 2009b. *Une relation hauteur-diamètre tenant compte de l'influence de la station et du climat pour 20 essences commerciales du Québec*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Direction de la recherche forestière. Mémoire de recherche forestière n° 153. 22 p. [<https://www.mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Fortin-Mathieu/Memoire153.pdf>]
- Fortin, M., S. Tremblay et R. Schneider, 2014. *Evaluating a single tree-based growth model for even-aged stands against the maximum size-density relationship: Some insights from balsam fir stands in Quebec, Canada*. *For. Chron.* 90(4): 503–515.
- Hall, D.B. et R.L. Bailey, 2001. *Modeling and prediction of forest growth variables based on multilevel nonlinear mixed models*. *For. Sci.* 47(3): 311–321.
- Huang, S. et S.J. Titus, 1994. *An age-independent individual tree height prediction model for boreal spruce-aspen stands in Alberta*. *Can. J. For. Res.* 24: 1295–1301.
- Huang, S., S.J. Titus et D.P. Wiens, 1992. *Comparison of nonlinear height-diameter functions for major Alberta tree species*. *Can. J. For. Res.* 22: 1297–1304.
- Huang, S., D. Price et S.J. Titus, 2000. *Development of ecoregion-based height-diameter models for white spruce in boreal forests*. *For. Ecol. Manage.* 129: 125–141.

- Mehtätalo, L., S. de-Miguel et T.G. Gregoire, 2015. *Modeling height-diameter curves for prediction*. Can. J. For. Res. 45(7): 826–837.
- [MRN] Ministère des Ressources naturelles, 2013. *Le guide sylvicole du Québec, Tome 1. Les fondements biologiques de la sylviculture*. Ouvrage collectif sous la supervision de B. Boulet et M. Huot. Les Publications du Québec. Québec, QC. 1044 p.
- Pothier, D. et I. Auger, 2011. *NATURA-2009: un modèle de prévision de la croissance à l'échelle du peuplement pour les forêts du Québec*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Direction de la recherche forestière. Mémoire de recherche forestière n° 163. 56 p. [<https://www.mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Auger-Isabelle/Memoire163.pdf>]
- Power, H., 2016. *Comparaison des biais et de la précision des estimations des modèles Artémis-2009 et Artémis-2014 pour la surface terrière totale des peuplements forestiers, avec et sans coupe partielle, sur une période de 40 ans*. Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de la recherche forestière. Note de recherche forestière n° 143. 21 p. [<https://www.mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Power-Hugues/Note143.pdf>]
- SAS Institute Inc., 2011. *SAS/STAT® 9.3 User's guide*. SAS Institute Inc. Cary, NC (États-Unis). 8 621 p.
- Saucier, J.-P., J.F. Bergeron, P. Grondin et A. Robitaille, 1998. *Les régions écologiques du Québec méridional : un élément du système hiérarchique de classification écologique du territoire mis au point par le ministère des Ressources naturelles*. L'Aubelle 124(février-mars): 1–12.
- Schwarz, G.E., 1978. *Estimating the dimension of a model*. Ann. Stat. 6(2): 461–464.
- Sharma, M., 2016. *Comparing height-diameter relationships of boreal species grown in plantations and natural stands*. For. Sci. 62(1): 70–77.
- Staudhammer, C. et V. LeMay, 2000. *Height prediction equations using diameter and stand density measures*. For. Chron. 76(2): 303–309.
- Temesgen, H. et K. von Gadow, 2004. *Generalized height-diameter models — an application for major tree species in complex stands of interior British Columbia*. Eur. J. For. Res. 123(1): 45–51.
- Temesgen, H., D.W. Hann et V.J. Monleon, 2007. *Regional height-diameter equations for major tree species of Southwest Oregon*. West. J. Appl. For. 22(3): 213–219.
- Temesgen, H., C.H. Zhang et X.H. Zhao, 2014. *Modelling tree height-diameter relationships in multi-species and multi-layered forests: A large observational study from Northeast China*. For. Ecol. Manage. 316: 78–89.
- Weiskittel, A.R., D.W. Hann, J.A. Kershaw, Jr. et J.K. Vancley, 2011. *Forest growth and yield modeling*. John Wiley & Sons. West Sussex (Royaume-Uni). 430 p.
- Yuancai, L. et B.R. Parresol, 2001. *Remarks on height-diameter modeling*. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Southeastern Forest Experiment Station. Asheville, NC (États-Unis). Res. Note SRS-10. 8 p. [http://www.srs.fs.usda.gov/pubs/rn/rn_srs010.pdf]

Annexe 1. Estimation des paramètres des effets continus et des composantes de la variance du modèle [1] pour chacune des essences. L'erreur type est fournie entre parenthèses. LDHP : $\ln(DHP+1)$; LDHP2 : $[\ln(DHP+1)]^2$; ST : surface terrière; TMOY : température annuelle moyenne; RDHP : rapport du DHP de l'arbre sur le DHP moyen quadratique des arbres de la placette; PTOT : précipitations totales annuelles; ALT : altitude. Les codes des essences sont définis au tableau 1.

Exemple d'utilisation de l'équation [1] avec les paramètres des annexes 1 à 4 pour estimer la hauteur d'une épinette blanche (EPB) (les variables ont été fixées aux valeurs suivantes : DHP de l'arbre : 20 cm. Caractéristiques de la placette : surface terrière marchande de 20 m²/ha, diamètre moyen quadratique de 15 cm, sous-domaine bioclimatique 1, végétation potentielle FC1 et température annuelle moyenne de 2,3 °C) :

$$h = 1,3 + (A) \ln(DHP + 1) + (B) (\ln(DHP + 1))^2$$

$$h = 1,3 + (a_{LDHP} + a_{LDHP \times ST} \times ST + a_{LDHP \times RDHP} \times RDHP + a_{LDHP \times TMOY} \times TMOY + a_{LDHP \times SDOM_1} + a_{LDHP \times TP_{FC1}}) \ln(DHP + 1) + (b_{LDHP2}) (\ln(DHP + 1))^2$$

$$\hat{h} = 1,3 + (-2,9051 + 0,0252 \times 20 - 0,2230 \times (20/15) + 0,0789 \times 2,3 - 0,3581 - 0,4203) \ln(20 + 1) + (2,2411) (\ln(20 + 1))^2$$

$$\hat{h} = 1,3 + (-3,2954) \ln(21) + (2,2411) (\ln(21))^2 = 12,0 \text{ m}$$

Variable	Code de l'essence													
	BOG	BOJ	BOP	CET	CHR	EPB	EPN	EPR	ERA	ERR	ERS	FRA	FRN	HEG
LDHP	3,6064 (0,0722)	1,9554 (0,1418)	2,0592 (0,1246)	1,1203 (0,3272)	1,9371 (0,1985)	-2,9051 (0,1421)	-1,9456 (0,0769)	-0,5829 (0,2265)	1,6134 (0,6278)	1,6051 (0,1397)	0,9622 (0,1415)	1,8386 (0,3402)	0,4803 (0,2952)	0,1545 (0,1643)
LDHP2		0,8393 (0,0307)	1,0676 (0,0263)	0,9192 (0,1190)	0,7447 (0,0667)	2,2411 (0,0313)	2,5776 (0,0208)	2,4513 (0,0711)	0,9252 (0,2270)	0,9712 (0,0375)	1,2836 (0,0291)	0,8570 (0,1130)	1,6124 (0,1148)	1,9146 (0,0773)
LDHP×ST	0,0571 (0,0044)	0,0201 (0,0008)	0,0270 (0,0006)	0,0364 (0,0051)	0,0287 (0,0033)	0,0252 (0,0007)	0,0255 (0,0004)	0,0174 (0,0013)	0,0426 (0,0088)	0,0273 (0,0009)	0,0138 (0,0008)	0,0383 (0,0051)	0,0236 (0,0022)	0,0152 (0,0020)
LDHP×RDHP		-0,4591 (0,0275)	-0,4798 (0,0258)			-0,2230 (0,0276)	-0,5650 (0,0195)	-0,6438 (0,0692)		-0,4936 (0,0375)	-0,7129 (0,0283)		-0,6399 (0,1143)	-0,8702 (0,0795)
LDHP×ALT			-0,0013 (0,0001)										-0,0019 (0,0004)	-0,0015 (0,0002)
LDHP×PTOT		-0,0005 (0,0001)	-0,0005 (0,0001)				-0,0010 (0,0001)	-0,0019 (0,0002)		-0,0005 (0,0001)	-0,0006 (0,0001)			
LDHP×TMOY		0,1560 (0,0096)				0,0789 (0,0129)	0,0995 (0,0059)			0,2063 (0,0070)	0,2021 (0,0132)			
Écart-type de l'effet aléatoire	0,1831	0,1161	0,1612	0,0991	0,1842	0,1579	0,1363	0,1322	0,1328	0,1413	0,1280	0,2102	0,1767	0,1219
Corrélation	0,9161	0,9511	0,9559	0,9460	0,9331	0,9653	0,9779	0,9669	0,9778	0,9451	0,9473	0,9078	0,9511	0,9581
Écart-type résiduel	1,1705	1,7708	1,5371	1,7375	1,7149	1,5915	1,2800	1,5089	2,7886	1,6747	1,8276	1,6138	1,5801	2,1353

Annexe 1. (suite et fin)

Variable	Code de l'essence												
	MEL	ORA	OSV	PEB	PEG	PET	PIB	PIG	PIR	PRU	SAB	THO	TIL
LDHP	-1,2526 (0,2728)	-0,3989 (0,3317)	2,8740 (0,3055)	-0,3076 (0,3009)	0,0416 (0,2430)	0,8297 (0,1422)	-2,7072 (0,5350)	-1,7066 (0,1264)	-3,6956 (0,4180)	-0,8684 (0,3129)	-1,5606 (0,0594)	-0,8473 (0,1730)	-1,6552 (0,3600)
LDHP2	2,0186 (0,1443)	1,4613 (0,1201)	0,5118 (0,1176)	1,7229 (0,1532)	1,9788 (0,1184)	1,7366 (0,0349)	2,1884 (0,0782)	2,2022 (0,0454)	2,6566 (0,1799)	1,9581 (0,0763)	1,9714 (0,0175)	1,3189 (0,0313)	2,4944 (0,1721)
LDHP×ST	0,0488 (0,0024)	0,0377 (0,0047)	0,0207 (0,0031)	0,0261 (0,0030)	0,0278 (0,0027)	0,0355 (0,0008)	0,0361 (0,0019)	0,0618 (0,0010)	0,0366 (0,0036)	0,0131 (0,0016)	0,0281 (0,0003)	0,0111 (0,0005)	0,0149 (0,0038)
LDHP×RDHP	-0,7977 (0,1298)			-0,7142 (0,1510)	-1,1132 (0,1030)	-0,8192 (0,0331)	-0,5275 (0,0583)	-1,1626 (0,0447)	-0,8352 (0,1599)	-0,3504 (0,0710)	-0,0842 (0,0176)	-0,2594 (0,0288)	-1,0393 (0,1625)
LDHP×ALT											-0,0004 (0,00003)		
LDHP×PTOT						-0,0010 (0,0001)				-0,0011 (0,0002)	-0,0004 (0,00005)	-0,0008 (0,0001)	
LDHP×TMOY						0,0791 (0,0158)						0,1504 (0,0145)	
Écart-type de l'effet aléatoire	0,1795	0,1356	0,1773	0,1932	0,1639	0,1577	0,1778	0,1625	0,2170	0,1186	0,1361	0,0906	0,1682
Corrélation	0,9583	0,8942	0,9498	0,8993	0,9334	0,9324	0,9710	0,9657	0,9523	0,9729	0,9663	0,9668	0,9669
Écart-type résiduel	1,4774	1,6740	1,4952	1,4449	1,7376	1,5415	1,9791	1,2962	1,6114	1,7829	1,4453	1,1641	2,0367

Annexe 2. Estimation des paramètres associés au milieu physique (MP) et à la perturbation légère (PERT) du modèle [1] pour chacune des essences. L'erreur type est fournie entre parenthèses. LDHP : $\ln(\text{DHP}+1)$. La valeur du paramètre associée à un groupe de classes est répétée pour chacune des classes qui le constituent. Les codes des essences sont définis au tableau 1.

Variable	Classe	Code de l'essence													
		BOG	BOJ	BOP	CET	CHR	EPB	EPN	EPR	ERA	ERR	ERS	FRA	FRN	HEG
LDHP×MP	0			0,0612 (0,0775)		-0,5625 (0,0728)		-0,1340 (0,0755)			-0,1717 (0,0302)		-0,2117 (0,1784)		
	1			0,2775 (0,0751)		0		-0,1108 (0,0748)			0		0,4980 (0,1410)		
	2			0,2276 (0,0719)		0		-0,1113 (0,0737)			0		0,4980 (0,1410)		
	3			0,0465 (0,0743)		0		-0,1861 (0,0756)			0		0,4980 (0,1410)		
	4			0,1152 (0,0944)				0,0331 (0,0770)			0				
	5			0,1723 (0,0741)		0		-0,0364 (0,0742)			0		0		
	6			0,0337 (0,0796)		0		-0,1197 (0,0754)			0		0		
	7			0				0,0047 (0,0221)			-0,1717 (0,0302)				
	8			0				-0,1684 (0,0223)			-0,1717 (0,0302)		0		
9			0				0			-0,1717 (0,0302)					
LDHP×PERT	Anthropique			0,0581 (0,0152)				0,0006 (0,0127)			0,0458 (0,0150)				
	Naturelle			-0,0688 (0,0110)				0,0423 (0,0059)			-0,0944 (0,0209)				
	Aucune			0				0			0				

Annexe 2. (suite et fin)

Variable	Classe	Code de l'essence												
		MEL	ORA	OSV	PEB	PEG	PET	PIB	PIG	PIR	PRU	SAB	THO	TIL
LDHP-xMP	0			-0,4258 (0,0873)		-0,5188 (0,0891)	-0,2701 (0,0469)		-0,1981 (0,1020)			0		
	1			0		0,3346 (0,0849)	0		0,0890 (0,0952)			0,0643 (0,0095)		
	2			0		0	0		-0,0791 (0,0952)			0,0643 (0,0095)		
	3			0		0	0		-0,1622 (0,1047)			0		
	4			0		0	0		0,0986 (0,1203)			0,0643 (0,0095)		
	5			0		0	0		0,0298 (0,1052)			0,0643 (0,0095)		
	6			0		0	0		-0,2353 (0,1013)			0		
	7						0		0,0104 (0,1333)			0,0643 (0,0095)		
	8			0		0	0		0			0		
9						0		0			0			
LDHP-xPERT	Anthropique							0,2746 (0,0371)	0,1418 (0,0284)					
	Naturelle							0,0546 (0,0430)	0,2422 (0,0271)					
	Aucune							0	0					

Annexe 3. Estimation des paramètres associés au sous-domaine bioclimatique (SDOM) du modèle [1] pour chacune des essences. L'erreur type est fournie entre parenthèses. LDHP : $\ln(DHP+1)$. La valeur du paramètre associée à un groupe de classes est répétée pour chacune des classes qui le constituent. Les codes des essences sont définis au tableau 1.

Variable	Classe	Code de l'essence													
		BOG	BOJ	BOP	CET	CHR	EPB	EPN	EPR	ERA	ERR	ERS	FRA	FRN	HEG
LDHP×SDOM	1			0,3775 (0,0670)			-0,3581 (0,1439)	-0,4758 (0,0696)				0,1411 (0,0758)		-0,1396 (0,1545)	
	2est			0,3775 (0,0670)			-0,4839 (0,1293)	-0,4758 (0,0696)				0,1831 (0,0570)		-0,2358 (0,1305)	
	2ouest			0,3775 (0,0670)			-0,2006 (0,1207)	-0,4758 (0,0696)				0,1625 (0,0482)		0,0684 (0,1128)	
	3est			0,2791 (0,0537)			-0,2927 (0,1031)	-0,3559 (0,0379)				0,0988 (0,0336)		-0,0112 (0,0994)	
	3ouest			0,4841 (0,0504)			0,0503 (0,1018)	-0,0313 (0,0297)				0,1925 (0,0301)		0,3258 (0,0811)	
	4est			-0,1531 (0,0505)			-0,2749 (0,0933)	-0,3379 (0,0246)				0,2403 (0,0314)		-0,6024 (0,1176)	
	4ouest			0,2058 (0,0465)			-0,0421 (0,0920)	0,0176 (0,0187)				0		0	
	5est			-0,2629 (0,0520)			-0,3249 (0,0884)	-0,4577 (0,0216)				0,2403 (0,0314)		-0,6024 (0,1176)	
	5ouest			0,1735 (0,0468)			0,0182 (0,0899)	0,0567 (0,0138)				0		0	
	6est			-0,3561 (0,0665)			0	-0,2835 (0,0175)							
6ouest			0			0,0182 (0,0899)	0								

Annexe 3. (suite et fin)

Variable	Classe	Code de l'essence												
		MEL	ORA	OSV	PEB	PEG	PET	PIB	PIG	PIR	PRU	SAB	THO	TIL
LDHP×SDOM	1	0,3354 (0,1089)					-0,0687 (0,1161)	0,0345 (0,5189)	-0,3259 (0,0928)			0,2290 (0,0564)	0,1069 (0,0884)	
	2est	0,3354 (0,1089)					-0,0015 (0,1021)	0,1490 (0,5237)	-0,3259 (0,0928)			0,0824 (0,0382)	0,3939 (0,0713)	
	2ouest	0,3354 (0,1089)					0,1860 (0,1028)	-0,2485 (0,5200)	-0,3259 (0,0928)			0,2613 (0,0425)	0,5752 (0,0709)	
	3est	0,1654 (0,1283)					0,0090 (0,0742)	-0,0039 (0,5214)	-0,1071 (0,0935)			0,1414 (0,0304)	0,5074 (0,0541)	
	3ouest	0,7818 (0,1391)					0,2436 (0,0741)	0,3715 (0,5137)	0,1384 (0,0772)			0,3355 (0,0293)	0,5729 (0,0526)	
	4est	-0,1150 (0,1084)					-0,0990 (0,0604)	-0,0039 (0,5214)	-0,1582 (0,0453)			-0,1459 (0,0293)	0,4133 (0,0467)	
	4ouest	0,5527 (0,1040)					0,1667 (0,0574)	-0,0898 (0,5159)	0,1932 (0,0356)			0,2130 (0,0274)	0,5271 (0,0486)	
	5est	-0,4028 (0,1353)					-0,1473 (0,0675)	-0,0039 (0,5214)	-0,6862 (0,1418)			-0,1649 (0,0294)	0	
	5ouest	0,3749 (0,0917)					0,0609 (0,0467)	0	0,1378 (0,0276)			0,1754 (0,0278)	0,5271 (0,0486)	
	6est	-0,5346 (0,1462)					-0,2643 (0,1256)		-0,2127 (0,0778)			-0,4063 (0,0305)		
	6ouest	0					0		0			0	0,5271 (0,0486)	

Annexe 4. Estimation des paramètres associés à la végétation potentielle (VP) du modèle [1] pour chacune des essences. L'erreur type est fournie entre parenthèses. LDHP : $\ln(\text{DHP}+1)$. La valeur du paramètre associée à un groupe de classes est répétée pour chacune des classes qui le constituent. Les codes des essences sont définis au tableau 1.

Variable	Classe	Code de l'essence													
		BOG	BOJ	BOP	CET	CHR	EPB	EPN	EPR	ERA	ERR	ERS	FRA	FRN	HEG
LDHP×VP	FC1			0,2976 (0,0315)			-0,4203 (0,1263)	-0,3645 (0,0812)	-0,2725 (0,0485)		0,0553 (0,0746)	0,0779 (0,0784)			
	FE1	0,5330 (0,0827)	0,2976 (0,0315)	0,4887 (0,0958)			-0,2619 (0,0997)	-0,2725 (0,0485)			0,3151 (0,0714)	0,3451 (0,1098)		0,7032 (0,1248)	
	FE2	0,5330 (0,0827)	0,2976 (0,0315)	0,4887 (0,0958)			-0,2619 (0,0997)	-0,3645 (0,0812)	-0,2725 (0,0485)		0,3151 (0,0714)	0,5260 (0,0724)		0,7032 (0,1248)	
	FE3	0,4023 (0,0670)	0,2976 (0,0315)	0,4887 (0,0958)			-0,2619 (0,0997)	-0,3645 (0,0812)	-0,2725 (0,0485)		0,3248 (0,0638)	0,4464 (0,0705)		0,7032 (0,1248)	
	FE4	0,4868 (0,1052)	0,2976 (0,0315)				-0,2619 (0,0997)	-0,2725 (0,0485)			0,4889 (0,1183)	0,5132 (0,0891)		0,7032 (0,1248)	
	FE5	0,2206 (0,1202)	0,2976 (0,0315)	0,4887 (0,0958)			-0,4203 (0,1263)				0,4532 (0,1250)	0,4100 (0,0790)		0,7032 (0,1248)	
	FE6	0,2206 (0,1202)	0,2976 (0,0315)	0,4887 (0,0958)			-0,4203 (0,1263)	-0,3645 (0,0812)	-0,2725 (0,0485)		0,0553 (0,0746)	0,0779 (0,0784)		0,7032 (0,1248)	
	FO1	0,0663 (0,0939)	0,0362 (0,0343)	0,4887 (0,0958)			-0,1174 (0,1216)				0,2242 (0,0967)	0,0141 (0,0856)		0,3218 (0,1105)	
	ME1		0				-0,1174 (0,1216)	0,0930 (0,0780)							
	MF1	0,0663 (0,0939)	0,0362 (0,0343)	0			-0,1174 (0,1216)	-0,2675 (0,0773)	-0,1571 (0,0337)		0,2242 (0,0967)	0,0141 (0,0856)		0,3218 (0,1105)	
	MJ1	0,2429 (0,0674)	0,0362 (0,0343)	0			-0,1978 (0,0992)	-0,3645 (0,0812)	-0,2725 (0,0485)		0,1543 (0,0645)	0,1169 (0,0753)		0,4392 (0,1271)	
	MJ2	0,0898 (0,0668)	-0,0431 (0,0220)	0			-0,1348 (0,0959)	-0,2675 (0,0773)	-0,1571 (0,0337)		0,0530 (0,0627)	0,0141 (0,0856)		0,2988 (0,1185)	
	MS1	0,0400 (0,0696)	0,0634 (0,0230)	0			-0,0641 (0,0978)	-0,3645 (0,0812)	-0,1571 (0,0337)		0,1528 (0,0665)	0,0281 (0,0874)		0,2026 (0,1408)	
	MS2	-0,1557 (0,1205)	0	0			-0,1112 (0,0953)	-0,1925 (0,0742)	-0,1571 (0,0337)		-0,1587 (0,0727)	-0,2205 (0,1116)		0,2026 (0,1408)	
	MS4		0				-1,3478 (0,1824)	-0,3292 (0,1351)			0,0021 (0,0706)				
	MS6	0,0400 (0,0696)	0,0257 (0,0331)				-0,2834 (0,1055)	-0,2744 (0,0842)	-0,1571 (0,0337)		0,0021 (0,0706)	-0,2205 (0,1116)		0,2026 (0,1408)	
	MS7														

Annexe 4. (suite)

Variable	Classe	Code de l'essence													
		BOG	BOJ	BOP	CET	CHR	EPB	EPN	EPR	ERA	ERR	ERS	FRA	FRN	HEG
LDHP×VP	RB1	0,0400 (0,0696)		-0,4813 (0,0761)	0		-0,5389 (0,1028)	-0,0531 (0,1436)	-0,1571 (0,0337)		0,1528 (0,0665)	-0,2205 (0,1116)			
	RB2			-0,4813 (0,0761)			-0,5389 (0,1028)	-0,5191 (0,1028)							
	RB5			-0,4813 (0,0761)			-0,4336 (0,1066)	-0,5191 (0,1028)							
	RC3	-0,3645 (0,1034)		-0,4813 (0,0761)			-0,3682 (0,1097)	-0,4653 (0,0409)	0		-0,1358 (0,1121)		-0,1678 (0,1418)		
	RE1			-0,3652 (0,0422)			-0,2213 (0,1240)	0,0060 (0,0763)	0						
	RE2	-0,1659 (0,0736)		-0,3652 (0,0422)	0		-0,2213 (0,1240)	0,1127 (0,0731)	0		-0,0539 (0,1254)	-0,2205 (0,1116)		-0,1678 (0,1418)	
	RE3	-0,3645 (0,1034)		-0,4813 (0,0761)			-0,1921 (0,1113)	0,1003 (0,0230)	0		-0,1706 (0,1168)		-0,1678 (0,1418)		
	RE4							-0,3292 (0,1351)							
	RE7			-0,3652 (0,0422)				-0,5191 (0,1028)							
	RP1	0		-0,1663 (0,0552)	0		-0,3580 (0,1084)	-0,0679 (0,0875)	-0,1571 (0,0337)		0,0179 (0,0750)	0			
	RS1	-0,1659 (0,0736)		-0,3146 (0,0329)	0		-0,1411 (0,0990)	-0,2771 (0,0737)	0		-0,1510 (0,0713)	-0,2205 (0,1116)	0		
	RS2	-0,1659 (0,0736)		-0,2318 (0,0241)	0		-0,0579 (0,0999)	-0,0490 (0,0731)	0		-0,1298 (0,0886)	-0,2205 (0,1116)	0,2026 (0,1408)		
	RS3	-0,3645 (0,1034)		-0,3616 (0,0874)	0		-0,1921 (0,1113)	0	0		-0,1706 (0,1168)	-0,2205 (0,1116)	-0,1678 (0,1418)		
	RS4			0			-1,3478 (0,1824)	-0,3292 (0,1351)							
	RS5	-0,1659 (0,0736)		-0,1737 (0,0822)	0		0	-0,0490 (0,0731)	0		-0,0286 (0,0873)	-0,2205 (0,1116)			
	RS7						-0,4336 (0,1066)	-0,5191 (0,1028)							
	RT1	0		-0,1663 (0,0552)	0		-0,3580 (0,1084)	-0,2675 (0,0773)	-0,1571 (0,0337)		0	0	0,2988 (0,1185)		

Annexe 4. (suite)

Variable	Classe	Code de l'essence												
		MEL	ORA	OSV	PEB	PEG	PET	PIB	PIG	PIR	PRU	SAB	THO	TIL
LDHPxVP	FC1				0,4209 (0,0887)	0,4037 (0,0724)	0,2312 (0,1043)				-0,2413 (0,0485)	-0,2777 (0,0192)		
	FE1					0,4037 (0,0724)	0,3727 (0,0820)				-0,2413 (0,0485)	-0,2777 (0,0192)	-0,0814 (0,0411)	
	FE2				0,4209 (0,0887)	0,4037 (0,0724)	0,3727 (0,0820)				-0,2413 (0,0485)	-0,2777 (0,0192)	-0,0814 (0,0411)	
	FE3				0,4209 (0,0887)	0,4037 (0,0724)	0,4787 (0,0524)				-0,2413 (0,0485)	-0,2777 (0,0192)	-0,0814 (0,0411)	
	FE4						0,4787 (0,0524)					-0,2777 (0,0192)		
	FE5				0,4209 (0,0887)	0,4037 (0,0724)	0,2312 (0,1043)				-0,2413 (0,0485)	-0,2777 (0,0192)	-0,0814 (0,0411)	
	FE6				0,4209 (0,0887)	0,4037 (0,0724)	0,2312 (0,1043)				-0,2413 (0,0485)	-0,2777 (0,0192)	-0,0814 (0,0411)	
	FO1				0,4209 (0,0887)	0,2104 (0,0770)	0,0663 (0,1004)				-0,2413 (0,0485)	-0,2331 (0,0415)	-0,0814 (0,0411)	
	ME1				0,4209 (0,0887)		0,1082 (0,0490)					-0,2331 (0,0415)		
	MF1				0,4209 (0,0887)		0,0663 (0,1004)				-0,2413 (0,0485)	-0,2331 (0,0415)	-0,0814 (0,0411)	
	MJ1				0,4209 (0,0887)	0,2104 (0,0770)	0,2912 (0,0590)				-0,2413 (0,0485)	-0,1681 (0,0195)	0,0200 (0,0223)	
	MJ2				0,4209 (0,0887)	0,2104 (0,0770)	0,2565 (0,0411)				-0,2413 (0,0485)	-0,0659 (0,0138)	0,0200 (0,0223)	
	MS1				0,4209 (0,0887)	0,2104 (0,0770)	0,3828 (0,0461)				-0,2413 (0,0485)	0,0745 (0,0146)	0,0200 (0,0223)	
	MS2				0,4209 (0,0887)	0	0,1993 (0,0297)				-0,2413 (0,0485)	0	0,0200 (0,0223)	
MS4											-1,1349 (0,0931)			
MS6				0,4209 (0,0887)	0,2104 (0,0770)	0,1134 (0,0474)					-0,1541 (0,0231)	0,0200 (0,0223)		
MS7											-0,7401 (0,0548)			

Annexe 4. (suite et fin)

Variable	Classe	Code de l'essence												
		MEL	ORA	OSV	PEB	PEG	PET	PIB	PIG	PIR	PRU	SAB	THO	TIL
LDHP×VP	RB1				0,4209 (0,0887)		0,1993 (0,0297)				-0,2413 (0,0485)	-0,2663 (0,0664)	0,0200 (0,0223)	
	RB2											-0,7401 (0,0548)		
	RB5				0,4209 (0,0887)		0,1993 (0,0297)					-0,7401 (0,0548)		
	RC3				0	0	-0,1942 (0,0889)				-0,2413 (0,0485)	-0,4012 (0,0310)	-0,1651 (0,0221)	
	RE1						-0,1930 (0,0527)					-0,2914 (0,0256)		
	RE2				0	0	-0,1930 (0,0527)					-0,2914 (0,0256)	-0,1215 (0,0343)	
	RE3						-0,1942 (0,0889)				-0,2413 (0,0485)	-0,2121 (0,0394)	-0,1215 (0,0343)	
	RE4											-0,3639 (0,1347)		
	RE7											-0,7401 (0,0548)		
	RP1				0	0	-0,0199 (0,0846)				-0,2413 (0,0485)	-0,1481 (0,0295)	-0,1215 (0,0343)	
	RS1				0	0	0,0227 (0,0656)				-0,2413 (0,0485)	-0,1942 (0,0184)	0	
	RS2				0	0	0					-0,0984 (0,0133)	-0,1215 (0,0343)	
	RS3				0		-0,1942 (0,0889)				-0,2413 (0,0485)	-0,0671 (0,0242)	-0,1215 (0,0343)	
	RS4											-0,3639 (0,1347)		
	RS5				0	0	0				-0,2413 (0,0485)	-0,0158 (0,0329)	-0,1215 (0,0343)	
	RS7											-0,7401 (0,0548)		
RT1					0	-0,0199 (0,0846)				0	-0,1481 (0,0295)	-0,1215 (0,0343)		



La Direction de la recherche forestière a pour mandat de participer activement à l'orientation de la recherche et à l'amélioration de la pratique forestière au Québec, dans un contexte d'aménagement forestier durable, en réalisant des travaux de recherche scientifique appliquée. Elle développe de nouvelles connaissances, du savoir-faire et du matériel biologique et contribue à leur diffusion ou leur intégration au domaine de la pratique. Elle subventionne aussi des recherches en milieu universitaire, le plus souvent dans des créneaux complémentaires à ses propres travaux.

**Forêts, Faune
et Parcs**

Québec



ISSN 0834-4833
ISBN : 978-2-550-77355-9
ISBN (pdf) : 978-2-550-77356-6
G.F.D.C. 522.3--015.5 (714)
L.C. SD 387.M33
Dépôt légal 2016
Bibliothèque nationale du Québec
© 2016 Gouvernement du Québec