



## Modèles régionalisés de répartition des volumes de bois par classes de qualité des billes pour l'érable à sucre et le bouleau jaune

Filip Havreljuk, ing.f., Ph. D., François Guillemette, ing.f., M. Sc.

Isabelle Auger, stat. ASSQ, M. Sc. et Steve Bédard, ing.f., M. Sc.

### Résumé

Jusqu'à présent, la qualité et la quantité des billes issues de l'érable à sucre (*Acer saccharum*; ERS) et du bouleau jaune (*Betula alleghaniensis*; BOJ) étaient estimées par des modèles n'utilisant que des variables à l'échelle de l'arbre, sans tenir compte de la provenance ou du milieu de croissance. Avec un échantillon comprenant 2282 ERS et 1971 BOJ issus respectivement de 28 et de 29 peuplements répartis à travers la forêt tempérée du Québec, nous avons évalué si l'ajout de variables explicatives climatiques et écologiques pouvait améliorer l'ajustement des modèles. D'après nos résultats, les prévisions de la qualité et de la quantité des billes varient selon les caractéristiques de l'arbre et la région, et les meilleurs modèles intègrent le diamètre à hauteur de poitrine (DHP), la classe de qualité de l'arbre (ABCD) et le groupe de régions écologiques. Pour l'ERS, à diamètre égal, le volume de billes de sciage conventionnel était le plus grand dans le sud-ouest de la province (régions écologiques 2a, 3a et 3b). Toujours à DHP égal, les ERS produisent en moyenne de 2 à 3 fois moins de volume de billes de sciage conventionnel dans le domaine bioclimatique de la sapinière à bouleau jaune que plus au sud. Pour le BOJ, les plus gros volumes de billes de bois d'œuvre ont été observés dans les régions écologiques 3c et 3d (sous-domaine de l'érablière à bouleau jaune de l'Est) ainsi que 4c (sous-domaine de la sapinière à bouleau jaune de l'Ouest) et les plus petits, dans le sous-domaine de la sapinière à bouleau jaune de l'Est. L'intégration dans divers outils de planification forestière de ces nouveaux modèles, généralement plus précis et moins biaisés que les précédents, améliorera l'estimation des volumes des billes par classes de qualité pour l'ERS et le BOJ.

Mots-clés : billes de sciage, classe de qualité, feuillu, modélisation, produits, qualité des billes

### Abstract

*Until now, the quality and quantity of logs obtained from sugar maple (*Acer saccharum*) and yellow birch (*Betula alleghaniensis*) trees were assessed based on models using exclusively tree-level variables, without regard to origin or growing environment. Using a sample consisting of 2282 sugar maples and 1971 yellow birches originating respectively from 28 and 29 stands distributed throughout the temperate forests of Québec, we tested whether adding climatic and ecological explanatory variables could enhance model fit. Our results indicate that product quality and quantity predictions varied according to both individual tree characteristics and region, and that the best models for estimating log volumes include diameter at breast height (DBH), stem quality class (ABCD), and group of ecological regions as variables. For sugar maple, at a given DBH, conventional sawlog yield was highest in the southwest part of the province (ecological regions 2a, 3a, and 3b). Moreover, at a given DBH, sugar maples from ecological regions within the yellow birch–balsam fir bioclimatic domain presented, on average, 2 to 3 times less conventional sawing volume than those from regions further south. For yellow birch, the biggest volumes of lumber were observed in ecological regions 3c and 3d (eastern sugar maple–yellow birch subdomain) as well as 4c (western yellow birch–balsam fir subdomain), while the smallest volumes were observed in ecological regions of the eastern yellow birch–balsam fir subdomain. Overall, the new models are more precise and less biased than the previous ones. Their integration into various forest planning tools will help improve estimations of log volume volumes by quality class for sugar maple and yellow birch stems.*

Keywords : hardwood, log grades, modelling, products, quality class, sawlog

Ministère des Ressources naturelles et des Forêts  
Direction de la recherche forestière  
2700, rue Einstein  
Québec (Québec) G1P 3W8  
Téléphone : 418 643-7994  
Télécopieur : 418 643-2165  
Courriel : [recherche\\_forestiere@mrnf.gouv.qc.ca](mailto:recherche_forestiere@mrnf.gouv.qc.ca)  
Site Web : [recherche\\_forestiere.gouvernementale](http://recherche_forestiere.gouvernementale)

## 1. Introduction

Les forêts tempérées décidues et mixtes représentent plus de 16 % de la superficie totale des terres forestières productives du Québec, et les espèces feuillues comptent pour environ 26 % du volume marchand brut total (MRNF 2022). Leurs principales utilisations économiques sont l'acériculture et la production du bois d'œuvre. Le bois d'œuvre de qualité supérieure est utilisé principalement pour la fabrication des produits d'apparence tels des meubles, planchers, armoires et moulures, tandis que le bois de moindre qualité est utilisé pour la fabrication de palettes ou comme bois de trituration pour la production de pâte à papier. Conséquemment, l'évaluation des produits tronçonnés issus des arbres feuillus joue un rôle crucial dans la description et dans l'allocation des bois destinés aux usines de transformation, de même que dans l'estimation de la valeur des arbres sur pied. Cette évaluation est essentielle pour guider les choix d'aménagement forestier afin d'assurer un approvisionnement en bois adéquat de la filière de feuillus durs.

Au cours des dernières années, plusieurs modèles ont été conçus pour estimer les volumes par classes de qualité des billes selon différents systèmes de classement de qualité et de vigueur des arbres, tant pour l'érable à sucre (*Acer saccharum* Marshall; ERS) et le bouleau jaune (*Betula alleghaniensis* Britton; BOJ) (Fortin et al. 2009a) que pour d'autres espèces feuillues (Bédard et al. 2017, Havreljuk et al. 2015a). D'autres études ont évalué comment les défauts de tige influencent la valeur des arbres feuillus nord-américains (Cecil-Cockwell et Caspersen 2015, Cockwell et Caspersen 2014, Havreljuk et al. 2014). Ces travaux ont permis de décrire l'effet des caractéristiques des arbres sur la qualité et la valeur de leurs produits. Cependant, ils n'ont pas directement considéré l'effet du site — pourtant variable à l'échelle de la province — sur la qualité des bois récoltés (Hasegawa et al. 2015, Havreljuk et al. 2013). Guillemette et Bédard (2019) ont observé que le potentiel de l'ERS à produire des troncs de haute qualité était plus faible à la limite nord de son aire de répartition, ce qui pourrait s'expliquer par une baisse de sa croissance (Boakye et al. 2023, Voyer et al. 2024). À l'échelle opérationnelle, des écarts entre les volumes de feuillus attribués et ceux réellement récoltés ont également été rapportés dans certaines régions de la province (Guillemette et al. 2021). Ces écarts pourraient être attribuables, entre autres, à des méthodes biaisées pour estimer les volumes des billes par classes de qualité (Guillemette 2020).

Plusieurs études récentes portent à croire que les estimations de la qualité des bois de feuillus seraient améliorées si les modèles prenaient en compte les variations liées au milieu physique comme la qualité du site (Baral et al. 2016, Hasegawa et al. 2015), les variables écologiques (Guillemette et al. 2021) et climatiques (Guillemette et Bédard 2019, Oswald et al. 2018) ou une combinaison de ces facteurs (Bennemann et al. 2023, Power et Havreljuk 2018). D'autres études ont également démontré que chez l'ERS ou le BOJ, les variations régionales peuvent influencer la taille de la coloration de cœur, une caractéristique interne qui diminue la valeur des bois, principalement chez l'ERS (Havreljuk et al. 2013, Voyer et al. 2024, Yanai et al. 2009).

Afin de mieux évaluer le potentiel d'utilisation ou de transformation des billes issues de l'ERS et du BOJ, cette étude vise à bonifier les modèles de Havreljuk et al. (2015a) servant à estimer les volumes par classes de qualité des billes contenues dans un arbre, en y intégrant des variables explicatives mesurées à l'échelle de l'arbre et à celle de la région. Nous avons d'abord vérifié l'effet des variables écologiques et climatiques sur l'ajustement des modèles. Ensuite, nous avons comparé l'ajustement (biais et racine carrée de l'erreur quadratique moyenne [REQM]) des nouveaux et des anciens modèles (Havreljuk et al. 2015a), sur la base des volumes nets par catégorie de billes issus des arbres. Ces nouveaux modèles serviront d'intrant pour la mise à jour des matrices de répartition par produits comprises dans le *Modèle d'évaluation de rentabilité des investissements sylvicoles* (MÉRIS, BMMB 2023). De plus, ils serviront aux calculs d'attribution des bois en forêt publique, de même que pour estimer le volume net (VN; en m<sup>3</sup>) par catégorie de billes dans les modèles de croissance forestière Artémis-2014 (Power 2016) et SaMARE (Fortin et al. 2009b).

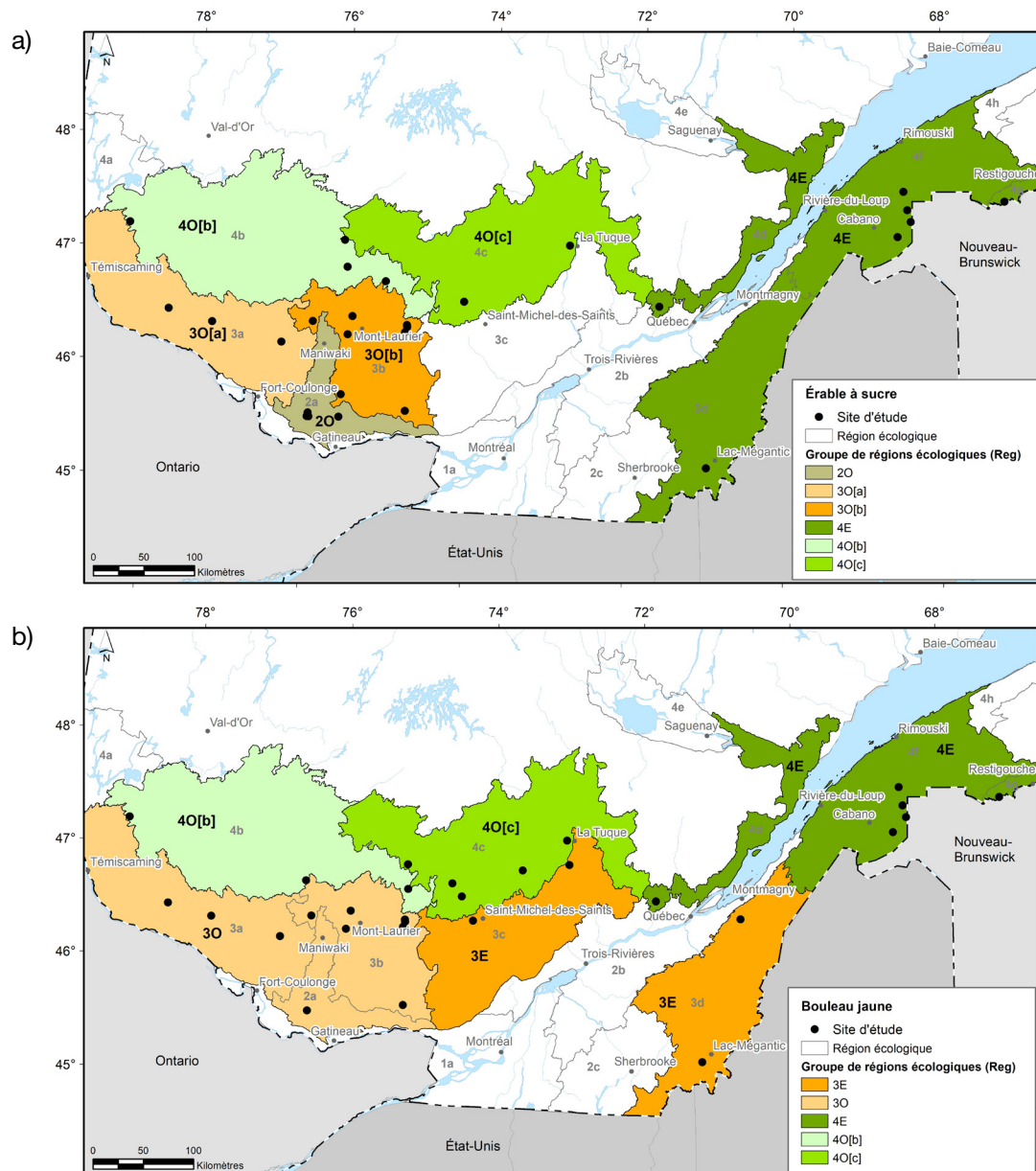
## 2. Matériel et méthodes

### 2.1. Territoire d'étude

Cette étude a été réalisée à partir d'un ensemble de données acquises de 2002 à 2020 par la Direction de la recherche forestière (DRF) du ministère des Ressources naturelles et des Forêts (MRNF) du Québec, dans le cadre de plusieurs projets de recherche en sylviculture, et par la Direction de l'aménagement et de l'environnement forestiers (DAEF) du MRNF, dans le cadre des travaux liés au Chantier sur les forêts feuillues et aux projets sur les matrices de répartition par produits. Au total, nous

avons retenu pour cette étude 37 peuplements dominés par l'ERS ou le BOJ et aménagés pour la production de bois, dont 28 peuplements contenant de l'ERS (figure 1a, tableau 1) et 29 peuplements contenant du BOJ (figure 1b, tableau 1). Ces peuplements se situent dans les forêts décidées et mixtes de la province (gradient latitudinal allant de 45° 30' N à 48° 45' N, et gradient longitudinal allant de 67° 00' O

à 70° 39' O). Selon la classification écologique du territoire québécois (MFFP 2021), les peuplements à l'étude font partie des domaines bioclimatiques de l'érablière à tilleul, de l'érablière à bouleau jaune et de la sapinière à bouleau jaune, pour lesquels les températures annuelles moyennes varient de 1,5 à 5,0 °C et les précipitations totales, de 900 à 1 150 mm (Saucier *et al.* 2009).



**Figure 1.** Carte de la répartition géographique des sites d'études de tronçonnage établis de 2002 à 2020 et ayant servi au développement des modèles de répartition des volumes par classes de qualité des billes a) de l'érable à sucre; b) du bouleau jaune.

**Tableau 1.** Nombre de sites et nombre d'arbres-échantillons utilisés pour l'érable à sucre et le bouleau jaune, en fonction des groupes de régions écologiques créés pour l'analyse. Le nombre de sites entre parenthèses indique ceux contenant 25 arbres-échantillons et plus.

Essence	Groupe de régions écologiques	Régions écologiques	Nombre de sites	Nombre d'arbres-échantillons
Érable à sucre	2O	2a	4 (4)	261
	3O[a]	3a	3 (3)	308
	3O[b]	3b	8 (7)	985
	4E	3d, 4d, 4f, 4g	7 (6)	356
	4O[b]	4b	3 (3)	157
	4O[c]	4c	3 (3)	215
	<b>Total</b>			<b>28 (26)</b>
Bouleau jaune	3E	3c, 3d	4 (3)	303
	3O	2a, 3a, 3b	11 (4)	319
	4E	4d, 4f, 4g	6 (4)	223
	4O[b]	4b	3 (3)	539
	4O[c]	4c	5 (5)	587
	<b>Total</b>			<b>29 (19)</b>

## 2.2. Mesurage d'arbres

Dans chaque peuplement, les arbres sur pied ont été mesurés et classés par un personnel technique qualifié, en suivant un protocole standard (Havreljuk *et al.* 2015b), même si celui-ci pouvait présenter des particularités propres à chaque projet.

La sélection d'arbres-échantillons pour chaque essence était basée sur le diamètre à hauteur de poitrine (DHP; diamètre mesuré à 1,3 m du sol), la classe de priorité de récolte MSCR (Boulet et Landry 2015) et la classe de qualité ABCD

(MFFP 2022) de l'arbre, afin d'obtenir une variété d'arbres quant à leur taille, leur risque lié à la carie et leur qualité (tableaux 2 et 3). Nous n'avons sélectionné que les arbres-échantillons ayant un DHP de plus de 23,0 cm sur chacun des sites, afin de respecter les seuils minimaux de DHP du système de classement de qualité ABCD, qui permet d'évaluer le potentiel de sciage d'un arbre feuillu sur la base du DHP et des défauts présents sur la bille de pied (c'est-à-dire les 5 premiers mètres du tronc). Ces seuils sont de 39,1 cm pour la classe A (la meilleure qualité), de 33,1 cm pour la classe B, de 23,1 cm pour la classe C et de 23,1 cm pour la classe D (MFFP 2022).

**Tableau 2.** Caractéristiques des érables à sucre échantillonnés, par groupe de régions écologiques (Reg) et par classe de qualité ABCD.

Reg	Classe de qualité ABCD	Nombre d'arbres-échantillons	Diamètre à hauteur de poitrine (cm)	
			Moyenne $\pm$ écart type	Minimum-maximum
2O	A	77	52,1 $\pm$ 7,0	40,1-70,7
	B	53	47,6 $\pm$ 11,5	33,8-76,3
	C	80	38,5 $\pm$ 10,9	23,1-68,3
	D	51	42,8 $\pm$ 13,4	23,9-72,7
3O[a]	A	9	44,1 $\pm$ 4,3	41,4-54,9
	B	40	42,5 $\pm$ 8,6	33,3-71,7
	C	94	39,6 $\pm$ 9,1	24,6-69,8
	D	165	46,3 $\pm$ 12,0	24,9-79,3
3O[b]	A	134	49,0 $\pm$ 5,8	39,5-66,7
	B	166	43,1 $\pm$ 8,2	33,1-68,9
	C	444	36,5 $\pm$ 10,6	23,1-75,1
	D	241	39,7 $\pm$ 13,7	23,3-77,9
4E	A	29	45,6 $\pm$ 5,5	39,4-58,0
	B	66	41,0 $\pm$ 8,4	33,1-71,1
	C	112	37,3 $\pm$ 10,4	23,5-73,6
	D	149	48,4 $\pm$ 15,0	23,1-92,1
4O[b]	A	23	46,9 $\pm$ 4,9	39,1-59,9
	B	43	41,4 $\pm$ 7,0	33,3-60,1
	C	72	40,2 $\pm$ 7,1	25,3-58,2
	D	19	40,6 $\pm$ 6,7	28,6-54,5
4O[c]	A	17	44,3 $\pm$ 4,3	39,1-53,5
	B	39	39,9 $\pm$ 5,7	33,1-58,0
	C	104	37,3 $\pm$ 8,6	23,1-56,5
	D	55	38,0 $\pm$ 10,9	23,1-74,8
<b>Total</b>	<b>A</b>	<b>289</b>	<b>48,9 <math>\pm</math> 6,4</b>	<b>39,1-70,7</b>
	<b>B</b>	<b>407</b>	<b>42,8 <math>\pm</math> 8,7</b>	<b>33,1-76,3</b>
	<b>C</b>	<b>906</b>	<b>37,5 <math>\pm</math> 10,1</b>	<b>23,1-75,1</b>
	<b>D</b>	<b>680</b>	<b>43,3 <math>\pm</math> 13,7</b>	<b>23,1-92,1</b>

**Tableau 3.** Caractéristiques des bouleaux jaunes échantillonnés, par groupe de régions écologiques (Reg) et par classe de qualité ABCD.

Reg	Classe de qualité ABCD	Nombre d'arbres	Diamètre à hauteur de poitrine (cm)	
			Moyenne $\pm$ écart type	Minimum-maximum
3E	A	51	50,9 $\pm$ 7,3	39,6-71,8
	B	56	45,7 $\pm$ 11,0	33,2-83,0
	C	137	37,8 $\pm$ 13,0	23,5-92,5
	D	59	51,0 $\pm$ 13,8	25,6-78,5
3O	A	39	47,4 $\pm$ 6,3	40,0-59,5
	B	54	42,2 $\pm$ 5,8	33,8-55,6
	C	161	37,0 $\pm$ 10,0	24,1-92,1
	D	65	43,6 $\pm$ 11,8	24,8-72,8
4E	A	27	49,7 $\pm$ 8,0	39,3-66,4
	B	39	45,7 $\pm$ 10,9	33,4-81,4
	C	84	41,1 $\pm$ 11,0	24,6-75,5
	D	73	44,6 $\pm$ 13,6	24,4-89,3
4O[b]	A	78	48,3 $\pm$ 8,5	39,9-81,6
	B	103	43,6 $\pm$ 9,5	33,2-85,9
	C	197	46,7 $\pm$ 12,4	26,3-96,4
	D	161	56,7 $\pm$ 13,8	31,8-98,3
4O[c]	A	69	51,1 $\pm$ 7,9	40,1-73,7
	B	116	45,5 $\pm$ 11,2	33,1-90,5
	C	277	36,7 $\pm$ 11,4	23,1-95,0
	D	125	47,6 $\pm$ 14,1	23,9-84,3
<b>Total</b>	<b>A</b>	<b>264</b>	<b>49,6 <math>\pm</math> 7,9</b>	<b>39,3-81,6</b>
	<b>B</b>	<b>368</b>	<b>44,5 <math>\pm</math> 10,1</b>	<b>33,1-90,5</b>
	<b>C</b>	<b>856</b>	<b>39,7 <math>\pm</math> 12,3</b>	<b>23,1-96,4</b>
	<b>D</b>	<b>483</b>	<b>50,0 <math>\pm</math> 14,5</b>	<b>23,9-98,3</b>

La hauteur totale des arbres-échantillons a été mesurée dans les projets de recherche de la DRF et sur certains autres sites, pour un total représentant environ 38 % des ERS et 25 % des BOJ. Toutefois, cette variable (qui pourrait influencer le nombre de billes récupérables dans un arbre) n'a pas été retenue dans les analyses, afin de conserver le plus grand nombre possible d'arbres-échantillons dans la présente étude.

Une fois mesurés, les arbres-échantillons ont été dûment identifiés, puis abattus et transportés en troncs entiers dans une usine de sciage à proximité, où ils ont été classés et tronçonnés en billes. Dans la mesure du possible, un effort a été fait pour éviter de laisser sur le parterre de coupe les plus grosses branches primaires ayant un potentiel pour le sciage. Toutefois, dans plusieurs cas, il était difficile d'assurer

le suivi et le transport de ces branches, considérant que l'utilisation du système de récolte par troncs entiers implique un tronçonnage des branches en forêt et d'autres contraintes opérationnelles.

### 2.3. Tronçonnage

Des mesureurs expérimentés ont tronçonné les troncs en billes, puis classé celles-ci en suivant la méthode de tronçonnage de Petro et Calvert (1976). Cette classification canadienne, qui s'appuie sur les mêmes principes de tronçonnage qu'une norme américaine (Rast *et al.* 1973), vise à maximiser le potentiel de production de sciages de qualité, et donc, la valeur des billes qui peuvent être extraites d'un arbre feuillu. Elle tient compte de la position de la bille sur le tronc, de ses dimensions, de ses débits (sections) exempts de défauts de surface et de la réduction volumétrique



de chaque bille causée principalement par la carie. Elle comporte 3 catégories de billes de sciage conventionnel (F1, F2 et F3, en ordre décroissant de qualité). Une quatrième catégorie de billes de sciage (F4) a été incluse dans l'étude pour prendre en compte les plus petites billes (c'est-à-dire les billons) présentant un potentiel de sciage non conventionnel (Bumgardner *et al.* 2001). Dans le cas du BOJ, le potentiel de déroulage (DE) a aussi été considéré lors du classement (MRNF 2023a, Wiedenbeck *et al.* 2004). Enfin, nous avons défini la catégorie pâte (P) pour les billes qui ne satisfont pas aux caractéristiques minimales pour le sciage ou le déroulage, pourvu qu'elles aient une longueur d'au moins 241 cm et un diamètre sous écorce supérieur à 9,0 cm au fin bout. Toutes les autres sections tronçonnées ne faisant pas partie des catégories DE, F1, F2, F3, F4 ou P ont été classées comme des rebuts.

Lors de la classification d'une bille selon la méthode de Petro et Calvert (1976), nous avons aussi noté la position de celle-ci dans l'arbre (numérotée de 1 à la souche jusqu'à n), sa longueur, ses diamètres sous écorce au gros bout ainsi qu'au fin bout, ses diamètres de carie aux extrémités, ses diamètres de coloration aux extrémités, ses principaux défauts de surface latérale et ses courbures. Il pouvait y avoir plus d'une bille par arbre, appartenant ou non à une même catégorie de billes (classe Petro). À partir de ces caractéristiques dimensionnelles, nous avons calculé le VN de chaque bille en utilisant la formule de Smalian (Avery et Burkhart 2001). Les mêmes catégories de billes ont été cumulées pour estimer le VN des billes de catégorie DE, F1, F2, F3, F4 ou P extraites de chaque arbre-échantillon. Pour les deux essences, il y avait, en moyenne, de 1,0 à 1,6 billes par arbre, pour toutes ces catégories de billes confondues. Les autres catégories de billes, tels les rebuts et la carie, n'ont pas été considérées, puisque ce sont des parties d'arbres de petite dimension ou dont le bois est dégradé et qui ne sont généralement pas transformées. Les caractéristiques des billes-échantillons sont détaillées aux annexes 1 (ERS) et 2 (BOJ).

## 2.4. Analyses statistiques

Nous avons étalonné les modèles à partir de 2282 arbres-échantillons d'ERS et de 1971 arbres-échantillons de BOJ, ce qui représente environ 9,7 % et 26,1 % plus d'arbres que dans la version précédente des modèles (Havreljuk *et al.* 2015a). Pour l'ERS, les DHP variaient de 23,1 cm à 92,1 cm (tableau 2), alors que pour le BOJ, ils variaient de 23,1 à 98,3 cm (tableau 3).

Nous avons modélisé le VN des billes d'un arbre, qui est une variable caractérisée par une surabondance des valeurs nulles (Lambert 1992) pour certaines catégories de billes (annexes 1 et 2). Pour cette raison, nous avons utilisé un modèle conditionnel en deux parties, dans une approche semblable à celle utilisée par Fortin *et al.* (2009a) et par Havreljuk *et al.* (2015a). Pour la première partie du modèle, liée à l'occurrence d'une catégorie de billes dans l'arbre, nous avons utilisé un modèle linéaire généralisé à effets mixtes avec une distribution de Bernoulli et une fonction de lien logit (équation 1). Pour la seconde partie, nous avons utilisé un modèle linéaire à effets mixtes pour modéliser le volume par catégorie pour les arbres dans lesquels la catégorie de billes était présente (c'est-à-dire  $VN > 0$ ; Équation 2). Une transformation logarithmique de la variable réponse a été effectuée afin de respecter le postulat de normalité et éviter la prévision de volumes négatifs. Les modèles ont été étalonnés séparément pour l'ERS et le BOJ.

$$p_{ijk} \sim \text{Bernoulli}(\pi_{ijk}) \text{ où } \pi_{ijk} = \frac{e^{\mathbf{x}_{ijk}\boldsymbol{\beta}_k + u_i}}{1 + e^{\mathbf{x}_{ijk}\boldsymbol{\beta}_k + u_i}} \quad (\text{Équation 1})$$

$$\ln(v_{ijk}) = \mathbf{z}_{ijk}\boldsymbol{\gamma}_k + u_i + \varepsilon_{ijk}, \text{ où } v_{ijk} > 0 \quad (\text{Équation 2})$$

Où  $\ln(v_{ijk})$  est le logarithme du VN de la catégorie de billes  $k$  dans l'arbre  $j$  du site  $i$ ;  $p_{ijk}$  est une variable binaire qui prend la valeur de 1 ou 0 selon, respectivement, la présence ou l'absence de la catégorie de billes  $k$  dans l'arbre  $j$  du site  $i$ ;  $\pi$  est le paramètre de la distribution Bernoulli représentant la probabilité de présence d'une catégorie de billes;  $\mathbf{x}_{ijk}$  et  $\mathbf{z}_{ijk}$  sont des vecteurs de variables explicatives associées à la catégorie de billes  $k$  dans l'arbre  $j$  du site  $i$ ;  $\boldsymbol{\beta}_k$  et  $\boldsymbol{\gamma}_k$  sont des vecteurs de paramètres associés à la catégorie de billes  $k$ ;  $u_i$  est l'effet aléatoire du site  $i$ , qui suit une loi normale de moyenne 0 et de variance  $\sigma_{site}^2$ ; et  $\varepsilon_{ijk}$  est l'erreur résiduelle, où le vecteur d'erreurs intra-arbre ( $\boldsymbol{\varepsilon}_{ij}$ ) suit une loi normale multivariée  $\boldsymbol{\varepsilon}_{ij} \sim \text{NM}(\mathbf{0}, \mathbf{R}_{ij})$  et où  $\mathbf{R}_{ij}$  est une matrice de covariances non structurée.

Comme l'équation 1 est non linéaire et qu'elle comporte un effet aléatoire, les prévisions marginales de la probabilité de présence d'une catégorie de billes ont été obtenues avec l'estimateur de Fortin (2013), basé sur une quadrature Gauss-Hermite à 5 points. De plus, l'estimation du volume conditionnel  $\hat{v}_{ijk}$  sur l'échelle d'origine ( $\text{m}^3$ ) a nécessité l'utilisation de la transformation inverse du logarithme et d'une correction du biais basée sur la normalité (Flewelling et Pienaar 1981; équation 3).

$$\hat{v}_{ijk} = e^{\mathbf{z}_{ijk}\boldsymbol{\gamma}_k + 0,5(\hat{\sigma}_{site}^2 + \text{diag}(\mathbf{R}_{ij}))} \quad (\text{Équation 3})$$

Où  $\text{diag}(\hat{\mathbf{R}}_{ij})$  correspond aux éléments de la diagonale de  $\hat{\mathbf{R}}_{ij}$ , qui sont les estimations de la variance de chaque catégorie de billes ( $\hat{\sigma}_k^2$ ).

Les prévisions marginales de VN (c'est-à-dire sans connaissance *a priori* de la présence de la catégorie de billes et de l'effet aléatoire) ont été obtenues en multipliant la prévision marginale de probabilité de présence par le volume conditionnel estimé par l'équation 3.

Nous avons utilisé la procédure GLIMMIX pour étalonner l'équation 1, et la procédure MIXED pour étalonner l'équation 2 (SAS Institute Inc. 2016).

#### 2.4.1. Variables explicatives

Nous avons choisi 2 variables explicatives à l'échelle de l'arbre reconnues pour être liées au volume des produits par catégorie de billes, soit le DHP et la classe de qualité ABCD (Fortin *et al.* 2009a; Havreljuk *et al.* 2015a). Cette dernière est une variable discrète à 4 niveaux (A, B, C et D). Nous avons aussi testé des variables explicatives régionales : des variables climatiques, le domaine bioclimatique (3 niveaux : 2, 3 et 4), le sous-domaine bioclimatique (5 niveaux : 2O, 3E, 3O, 4E, 4O) et la région écologique (MFFP 2021). Nous avons calculé les valeurs des variables climatiques pour chaque site avec BioSIM (Régnière *et al.* 2017) en utilisant les statistiques mensuelles pour la période allant de 1981 à 2010. Nous avons testé la température annuelle moyenne (Temp; °C), les précipitations totales annuelles (Prec; mm), la température minimale quotidienne la plus basse de l'année (Tmin; °C), le nombre de jours de gel (Gel) et la moyenne annuelle du déficit de pression de vapeur (Dpv; hPa).

Comme nous avons peu ou aucune observation pour certaines régions écologiques, nous avons procédé à des regroupements de façon à avoir au moins 3 sites d'échantillonnage, 25 arbres-échantillons par site et un total d'au moins 120 arbres-échantillons par groupe. Nous avons ainsi jumelé les régions écologiques isolées et avec peu d'observations avec leurs voisines les plus proches dans lesquelles il y avait des observations. En tout et pour tout, nous avons créé 6 groupes de régions écologiques pour l'ERS et 5 pour le BOJ (tableau 1). À noter que pour un site qui se trouve dans la région écologique 3b (groupe 3O[b]) dans lequel l'ERS était surreprésenté en nombre, en taille et en qualité par rapport au reste de la base de données, nous avons sélectionné aléatoirement un sous-échantillon de 50 % des arbres pour les analyses, afin de diminuer le poids de ce site et en rapprocher la distribution de la moyenne des autres secteurs.

#### 2.4.2. Sélection de modèles

Pour les deux équations, nous avons sélectionné le meilleur modèle selon l'approche de Burnham et Anderson (2002), qui consiste à comparer les valeurs du critère d'information d'Akaike corrigé (AICc) associé à une série de modèles définis *a priori* et de retenir le modèle avec la plus petite valeur. Le modèle de base contenait la catégorie de billes, le DHP de l'arbre et le DHP au carré. Afin de pouvoir évaluer l'apport de la classe de qualité ABCD de l'arbre, nous avons aussi testé un modèle contenant cette variable en plus des variables du modèle de base. Ensuite, nous avons ajouté 8 autres modèles, chacun contenant une des variables régionales ainsi que la catégorie de billes, le DHP et la classe de qualité ABCD. Tous incluaient aussi les interactions entre la catégorie de billes et chacune des autres variables explicatives présentes. Nous avons aussi ajouté à la liste un modèle comprenant uniquement la catégorie de billes, afin de vérifier si les modèles plus complexes avaient de meilleures performances.

Les mêmes modèles ont été testés pour les deux équations (présence et volume) et pour les deux essences. Toutefois, le DHP au carré n'a pas été retenu dans l'équation 2 pour l'ERS.

#### 2.4.3. Évaluation de chaque partie du modèle

Dans un premier temps, nous avons évalué chaque partie du modèle séparément en réalisant une validation croisée à 10 sous-ensembles (Efron et Gong 1983), afin d'évaluer l'ajustement du meilleur modèle d'occurrence et du meilleur modèle de volume pour chaque essence. Sur la base des prévisions issues de la validation croisée, nous avons effectué un test de Hosmer-Lemeshow (Hosmer et Lemeshow 2000) sur la première partie du modèle. Nous avons aussi calculé le biais et la REQM pour chaque catégorie de billes dans la deuxième partie du modèle, selon les définitions de Weiskittel *et al.* (2011).

#### 2.4.4. Évaluation des prévisions marginales de volume net

Ensuite, nous avons comparé le biais et la REQM des prévisions marginales des volumes par catégorie de billes pour l'ERS et le BOJ, avec les valeurs des prévisions obtenues en appliquant les meilleurs modèles de Havreljuk *et al.* (2015a) sur les données de cette étude. Dans les deux cas, les prévisions étaient basées sur l'étalonnage des modèles à partir du jeu de données complet. Rappelons qu'un biais positif représente une sous-estimation par rapport à



la mesure réelle, tandis qu'un biais négatif représente une surestimation. Nous avons aussi calculé les biais relatifs en divisant les biais par le VN moyen observé.

### 3. Résultats

#### 3.1. Sélection de modèles

##### 3.1.1. Érable à sucre

Le meilleur modèle pour estimer à la fois l'occurrence et le VN des billes d'ERS était le modèle 6, qui inclut la catégorie de billes, le DHP, la classe de qualité ABCD de l'arbre et le groupe de régions écologiques (tableau 4, annexe 3). Le second meilleur modèle pour l'ERS est celui qui inclut le sous-domaine bioclimatique, mais il est considéré comme peu plausible étant donné sa valeur de  $\Delta AICc$  (différence entre l' $AICc$  du modèle en question et celle du meilleur modèle retenu; Burnham et al. 2011). Dans tous les cas, l'utilisation des variables écologiques ou climatiques a permis un meilleur ajustement du modèle aux données comparativement à l'utilisation du DHP seul ou avec la classe ABCD des arbres.

Toutefois, les meilleurs modèles (c'est-à-dire ceux dont la valeur d' $AICc$  est plus petite) utilisent le groupe de régions écologiques plutôt que des variables climatiques.

##### 3.1.2. Bouleau jaune

Comme pour l'ERS, le modèle le plus performant pour estimer à la fois l'occurrence et le volume des billes de BOJ était le modèle 6, qui intègre la catégorie de billes, le DHP, la classe de qualité ABCD de l'arbre et le groupe de régions écologiques (tableau 5, annexe 4). Même s'il est peu plausible, le deuxième meilleur modèle inclut comme variable régionale soit le nombre de jours de gel (dans sa première partie), soit le sous-domaine bioclimatique (dans sa deuxième partie). Dans la majorité des cas, l'utilisation de variables écologiques et climatiques a amélioré l'ajustement du modèle par rapport à l'utilisation du DHP seul ou avec la classe ABCD des arbres; la seule exception est la moyenne annuelle du déficit de pression de vapeur (Dpv) dans la deuxième partie du modèle.

**Tableau 4.** Liste des modèles testés pour l'érable à sucre. La variable explicative DHP représente (DHP + DHP<sup>2</sup>) pour la première partie du modèle (équation 1) et DHP pour la deuxième partie (équation 2). Les autres variables explicatives sont : la catégorie de billes (Bille), la classe de qualité de l'arbre (ABCD), le domaine bioclimatique (Dom), le sous-domaine bioclimatique (Sdom), le groupe de régions écologiques (Reg), la température annuelle moyenne (Temp), les précipitations totales annuelles (Prec), la température minimale quotidienne la plus basse de l'année (Tmin), le nombre de jours de gel (Gel) et la moyenne annuelle du déficit de pression de vapeur (Dpv). Tous les modèles incluent aussi l'interaction entre la catégorie de billes et chacune des variables explicatives du modèle. I est le nombre de paramètres associés aux effets fixes de chaque modèle, et  $\Delta AICc$  est la différence entre la valeur du critère d'information d'Akaike corrigé ( $AICc$ ) de chaque modèle et celle du meilleur modèle. Le modèle retenu est identifié en gras.

Numéro du modèle	Variables	Équation 1 (présence)			Équation 2 (volume)		
		I	AICc	$\Delta AICc$	I	AICc	$\Delta AICc$
<b>6</b>	<b>Bille + DHP + ABCD + Reg</b>	<b>60</b>	<b>8161,8</b>	<b>0,0</b>	<b>55</b>	<b>6337,3</b>	<b>0,0</b>
5	Bille + DHP + ABCD + Sdom	55	8196,1	34,3	50	6365,0	27,7
4	Bille + DHP + ABCD + Dom	45	8226,9	65,1	40	6378,8	41,5
8	Bille + DHP + ABCD + Prec	35	8276,3	114,5	30	6400,1	62,8
7	Bille + DHP + ABCD + Temp	35	8297,4	135,5	30	6443,8	106,5
9	Bille + DHP + ABCD + Tmin	35	8307,6	145,7	30	6448,9	111,6
10	Bille + DHP + ABCD + Gel	35	8314,6	152,8	30	6454,2	116,9
11	Bille + DHP + ABCD + Dpv	35	8360,8	198,9	30	6453,7	116,4
3	Bille + DHP + ABCD	30	8387,7	225,9	25	6469,4	132,1
2	Bille + DHP	10	9370,8	1208,9	5	6853,6	516,3
1	Bille	5	9415,8	1253,9	5	8031,9	1694,6

**Tableau 5.** Liste de modèles testés pour le bouleau jaune. La variable explicative DHP représente (DHP + DHP<sup>2</sup>) pour les deux parties du modèle (Équations 1 et 2). Les autres variables explicatives sont : la catégorie de billes (Bille), la classe de qualité de l'arbre (ABCD), le domaine bioclimatique (Dom), le sous-domaine bioclimatique (Sdom), le groupe de régions écologiques (Reg), la température annuelle moyenne (Temp), les précipitations totales annuelles (Prec), la température minimale quotidienne la plus basse de l'année (Tmin), le nombre de jours de gel (Gel) et la moyenne annuelle du déficit de pression de vapeur (Dpv). Tous les modèles incluent aussi l'interaction entre la catégorie de billes et chacune des variables explicatives. I est le nombre de paramètres associés aux effets fixes de chaque modèle, et  $\Delta AICc$  est la différence entre la valeur du critère d'information d'Akaike corrigé (AICc) de chaque modèle et celle du meilleur modèle. Le modèle retenu est identifié en gras.

Numéro du modèle	Variables	Équation 1 (présence)			Équation 2 (volume)		
		I	AICc	$\Delta AICc$	I	AICc	$\Delta AICc$
<b>6</b>	<b>Bille + DHP + ABCD + Reg</b>	<b>66</b>	<b>8741,6</b>	<b>0,0</b>	<b>66</b>	<b>4368,2</b>	<b>0,0</b>
10	Bille + DHP + ABCD + Gel	42	8852,8	111,2	42	4455,0	86,8
7	Bille + DHP + ABCD + Temp	42	8903,7	162,2	42	4462,5	94,3
5	Bille + DHP + ABCD + Sdom	66	8990,0	248,4	62	4420,0	51,8
9	Bille + DHP + ABCD + Tmin	42	9141,2	399,6	42	4462,5	94,3
8	Bille + DHP + ABCD + Prec	42	9160,9	419,3	42	4493,1	124,9
4	Bille + DHP + ABCD + Dom	54	9221,6	480,0	50	4502,2	134,0
11	Bille + DHP + ABCD + Dpv	42	9230,2	488,6	42	4522,1	153,9
3	Bille + DHP + ABCD	36	9265,8	524,2	36	4515,9	147,7
2	Bille + DHP	12	10352,9	1611,3	12	4840,1	471,9
1	Bille	6	10446,6	1705,0	6	5924,4	1556,2

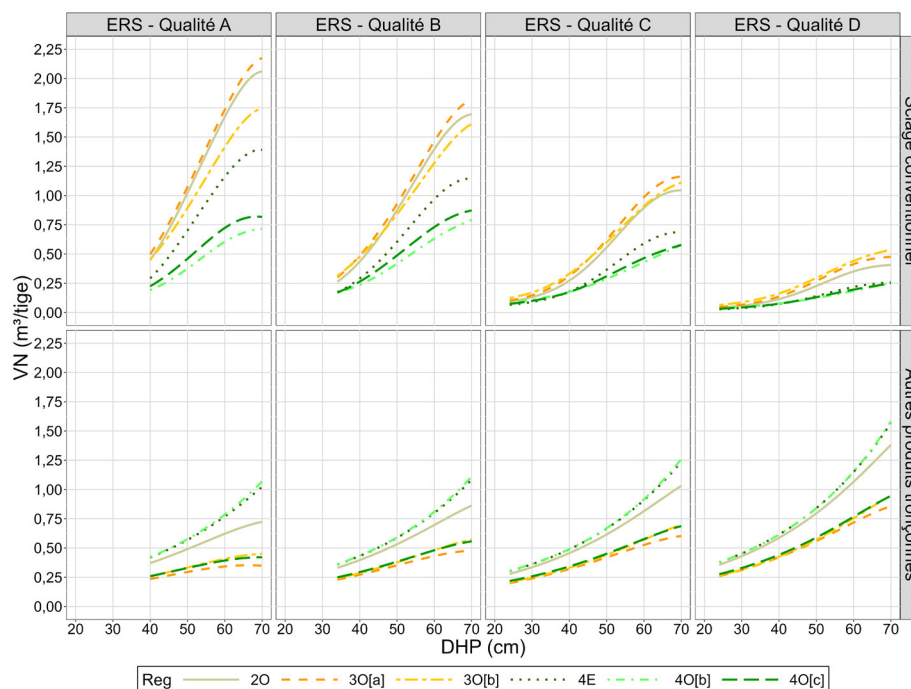
## 3.2. Comportement du modèle

### 3.2.1. Érable à sucre

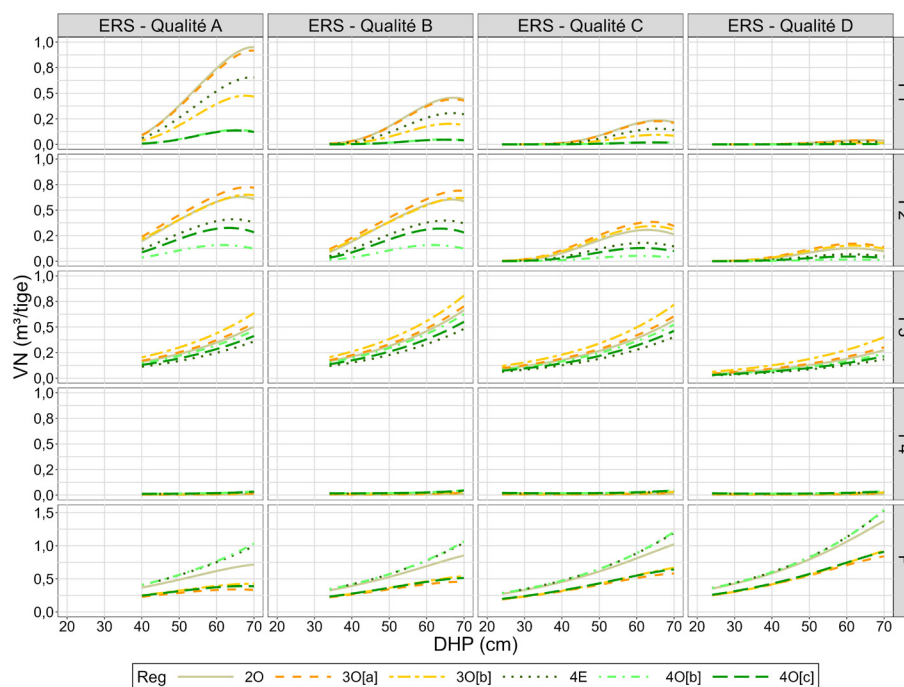
D'après les prévisions du meilleur modèle pour l'ERS (figure 2), c'est dans les groupes de régions écologiques du sud-ouest de la province (2O, 3O[a] et 3O[b]) qu'on observe le plus grand VN de sciage conventionnel (catégories F1, F2 et F3). Vient ensuite le groupe 4E. C'est dans les groupes 4O[b] et 4O[c] que ce volume est le moindre. Pour ces 2 derniers groupes, le VN des billes F1 est très marginal, même pour les arbres sur pied des meilleures classes de qualité (A et B, figure 3). D'après les prévisions du modèle, pour les billes F1 et F2, l'estimation du VN atteint son maximum à un DHP de 65 à 70 cm, peu importe le groupe de régions écologiques et la classe de qualité ABCD de l'arbre. En revanche, pour les billes F3, le VN augmente au-delà d'un DHP de 70 cm (figure 3). Le VN des billes F4, quant à elles, est petit et peu variable, peu importe le groupe de régions écologiques, le DHP et la classe ABCD de l'arbre (figure 3).

Le plus grand VN des billes P a été observé dans les groupes de régions 4E et 4O[b], puis dans le groupe de régions 2O. À l'inverse, le plus petit VN des billes P a été observé dans les groupes de régions 3O[a], 3O[b] et 4O[c] (figure 3). Pour les groupes de régions 2O, 4E et 4O[b], les prévisions du modèle montrent que le VN des billes P augmente au-delà d'un DHP de 70 cm, alors que pour les autres régions, il semble se stabiliser à partir d'un DHP de 65 cm, selon la classe de qualité ABCD de l'arbre (figure 3).

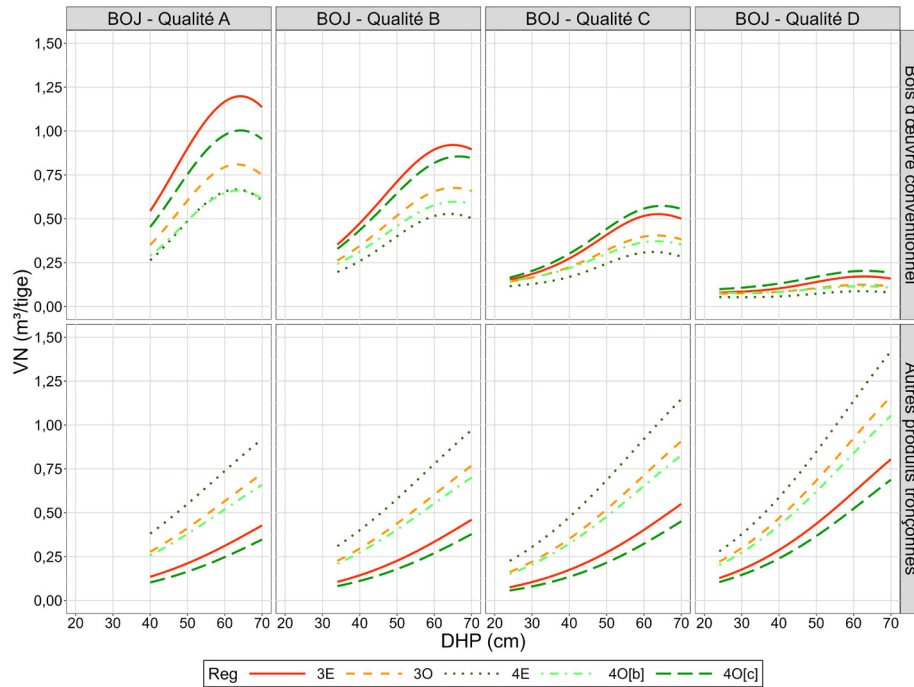
Pour un même DHP, les tiges de qualité A et B ont généré un VN de billes F1 et F2 approximativement 2 fois supérieur à celui des tiges de qualité C, et ce, pour tous les groupes de régions écologiques. Par contraste, le VN des billes P varie peu en fonction de la qualité de l'arbre (figure 3). Par ailleurs, les arbres de qualité D ont généré un petit VN de sciage conventionnel; celui-ci augmente en fonction du DHP, et ce, pour tous les groupes de régions écologiques (figure 2). Il provient principalement des billes F3, mais aussi des billes F2, pour les groupes de régions écologiques 2O, 3O[a] et 3O[b] (figure 3).



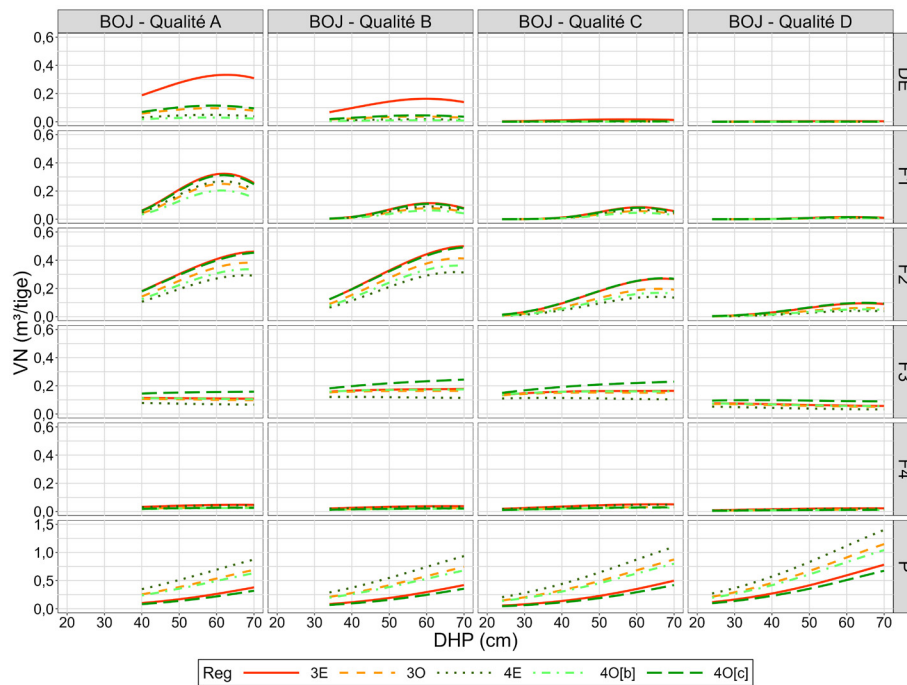
**Figure 2.** Prévisions marginales du volume net (VN) par tige obtenues avec le meilleur modèle pour l'érable à sucre (ERS), en fonction du diamètre à hauteur de poitrine (DHP) et du groupe de régions écologiques (Reg), par classe de qualité ABCD et par groupe de catégories de billes. Les courbes du groupe « Sciage conventionnel » ont été obtenues en additionnant les billes des catégories F1, F2 et F3, alors que celles du groupe « Autres produits tronçonnés » ont été obtenues en additionnant les billes des catégories F4 et P.



**Figure 3.** Prévisions marginales du volume net (VN) par tige obtenues avec le meilleur modèle pour l'érable à sucre (ERS), en fonction du diamètre à hauteur de poitrine (DHP) et du groupe de régions écologiques (Reg), par catégorie de billes (classe Petro) et par classe de qualité ABCD. Note : L'échelle du VN (axe des Y) varie en fonction des catégories de billes.



**Figure 4.** Prévisions marginales du volume net (VN) par tige obtenues avec le meilleur modèle pour le bouleau jaune (BOJ), en fonction du diamètre à hauteur de poitrine (DHP) et du groupe de régions écologiques (Reg), par classe de qualité ABCD et par groupe de catégories de billes. Les courbes du groupe « Bois d'œuvre conventionnel » ont été obtenues en additionnant les billes des catégories DE, F1, F2 et F3, alors que celles du groupe « Autres produits tronçonnés » ont été obtenues en additionnant les catégories de billes F4 et P.



**Figure 5.** Prévisions marginales du volume net (VN) par tige obtenues avec le meilleur modèle pour le bouleau jaune (BOJ), en fonction du diamètre à hauteur de poitrine (DHP) et du groupe de régions écologiques (Reg), par catégorie de billes (classe Petro) et par classe de qualité ABCD. Note : L'échelle du VN (axe des Y) varie en fonction des catégories de billes.

### 3.2.2. *Bouleau jaune*

D'après les prévisions du meilleur modèle pour le BOJ, les groupes de régions écologiques 3E et 4O[c] affichent le plus grand VN de bois d'œuvre conventionnel (catégories DE, F1, F2, F3), mais aussi le plus petit VN pour les autres produits tronçonnés (F4, P), pour un même DHP et une même classe de qualité ABCD (figure 4). À l'inverse, c'est dans la région 4E que le VN des billes de bois d'œuvre conventionnel est le plus petit, alors qu'il est le plus grand d'autres produits tronçonnés (figure 4).

Le VN des billes de catégorie DE est le plus grand pour le groupe de régions écologiques 3E de même que pour les arbres des classes de qualité A et B (figure 5). Pour toutes les régions, le VN d'un arbre atteint un maximum à un DHP de 60 à 65 cm pour les billes DE et F1, alors que pour les billes F2, ce maximum est atteint à partir d'un DHP de 65 cm. Par ailleurs, le VN des billes F3 et F4 est relativement constant et semble peu varier en fonction du DHP (figure 5). Dans tous les cas, le VN des billes P augmente en fonction du DHP.

## 3.3. Évaluation de chaque partie du modèle

### 3.3.1. *Érable à sucre*

La statistique de Hosmer-Lemeshow obtenue lors de la validation croisée pour la première partie du meilleur modèle pour l'ERS semble indiquer un manque d'ajustement des données ( $\chi^2 = 66,0$ ;  $p < 0,0001$ ). Toutefois, une vérification graphique des probabilités observées par rapport aux probabilités prévues montre que ce manque d'ajustement, même s'il est statistiquement significatif, n'est pas majeur. Par ailleurs, les biais et les REQM moyens relatifs issus de la validation croisée de la seconde partie du modèle varient, selon la catégorie de billes, de  $-1,2\%$  à  $+4,9\%$  et de  $38,6\%$  à  $60,0\%$ , respectivement (résultat non montré).

### 3.3.2. *Bouleau jaune*

Comme pour l'ERS, la statistique de Hosmer-Lemeshow obtenue lors de la validation croisée de la première partie du meilleur modèle pour le BOJ indique un manque d'ajustement des données ( $\chi^2 = 34,85$ ,  $p < 0,0001$ ). Cependant, une vérification graphique des probabilités observées par rapport aux probabilités prévues ne révèle aucun défaut majeur d'ajustement. Par ailleurs, les biais et les REQM moyens relatifs issus de la validation croisée

de la seconde partie du modèle varient de  $-2,8\%$  à  $+0,3\%$  et de  $27,8\%$  à  $70,8\%$ , respectivement (résultat non montré).

## 3.4. Prévisions marginales de volume net

### 3.4.1. *Érable à sucre*

Le tableau 6 compare les biais et la REQM des prévisions des modèles retenus pour l'ERS dans la présente étude avec ceux du modèle de Havreljuk et al. (2015a), pour le VN des billes de sciage conventionnel (catégories F1, F2 et F3) et des autres produits tronçonnés (catégories F4 et P), en fonction des groupes de régions écologiques. Pour l'ensemble des groupes de régions écologiques, les biais moyens et relatifs pour le sciage conventionnel varient de  $-0,01\text{ m}^3$  à  $+0,09\text{ m}^3$  et de  $-5,0\%$  à  $+18,8\%$ , alors que ceux des autres billes varient de  $-0,02\text{ m}^3$  à  $+0,03\text{ m}^3$  et de  $-3,5\%$  à  $+6,2\%$ . Pour le sciage conventionnel, les biais relatifs les plus grands sont observés dans les groupes de régions écologiques 3O[a] ( $15,1\%$ ) et 3O[b] ( $18,8\%$ ). Par contraste, les biais les plus petits ont été observés dans les groupes de régions écologiques 4E pour le sciage conventionnel et dans le groupe de régions 4O[b], pour les produits tronçonnés. En ce qui concerne les REQM relatives, elles varient de  $68,3\%$  à  $120,5\%$  pour le sciage conventionnel et de  $45,4\%$  à  $76,6\%$  pour les autres produits tronçonnés. Dans les groupes de régions écologiques 4E, 4O[b] et 4O[c], on observe à la fois les plus grandes erreurs relatives pour le sciage conventionnel, et les plus petites pour les autres produits tronçonnés. Les biais et REQM sont détaillés à l'annexe 5 par groupe de régions écologiques, par classe de qualité ABCD de l'arbre et par catégorie de billes.

Lorsque l'on compare les prévisions du modèle retenu ici pour l'ERS à celui de Havreljuk et al. (2015a), on peut constater que le nouveau modèle régionalisé est moins biaisé et plus précis pour estimer le VN tant du sciage conventionnel que des autres produits tronçonnés, et ce, dans l'ensemble du sous-domaine bioclimatique de la sapinière à bouleau jaune (groupes de régions écologiques 4E, 4O[b] et 4O[c]; tableau 6). Par contre, pour les groupes de régions écologiques 2O, 3O[a] et 3O[b], les biais associés à la catégorie de billes de sciage conventionnel sont plus grands pour le nouveau modèle que pour le modèle de Havreljuk et al. (2015a) (tableau 6). De plus, ils sous-estiment le VN dans tous les cas. Le fait que les valeurs de REQM soient demeurées semblables à celles du modèle de 2015 indique que l'ajout du groupe de régions écologiques n'a pas permis d'améliorer la précision des prévisions de VN des billes pour ces régions.

**Tableau 6.** Synthèse du biais et de la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (REQM) des prévisions marginales de volume net des modèles retenus dans la présente étude et dans le modèle de Havrejuk et al. (2015a), par essence, par groupe de catégories de billes et par groupe de régions écologiques (Reg). Le groupe « sciage conventionnel » (Sciage conv.) inclut les billes des catégories F1, F2 et F3 pour l'érable à sucre, alors que le groupe « bois d'œuvre conventionnel » (B.O. conv.) inclut les billes des catégories DE, F1, F2 et F3 pour le bouleau jaune. Le groupe « Autres produits » (Autres prod.) inclut les autres produits tronçonnés des catégories F4 et P pour les deux essences. La valeur relative (%) est présentée entre parenthèses. La différence pour le biais ou pour la REQM correspond à l'écart entre les valeurs moyennes obtenues avec le nouveau modèle (présente étude) et avec celui de Havrejuk et al. (2015a).

Essence	Groupe de catégories de billes	Reg	Volume net observé (m <sup>3</sup> )	Biais (m <sup>3</sup> )				REQM (m <sup>3</sup> )				
				Havrejuk et al. (2015a)		Présente étude		Havrejuk et al. (2015a)		Présente étude		Différence (m <sup>3</sup> )
				Valeur moyenne (m <sup>3</sup> )	Valeur relative (%)	Valeur moyenne (m <sup>3</sup> )	Valeur relative (%)	Valeur moyenne (m <sup>3</sup> )	Valeur relative (%)	Valeur moyenne (m <sup>3</sup> )	Valeur relative (%)	
		20	0,69	-0,05 (-7,7 %)	0,06 (8,9 %)	0,01	0,46 (67,5 %)	0,47 (68,3 %)	0,01	0,01		
		30[a]	0,39	-0,02 (-4,0 %)	0,06 (15,1 %)	0,04	0,37 (94,2 %)	0,37 (95,2 %)	0,00	0,00		
	Sciage conv.	30[b]	0,50	0,02 (3,5 %)	0,09 (18,8 %)	0,08	0,36 (71,9 %)	0,38 (75,9 %)	0,02	0,02		
		4E	0,21	-0,23 (-109,8 %)	-0,01 (-3,7 %)	-0,22	0,39 (182,4 %)	0,22 (102,5 %)	-0,17	-0,17		
		40[b]	0,21	-0,32 (-152,7 %)	-0,01 (-4,6 %)	-0,31	0,48 (231,9 %)	0,25 (120,5 %)	-0,23	-0,23		
		40[c]	0,17	-0,22 (-129,0 %)	-0,01 (-5,0 %)	-0,21	0,33 (196,5 %)	0,20 (119,2 %)	-0,13	-0,13		
Érable à sucre		20	0,52	0,12 (22,8 %)	-0,01 (-1,6 %)	-0,11	0,42 (79,9 %)	0,40 (76,6 %)	-0,02	-0,02		
		30[a]	0,45	-0,02 (-4,6 %)	0,03 (6,1 %)	0,01	0,31 (68,6 %)	0,31 (69,8 %)	0,01	0,01		
	Autres prod.	30[b]	0,36	-0,01 (-3,4 %)	0,01 (2,8 %)	0,00	0,27 (73,8 %)	0,26 (73,4 %)	0,00	0,00		
		4E	0,63	0,17 (27,6 %)	-0,02 (-3,5 %)	-0,15	0,38 (60,2 %)	0,34 (53,5 %)	-0,04	-0,04		
		40[b]	0,51	0,15 (30,1 %)	-0,01 (-1,4 %)	-0,15	0,29 (57,1 %)	0,23 (45,4 %)	-0,06	-0,06		
		40[c]	0,37	0,02 (4,0 %)	0,02 (6,2 %)	0,01	0,24 (64,1 %)	0,23 (63,8 %)	0,00	0,00		
		3E	0,41	0,05 (13,0 %)	0,01 (1,3 %)	-0,05	0,33 (80,1 %)	0,34 (83,2 %)	0,01	0,01		
		30	0,28	-0,03 (-11,5 %)	0,02 (7,4 %)	-0,01	0,28 (100,2 %)	0,28 (100,1 %)	0,00	0,00		
	B.O. conv.	4E	0,22	-0,10 (-45,9 %)	0,02 (7,1 %)	-0,08	0,25 (113,9 %)	0,23 (105,9 %)	-0,02	-0,02		
		40[b]	0,25	-0,09 (-37,0 %)	-0,01 (-2,2 %)	-0,09	0,29 (118,7 %)	0,28 (111,5 %)	-0,02	-0,02		
		40[c]	0,37	0,04 (11,2 %)	0,02 (4,3 %)	-0,03	0,29 (78,1 %)	0,29 (77,4 %)	0,00	0,00		
Bouleau jaune		3E	0,25	-0,07 (-29,5 %)	0,00 (1,4 %)	-0,07	0,30 (120,0 %)	0,28 (111,0 %)	-0,02	-0,02		
		30	0,36	0,09 (23,9 %)	-0,02 (-4,6 %)	-0,07	0,23 (63,3 %)	0,21 (58,3 %)	-0,02	-0,02		
	Autres prod.	4E	0,56	0,22 (39,6 %)	-0,02 (-4,1 %)	-0,20	0,39 (88,6 %)	0,31 (55,5 %)	-0,07	-0,07		
		40[b]	0,50	0,08 (15,4 %)	0,00 (-0,2 %)	-0,08	0,31 (61,8 %)	0,30 (59,5 %)	-0,01	-0,01		
		40[c]	0,20	-0,11 (-54,6 %)	0,01 (5,7 %)	-0,10	0,24 (119,8 %)	0,21 (105,5 %)	-0,03	-0,03		



### 3.4.2. Bouleau jaune

Le tableau 6 compare les biais et la REQM des prévisions des modèles retenus pour le BOJ dans la présente étude avec ceux du modèle de Havreljuk et al. (2015a), pour le VN des billes de bois d'œuvre conventionnel (catégories DE, F1, F2 et F3) et des autres produits tronçonnés (catégories F4 et P), en fonction des groupes de régions écologiques. Dans l'ensemble, les biais pour le bois d'œuvre conventionnel varient de  $-0,01 \text{ m}^3$  à  $+0,02 \text{ m}^3$  (soit de  $-2,2 \%$  à  $+7,4 \%$  en valeurs relatives), alors que ceux des autres produits tronçonnés varient de  $-0,02 \text{ m}^3$  à  $+0,01 \text{ m}^3$  (ou de  $-4,6 \%$  à  $+5,7 \%$  en valeurs relatives) (tableau 6). Le nouveau modèle sous-estime légèrement le VN de bois d'œuvre pour toutes les groupes de régions écologiques sauf 4O[b]. Les biais relatifs les plus grands pour le bois d'œuvre sont observés dans les groupes de régions écologiques 3O ( $7,4 \%$ ) et 4E ( $7,1 \%$ ). Par contraste, pour la catégorie des autres produits tronçonnés, les biais relatifs les plus grands sont observés dans le groupe de régions 4O[c]. Les REQM relatives, pour leur part, varient de  $77,4 \%$  à  $111,5 \%$  pour les billes de bois d'œuvre et de  $55,5 \%$  à  $111,0 \%$  pour les autres produits. Les détails des biais et REQM par groupe de régions écologiques, par classe de qualité ABCD de l'arbre et par catégorie de billes se trouvent à l'annexe 6.

Le nouveau modèle régionalisé du BOJ est moins biaisé que celui de Havreljuk et al. (2015a) pour le bois d'œuvre et les autres produits tronçonnés, et ce, pour tous les groupes de régions écologiques (tableau 6). De plus, il est généralement un peu plus précis (baisse de la REQM de  $0,1 \%$  à  $14,3 \%$ ) que celui de Havreljuk et al. (2015a), sauf pour la classe de bois d'œuvre du groupe de régions écologiques 3E, pour lequel la valeur de REQM a augmenté de  $3,1 \%$  (tableau 6).

## 4. Discussion

Cette étude a montré que les volumes d'ERS et du BOJ par classes de produits tronçonnés dépendent à la fois des variables à l'échelle de l'arbre et des variables régionales. Sans surprise, l'utilisation jumelée de la classe de qualité de l'arbre et du DHP a permis d'améliorer l'ajustement des modèles, comparativement à l'utilisation du DHP seul. Des résultats similaires ont été obtenus dans les versions précédentes des modèles (Fortin et al. 2009a, Havreljuk et al. 2015a). L'utilisation de la classe de qualité ABCD pour estimer la valeur des arbres feuillus a été largement étudiée au cours des dernières

années (Bédard et al. 2017, Havreljuk et al. 2014, Pothier et al. 2013). Cette classification évalue le potentiel d'utilisation ou de transformation en sciages d'un arbre dans la section qui comprend les 5 premiers mètres du tronc, généralement considérée comme la partie de l'arbre ayant la plus grande valeur (Dey et al. 2017, Havreljuk et al. 2022).

Cependant, notre étude a mis en évidence une limite de la classification ABCD, puisque les ERS de qualité D (qui, en théorie, ne devraient présenter aucun potentiel de sciage) ont généré un certain volume de sciage (figures 2 et 3) que nos modèles ont sous-estimé (annexe 5). Ce volume observé était principalement composé de billes de classes F2 et F3 provenant des gros ERS, ce qui indique que ces arbres ont généré des billes de sciage au-delà des 5 premiers mètres du tronc. Conséquemment, l'écart entre les volumes de sciage observés et les prévisions des modèles pour les tiges de classe D pourrait expliquer, en partie, les biais plus grands observés dans les régions 3O[a] et 3O[b] (tableau 6). Si l'on considère uniquement les arbres de qualité A, B ou C, les biais de sciage baissent respectivement à  $3,4 \%$  et à  $13,9 \%$  pour ces deux régions (résultats non montrés). Par conséquent, le potentiel de sciage des ERS de faible qualité sur pied reste encore à caractériser.

Dans la plupart des cas, l'ajout du groupe de régions écologiques a aussi amélioré l'ajustement des modèles pour les deux essences. La plus forte diminution des biais a été observée dans les régions écologiques du domaine de la sapinière à bouleau jaune pour l'ERS et dans les régions du sous-domaine de la sapinière à bouleau jaune de l'Est pour le BOJ. Pour les deux essences, le regroupement de plusieurs régions écologiques a davantage amélioré l'ajustement des modèles que l'utilisation des variables climatiques. Pour celles-ci, l'emploi de moyennes annuelles ne permet peut-être pas de capter suffisamment les variations qui façonnent la relation entre les fluctuations saisonnières et régionales du climat et leur influence sur la qualité des billes. L'utilisation de variables climatiques dérivées des observations quotidiennes ou mensuelles aurait probablement offert une représentation plus précise de la relation entre le climat, la croissance et la qualité des billes, en permettant notamment de détecter des événements de stress climatique, comme les périodes de gel-dégel ou de sécheresse (Moreau et al. 2020). Néanmoins, comme nous l'avons déjà mentionné, les régions écologiques captent déjà des variations climatiques en plus de celles du régime des perturbations naturelles, du relief, de l'altitude et de la géomorphologie (Saucier et al. 2009).

Par ailleurs, nos résultats indiquent que le climat ne serait pas le seul facteur expliquant les variations de qualité du bois, dont le processus de formation est régi aussi par les sols ou les perturbations naturelles. En effet, une région écologique englobe une certaine étendue de conditions mésoclimatiques, un relief particulier, une altitude, une géologie ainsi que des dépôts de surface relativement uniformes. Les régions écologiques situées dans les sous-domaines de l'Ouest tendent à être plus arides que celles dans les sous-domaines de l'Est, qui bénéficient d'une pluviométrie plus abondante (Saucier *et al.* 2009). Hassegawa *et al.* (2015) ont montré que le rendement en valeur de sciage de l'ERS était plus élevé dans les régions où les sols étaient plus riches et profonds, tandis que le BOJ avait un meilleur rendement dans les régions plus boréales, caractérisées par un environnement plus frais et humide et les sols moins profonds. Dans notre étude, le rendement en sciage conventionnel de l'ERS était le plus élevé dans la portion sud-ouest de la province, soit dans les groupes de régions écologiques 2O, 3O[a] et 3O[b] (figure 1a). Par contraste, le rendement en bois d'œuvre du BOJ était maximal dans la portion centrale de la province, selon l'axe est-ouest (groupes de régions écologiques 3E et 4O[c]; figure 1b). Bennemann *et al.* (2023) ont également observé que le rendement en produits tronçonnés de plusieurs essences feuillues variait entre les 7 « écorégions » du Nouveau-Brunswick, qui sont caractérisées de manière semblable aux régions écologiques du Québec (altitude, sols, température et précipitations).

Dans notre étude, la variabilité associée à l'effet de la station ne peut être dissociée de celle des perturbations passées (coupes antérieures, chablis, etc.). La plupart des forêts de feuillus du nord-est de l'Amérique du Nord proviennent d'une ou de plusieurs coupes partielles (Nyland 1992) ou de perturbations naturelles, lesquelles produisent généralement une mortalité à l'échelle de l'arbre ou du groupe d'arbres (Seymour *et al.* 2002). Notre connaissance de l'effet à moyen ou à long terme des perturbations naturelles et anthropiques sur la qualité des bois feuillus récoltés demeure cependant limitée, même si l'origine et la fréquence de ces perturbations peuvent influencer la vigueur et la composition des peuplements (Wardle *et al.* 2004) et les caractéristiques internes des tiges résiduelles (Shigo 1966). D'ailleurs, on sait que les sols acidifiés par les pluies acides dans les années 1980 ont entraîné un déclin de croissance et de vigueur chez l'ERS dans plusieurs régions de l'est de l'Amérique du Nord (Boakye *et al.* 2023, Duchesne *et al.* 2002).

Guillemette et Bédard (2019) ont montré que la qualité des arbres sur pied était meilleure sur les sites où une coupe de jardinage avait été appliquée (Majcen *et al.* 1990). De plus, ils ont observé une augmentation de la proportion des ERS des classes de qualité A et B en fonction de la température annuelle moyenne. Par ailleurs, Voyer *et al.* (2024) ont observé une augmentation significative de la taille de la coloration de cœur et une croissance plus lente des ERS sur les sites situés à la limite nordique de l'aire de répartition de l'espèce. Cette diminution de croissance de l'ERS pourrait résulter des déficits de pression de vapeur qui surviennent l'été (Boakye *et al.* 2023) ou des périodes prolongées de gel-dégel et de sécheresse (Moreau *et al.* 2020). Par conséquent, la croissance plus lente des arbres dans le domaine de la sapinière à bouleau jaune pourrait favoriser plus de défauts internes du bois, comme la coloration de cœur et la carie (Havreljuk *et al.* 2013, Voyer *et al.* 2024), et diminuer le potentiel de sciage des arbres issus de ces régions, comme nous l'avons observé ici aussi.

#### 4.1. Limites de l'étude

Dans cette étude, tous les arbres ont été récoltés par troncs entiers avant d'être transportés dans une cour d'usine pour y être classés et tronçonnés en suivant la méthode de tronçonnage de Petro et Calvert (1976). Cette approche, qui s'inspire de la norme américaine de Rast *et al.* (1973), vise à optimiser la qualité de sciage d'une bille en tenant compte des classes de qualité définies par la National Hardwood Lumber Association (et donc, à maximiser la qualité plutôt que le volume extrait de chaque bille). Elle diffère de la norme de classification des billes des essences feuillues du *Manuel de mesurage des bois récoltés sur les terres du domaine de l'État* (MRNF 2023a), largement utilisée sur le terrain. Bien que les normes de classification de Petro et Calvert (1976) et du MRNF (2023a) présentent de nombreuses similitudes, les volumes obtenus par classes de qualité de billes peuvent différer entre les deux systèmes. Par ailleurs, des écarts pourraient exister entre l'approche de tronçonnage utilisée dans la présente étude et celles utilisées par les usines de transformation, qui présentent leurs propres particularités (Hassler *et al.* 2021). En outre, la récolte par troncs entiers en forêt décidue est de plus en plus remplacée soit par le procédé de récolte en bois tronçonnés (tronçonnage fait directement sur le parterre de coupe avec une abatteuse multifonctionnelle), soit par le procédé par arbre entier (tronçonnage fait en bordure de chemin ou à l'usine, avec une tronçonneuse [*slasher*]) (Dionne et Martel 2017, Forestier en chef 2022). Cette différence de procédés pourrait limiter le potentiel

d'utilisation des résultats de la présente étude sur de tels sites. Les travaux futurs devraient viser à quantifier comment la qualité des bois récoltés varie selon la méthode de tronçonnage et les systèmes de classement des billes, afin de diminuer les biais potentiels et mieux refléter les différentes réalités opérationnelles.

L'importance de la hauteur de l'arbre pour prévoir la quantité et la qualité des billes reste à être évaluée, et fera l'objet des travaux futurs. Dans l'étude de Bédard *et al.* (2017), la variable hauteur était celle permettant de mieux estimer l'occurrence d'une catégorie de billes dans l'arbre. Nous n'avons pas utilisé cette variable dans notre étude, puisqu'elle n'était pas mesurée sur une grande proportion des arbres. Pour les arbres dont la hauteur n'est pas disponible, il serait néanmoins possible d'estimer celle-ci pour chaque arbre individuel à partir des relations hauteur-diamètre qui tiennent compte de l'influence de la station et du climat (Auger 2016). Toutefois, pour utiliser ces équations, il aurait fallu connaître les caractéristiques des sites (p. ex., surface terrière et densité) qui auraient aussi pu être directement incluses dans le modèle comme variables explicatives pour en améliorer l'ajustement (Bennemann *et al.* 2023, Hassegawa *et al.* 2015). Comme dans le cas de la hauteur de l'arbre, les caractéristiques de sites n'étaient pas disponibles pour la majorité des données utilisées dans cette étude, ce qui a limité leur utilisation, autant pour estimer la qualité des produits issus des billes que la hauteur des arbres d'un site d'étude. Par ailleurs, l'utilisation d'une hauteur estimée dans l'ajustement des modèles aurait nécessité un suivi de la propagation de l'erreur pour vérifier la cohérence des prévisions des modèles.

De manière générale, les biais de nouveaux modèles sont plus petits que ceux du modèle de Havreljuk *et al.* (2015a). Cependant, leur précision (REQM) demeure semblable et relativement faible, tant pour l'ERS que pour le BOJ. Ce résultat n'est pas surprenant, puisque la précision des modèles, qui découle des relations à la fois probabilistes et linéaires, est généralement faible. En effet, ce type de données est caractérisé entre autres par le fait qu'une forte proportion de la variance demeure inexplicée (Bédard *et al.* 2017, Fortin *et al.* 2009a, Havreljuk *et al.* 2015a). Bédard *et al.* (2017) ont d'ailleurs montré que la précision des modèles pour estimer le VN des billes s'améliorait significativement avec une augmentation du nombre d'arbres.

Notons finalement que l'utilisation du groupe de régions écologiques comme variable explicative dans notre modèle présente certaines limites. Dans un contexte de changements climatiques, le contour des régions écologiques pourrait changer dans le futur (GIEC 2022), ce qui amènera le besoin d'ajuster les modèles. De plus, pour le BOJ, l'étendue de l'aire échantillonnée ne couvre pas la limite nordique de l'aire de répartition de l'espèce (figure 1b). Par conséquent, la qualité du BOJ pourrait diminuer à proximité du domaine bioclimatique de la sapinière à bouleau blanc, mais cette baisse n'est pas captée par nos modèles. Enfin, l'utilisation des régions écologiques comme variable d'analyse, bien qu'elle soit utile pour capturer des tendances à grande échelle, peut masquer des effets importants à des échelles plus locales. En effet, les régions écologiques englobent une grande diversité de caractéristiques biophysiques, ce qui peut diluer l'influence de variables qui se caractérisent à des échelles plus fines, comme le climat ou les sols.

## 4.2. Recommandations

Les nouveaux modèles devraient être utilisés à la place du modèle de Havreljuk *et al.* (2015a) pour estimer le VN des billes, principalement dans les groupes de régions écologiques du domaine bioclimatique de la sapinière à bouleau jaune pour l'ERS et dans ceux du sous-domaine de la sapinière à bouleau jaune de l'Est pour le BOJ, soit là où les biais du modèle de 2015 sont les plus grands. Les prévisions des modèles ne reflètent peut-être pas avec justesse la répartition des volumes par produits tronçonnés dans certaines régions de la province où il y a eu peu ou pas d'échantillonnage d'ERS et du BOJ (p. ex., la région écologique 3c pour l'ERS). Conséquemment, il reste encore à vérifier les prévisions et le comportement des modèles dans ces régions, afin de s'assurer que ceux-ci ne sous-estiment ou ne surestiment pas systématiquement les volumes par classes de qualité des billes. Cela pourrait être fait à l'aide de nouvelles études de tronçonnage permettant de caractériser la répartition des volumes de bois par catégorie de billes issues de ces régions, ou encore, par une validation de la répartition par produits tronçonnés de ces secteurs avec des données indépendantes (MRNF 2023b). À noter aussi que les nouveaux modèles sont destinés à l'estimation du VN moyen des billes d'un grand nombre d'arbres, à l'échelle d'un peuplement ou d'un chantier de récolte, par exemple. Ils ne sont pas adaptés pour faire des prévisions pour des arbres individuels, pour lesquels l'imprécision pourrait être importante.

## 5. Conclusion

Cette étude, qui visait à bonifier l'évaluation de la qualité et de la quantité des produits tronçonnés issus de l'ERS et du BOJ, a montré que la qualité des billes contenues dans un arbre varie non seulement en fonction des variables à l'échelle de l'arbre, mais aussi régionalement, à travers la province. Pour les deux essences, les meilleurs modèles pour estimer les volumes par classes de billes incluent le DHP, la classe de qualité ABCD de l'arbre et la région écologique, qui, dans certains cas, a fait l'objet de regroupements pour pallier certains manques de données. Dans le cas de l'ERS, les arbres provenant des régions écologiques dans le domaine bioclimatique de la sapinière à bouleau jaune ont généré, en moyenne, de 2 à 3 fois moins de volume de billes destinées au sciage que ceux provenant des régions écologiques plus au sud. Dans le cas du BOJ, les plus grands volumes de bois d'œuvre ont été observés dans les régions écologiques au centre de la province, plus précisément dans les régions écologiques 3c et 3d du sous-domaine de l'érablière à bouleau jaune de l'Est, et dans la région écologique 4c du sous-domaine de la sapinière à bouleau jaune de l'Ouest. Par ailleurs, les plus petits volumes de bois d'œuvre ont été observés dans le groupe de régions écologiques 4E du sous-domaine de la sapinière à bouleau jaune de l'Est.

Les nouveaux modèles sont moins biaisés et aussi précis que le modèle de Havreljuk et al. (2015a) pour estimer le VN des billes issues d'un arbre. Ils pourront être intégrés dans divers outils, comme les modèles de croissance forestière Artémis-2014 et SaMARE (Auger et al. 2019). Pour poursuivre l'amélioration de ces modèles, des travaux futurs viseront à quantifier la variation de la qualité des produits tronçonnés à l'échelle plus fine du site, en incorporant des variables comme la qualité de station et l'historique des perturbations, par exemple.

## Remerciements

Ce travail a reçu un soutien financier du ministère des Ressources naturelles et des Forêts du Québec (MRNF) par l'entremise du projet n° 112332134 de la Direction de la recherche forestière (DRF), dirigé par Filip Havreljuk. Les données utilisées dans cette étude proviennent des projets de recherche DRF n°s 112332026 et 112332022, dirigés par Steve Bédard, et du projet n° 112332115, dirigé par François Guillemette, ainsi que des projets de tronçonnage réalisés par la Direction des aménagements et environnements forestiers (DAEF) du MRNF, dans

le cadre des travaux du Chantier sur la forêt feuillue et du projet de la Matrice de répartition par produits (n° 112361074). Nous aimerions d'ailleurs remercier chaleureusement MM. Michel Letarte (MRNF), François Labbé (MRNF) et Thomas Moore (MRNF) qui ont coordonné les projets de la DAEF et qui nous ont fourni les données issues de ces travaux. Nous exprimons aussi notre reconnaissance envers les équipes techniques de la DRF et de la DAEF qui ont participé au mesurage des arbres et à la collecte des données. Nous tenons à exprimer notre profonde reconnaissance envers feu M. Claude Jolivette, pour sa contribution exceptionnelle dans le classement des billes lors des études de tronçonnage. Nous désirons remercier également nos collaborateurs et collaboratrices de la DRF : M<sup>me</sup> Josianne DeBlois pour ses conseils statistiques, M<sup>me</sup> Marie-Claude Lambert pour le calcul des variables climatiques avec BioSIM, M. Jean Noël pour la production des cartes de la figure 1, de même que M<sup>mes</sup> Denise Tousignant, Maude-Emmanuelle Hajjaj et Armelle Ginet pour la révision linguistique et l'édition finale du manuscrit. Merci aussi à M<sup>me</sup> Stéphanie Rivet (Pulsation graphique) pour le montage graphique du document. Enfin, nous remercions M<sup>me</sup> Geneviève Picher (DRF), responsable de la révision scientifique, ainsi que M. Mathieu Fortin (Centre canadien sur la fibre de bois) et deux autres évaluateurs ou évaluatrices externes pour leurs commentaires qui ont permis d'améliorer ce manuscrit.

## Références bibliographiques

- Auger, I., 2016. *Une nouvelle relation hauteur-diamètre tenant compte de l'influence de la station et du climat pour 27 essences commerciales du Québec*. Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de la recherche forestière. Note de recherche forestière n° 146, 31 p. <https://mffp.gouv.qc.ca/nos-publications/nouvelle-relation-hauteur-diametre/>
- Auger, I., H. Power, F. Havreljuk et C. Ward, 2019. *Capsis, une plateforme pour l'utilisation des modèles de croissance forestière*. Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de la recherche forestière. Avis de recherche forestière n° 138, 2 p. <https://mffp.gouv.qc.ca/nos-publications/capsis-plateforme-utilisation-modeles-croissance-forestiere/>
- Avery, T.E. et H.E. Burkhart, 2001. *Forest measurements*, 5<sup>th</sup> ed. McGraw-Hill, New York. NY (États-Unis). 456 p.

- Baral, S.K., G. Danyagri, M. Girouard, F. Hébert et G. Pelletier, 2016. *Effects of suppression history on growth response and stem quality of extant northern hardwoods following partial harvests*. For. Ecol. Manage. 372 : 236–246. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.04.023>
- Bédard, S., I. Duchesne, F. Guillemette et J. DeBlois, 2017. *Predicting volume distributions of hardwood sawn products by tree grade in eastern Canada*. Forestry 91(3) : 341-353. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpx043>
- Bennemann, C., E.R. Labelle et J.-M. Lussier, 2023. *Influence of tree, stand, and site attributes on hardwood product yield : Insights into the Acadian forests*. Forests 14(2) : 182. <https://doi.org/10.3390/f14020182>
- [BMMB] Bureau de mise en marché des bois, 2023. *Modèle d'évaluation de rentabilité des investissements sylvicoles (MÉRIS)*. Gouvernement du Québec, Bureau de mise en marché des bois. <https://bmmb.gouv.qc.ca/analyses-economiques/outils-d-analyse/>
- Boakye E.A., Y. Bergeron, I. Drobyshev, A. Beekharry, D. Voyer, A. Achim, J.-G. Huang, P. Grondin, S. Bédard, F. Havreljuk, F. Gennaretti et M.P. Girardin, 2023. *Recent decline in sugar maple (Acer saccharum Marsh.) growth extends to the northern parts of its distribution range in eastern Canada*. For. Ecol. Manage. 545 : 121304. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.121304>
- Boulet, B. et G. Landry, 2015. *Carie des arbres : fondements, diagnostic et applications*, 3<sup>e</sup> édition. Les Publications du Québec, Québec, 368 p.
- Bumgardner, M.S., B.G. Hansen, A.T. Schuler et P.A. Araman, 2001. « Options for small-diameter hardwood utilization : Past and present ». Dans : Pelkki, M.H. (édit.). *Proceedings of the Annual Meeting of the Southern Forest Economic Workers (SOFEW)*, 26-28 Mars, 2000, Arkansas Forest Resources Center, School of Forest Resources, Lexington, KY (États-Unis). p. 1-7. <https://research.fs.usda.gov/treesearch/22363>
- Burnham, K.P. et D.R. Anderson, 2002. *Model selection and multi-model inference : A practical information-theoretic approach*, 2<sup>nd</sup> ed. Springer, New York, NY (États-Unis). xxvi + 488 p. <https://doi.org/10.1007/b97636>
- Burnham, K.P., D.R. Anderson et K.P. Huyvaert, 2011. *AIC model selection and multimodel inference in behavioral ecology : some background, observations, and comparisons*. Behav. Ecol. Sociobiol. 65 : 23-35. <https://doi.org/10.1007/s00265-010-1029-6>
- Cockwell, M. et J. Caspersen, 2014. *Sources of variation in the net value of sugar maple trees : Implications for tree selection and operations management*. For. Prod. J. 64(7-8) : 250-258. <https://doi.org/10.13073/FPJ-D-14-00026>
- Cecil-Cockwell, M.J.L. et J.P. Caspersen, 2015. *A simple system for classifying sugar maple vigour and quality*. Can. J. For. Res. 45(7) : 900-909. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2014-0469>
- Dey, D.C., J. Dwyer et J. Wiedenbeck, 2017. *Relationship between tree value, diameter, and age in high-quality sugar maple (Acer saccharum) on the Menominee Reservation, Wisconsin*. J. For. 115(5) : 397-405. <https://doi.org/10.5849/jof.2016-026R1>
- Dionne, M. et M.-J. Martel, 2017. *Portrait des entreprises de la récolte de bois en Estrie. Enquête auprès des entrepreneurs forestiers*. Sherbrooke, Agence de mise en valeur de la forêt privée de l'Estrie, 52 p. [https://www.agenceestrie.qc.ca/Documents/PDF/Rapport\\_sondage\\_entrepreneurs\\_sept2017.pdf](https://www.agenceestrie.qc.ca/Documents/PDF/Rapport_sondage_entrepreneurs_sept2017.pdf)
- Duchesne, L., R. Ouimet et D. Houle, 2002. *Basal area growth of sugar maple in relation to acid deposition, stand health, and soil nutrients*. J. Environ. Qual. 31(5) : 1676-1683. <https://doi.org/10.2134/jeq2002.1676>
- Efron, B. et G. Gong, 1983. *A leisurely look at the bootstrap, the jackknife and cross-validation*. Am. Stat. 37(1) : 36-48. <https://doi.org/10.2307/2685844>
- Flewelling, J.W. et L.V. Pienaar, 1981. *Multiplicative regression with lognormal errors*. For. Sci. 27(2) : 281-289. <https://doi.org/10.1093/forestscience/27.2.281>
- Forestier en chef, 2022. *Analyse de la durabilité des stratégies d'aménagement en forêt feuillue – Régions Laurentides et Outaouais*. Roberval, Québec, 40 p. [https://forestierenchef.gouv.qc.ca/wp-content/uploads/rap-00087-analyse\\_fec\\_sgtpff-4.0.0.pdf](https://forestierenchef.gouv.qc.ca/wp-content/uploads/rap-00087-analyse_fec_sgtpff-4.0.0.pdf)
- Fortin, M., 2013. *Population-averaged predictions with generalized linear mixed-effects models in forestry : an estimator based on Gauss-Hermite quadrature*. Can. J. For. Res. 43(2) : 129-138. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2012-0268>



- Fortin, M., F. Guillemette et S. Bédard, 2009a. *Predicting volumes by log grades in standing sugar maple and yellow birch trees in southern Quebec, Canada*. Can. J. For. Res. 39(10) : 1928-1938. <https://doi.org/10.1139/X09-108>
- Fortin, M., S. Bédard et J. DeBlois, 2009b. *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. 62 p. <https://mffp.gouv.qc.ca/nos-publications/samare-croissance-erablieres-structure-inequienne/>
- [GIEC] Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, 2022. *Fact sheet – Biodiversity : Climate change impacts and risks*. IPCC Sixth Assessment Report. Working Group II – Impacts, Adaptation and Vulnerability. Genève (Suisse). 3 p. [https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/downloads/outreach/IPCC\\_AR6\\_WGII\\_FactSheet\\_Biodiversity.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/downloads/outreach/IPCC_AR6_WGII_FactSheet_Biodiversity.pdf)
- Guillemette, F., 2020. *Évaluation du biais des modèles et des matrices de répartition par produits*. Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de la recherche forestière, Avis technique SSRF-21, 12 p. <https://mffp.gouv.qc.ca/nos-publications/evaluation-biais-modeles-matrices-repartition-produits/>
- Guillemette, F. et S. Bédard, 2019. *Potential for sugar maple to provide high-quality sawlog trees at the northern edge of its range*. For. Sci. 65(4) : 411-419. <https://doi.org/10.1093/forsci/fxz008>
- Guillemette, F., F. Havreljuk et S. Bédard, 2021. *Qualité de l'érable à sucre dans l'unité d'aménagement 064-71*. Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de la recherche forestière. Avis technique SSRF-22. 22 p. <https://mffp.gouv.qc.ca/nos-publications/qualite-erables-sucre-unite-amenagement-064-71/>
- Hassegawa, M., F. Havreljuk, R. Ouimet, D. Auty, D. Pothier et A. Achim, 2015. *Large-scale variations in lumber value recovery of yellow birch and sugar maple in Quebec, Canada*. PLoS ONE 10(8) : e0136674. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0136674>
- Hassler, C.C., J.R. Thompson et J.F. McNeel, 2021. *Hardwood log grading in the United States – Part III : An assessment of the current status of log grading in the hardwood industry*. For. Prod. J. 71(2) : 133-143 . <https://doi.org/10.13073/FPJ-D-20-00083>
- Havreljuk, F., A. Achim et D. Pothier, 2013. *Regional variation in the proportion of red heartwood in sugar maple and yellow birch*. Can. J. For. Res. 43(3) : 278-287. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2012-0479>
- Havreljuk, F., A. Achim, D. Auty, S. Bédard et D. Pothier, 2014. *Integrating standing value estimations into tree marking guidelines to meet wood supply objectives*. Can. J. For. Res. 44(7) : 750-759. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2013-0407>
- Havreljuk, F., S. Bédard, F. Guillemette et J. DeBlois, 2015a. « Predicting log grade volumes in northern hardwood stands of southern Quebec ». Dans : *ISCHP 2015 : 5<sup>th</sup> International Scientific Conference on Hardwood Processing*. 15-17 septembre 2015, Québec. p. 107-114. <https://mffp.gouv.qc.ca/our-publications/predicting-log-grade-volumes-northern-hardwood-stands-southern-quebec/?lang=en>
- Havreljuk, F., F. Labbé, G. St-Hilaire et R. Yousfi, 2015b. *Échantillonnage d'arbres visant à bonifier les modèles et les matrices de répartition par produits des espèces feuillues – Méthode et rapport de réalisation*. Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de la recherche forestière. Avis technique SSRF-8. 35 p. <https://mffp.gouv.qc.ca/nos-publications/echantillonnage-arbres-bonifier-modeles/>
- Havreljuk, F., A. Achim et D. Pothier, 2022. *Predicting lumber grade occurrence and volume in sugar maple and yellow birch logs*. For. Sci. 68(4) : 410-424. <https://doi.org/10.1093/forsci/fxac019>
- Hosmer, D.W., Jr. et S. Lemeshow, 2000. *Applied logistic regression*. 2<sup>nd</sup> ed. John Wiley & Sons, Inc., New York, NY (États-Unis). 383 p. <https://doi.org/10.1002/0471722146>
- Lambert, D., 1992. *Zero-inflated Poisson regression, with an application to defects in manufacturing*. Technometrics 34(1) : 1-14. <https://doi.org/10.2307/1269547>



- Majcen, Z., Y. Richard, M. Ménard et Y. Grenier, 1990. *Choix des tiges à marquer pour le jardinage d'érablières inéquiennes. Guide technique.* Gouvernement du Québec, ministère de l'Énergie et des Ressources, Direction de la recherche forestière. Mémoire de recherche forestière n° 96. 96 p. <https://mffp.gouv.qc.ca/nos-publications/choix-tiges-jardinage-erable-sucre/>
- Moreau, G., A. Achim et D. Pothier, 2020. *An accumulation of climatic stress events has led to years of reduced growth for sugar maple in southern Quebec.* Canada. *Ecosphere* 11(7) : e03183. <https://doi.org/10.1002/ecs2.3183>
- [MFFP] Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, 2021. *Classification écologique du territoire québécois.* Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction des inventaires forestiers, 16 p. <https://mffp.gouv.qc.ca/nos-publications/classification-ecologique-territoire-quebecois/>
- [MFFP] Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, 2022. *Classification des tiges d'essences feuillues — Norme technique.* Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (Secteur des forêts), Direction des inventaires forestiers. 99 p. <https://mffp.gouv.qc.ca/nos-publications/classification-tiges-essences-feuillues-normes-techniques/>
- [MRNF] Ministère des Ressources naturelles et des Forêts, 2022. *Ressources et industries forestières du Québec. Portrait statistique 2021.* Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles et des Forêts, Direction du développement et de l'innovation de l'industrie. 160 p. [https://cdn-contenu.quebec.ca/cdn-contenu/forets/documents/entreprises/statistiques/RA\\_portrait\\_statistiques\\_industries\\_forestieres\\_2021\\_MRNF.pdf](https://cdn-contenu.quebec.ca/cdn-contenu/forets/documents/entreprises/statistiques/RA_portrait_statistiques_industries_forestieres_2021_MRNF.pdf)
- [MRNF] Ministère des Ressources naturelles et des Forêts, 2023a. *Manuel de mesurage des bois récoltés sur les terres du domaine de l'État. Exercice 2023-2024.* Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles et des Forêts, Bureau de la mise en marché des bois, Direction de la tarification et de la compétitivité des opérations forestières. 337 p. [https://bmmmb.gouv.qc.ca/media/72960/manuel\\_de\\_mesurage\\_2023.pdf](https://bmmmb.gouv.qc.ca/media/72960/manuel_de_mesurage_2023.pdf)
- [MRNF] Ministère des Ressources naturelles et des Forêts, 2023b. *Chantier sur les forêts feuillues et mixtes — Forêts tempérées nordiques,* Québec. Gouvernement du Québec, Direction de l'aménagement et de l'environnement forestiers, 111 p. [https://mffp.gouv.qc.ca/documents/forets/connaissances/RA\\_CFFM\\_MRNF.pdf](https://mffp.gouv.qc.ca/documents/forets/connaissances/RA_CFFM_MRNF.pdf)
- Nyland, R.D., 1992. *Exploitation and greed in eastern hardwood forests.* *J. For.* 90(1) : 33-37. <https://doi.org/10.1093/jof/90.1.33>
- Oswald, E.M., J. Pontius, S.A. Rayback, P.G. Schaberg, S.H. Wilmot et L.A. Dupigny-Giroux, 2018. *The complex relationship between climate and sugar maple health : climate change implications in Vermont for a key northern hardwood species.* *For. Ecol. Manage.* 422 : 303-312. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.04.014>
- Petro, F.J. et W.W. Calvert, 1976. *La classification des billes de bois francs destinées au sciage.* Ressources naturelles Canada. Service canadien des forêts, Forintek Canada Corporation, Ottawa, ON. Rapport technique de foresterie n° 6F. 66 p. <https://library.fpinnovations.ca/link/fpipub5680>
- Pothier, D., M. Fortin, D. Auty, S. Delisle-Boulianne, L.-V. Gagné et A. Achim, 2013. *Improving tree selection for partial cutting through joint probability modelling of tree vigor and quality.* *Can. J. For. Res.* 43(3) : 288-298. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2012-0402>
- 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. 22 p. <https://mffp.gouv.qc.ca/nos-publications/comparaison-artemis-2009-artemis-2014/>
- Power, H. et F. Havreljuk, 2018. *Predicting hardwood quality and its evolution over time in Quebec's forests.* *Forestry* 91(3) : 259-270. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpw059>
- Rast, E.D., D.L. Sonderman et G.L. Gammon, 1973. *A guide to hardwood log grading. Revised edition.* USDA Forest Service, Northeastern Forest Experiment Station, Upper Darby, PA (États-Unis). Gen. Tech. Rep. NE-1. 32 p. [https://www.fs.usda.gov/ne/newtown\\_square/publications/technical\\_reports/pdfs/scanned/gtr1.pdf](https://www.fs.usda.gov/ne/newtown_square/publications/technical_reports/pdfs/scanned/gtr1.pdf)

- Régnière, J., R. Saint-Amant, A. Bécharde et A. Moutaoufik, 2017. *BIOSIM 11 – Manuel d'utilisation*. Ressources naturelles Canada, Service canadien des Forêts, Centre de Foresterie des Laurentides. <https://scf.rncan.gc.ca/projets/133>
- Saucier, J.-P., P. Grondin, A. Robitaille, J. Gosselin, C. Morneau, P.-J.-H. Richard, J. Brisson, L. Sirois, A. Leduc, H. Morin, E. Thiffault, S. Gauthier, C. Lavoie et S. Payette, 2009. « Chapitre 4 – Écologie forestière ». Dans : Ordre des ingénieurs forestiers du Québec (édit.) *Manuel de foresterie*. Éditions MultiMondes, Québec, p. 165-316.
- SAS Institute Inc. 2016. *SAS® 9.4 Guide to software updates*. Cary, NC (États-Unis) : SAS Institute Inc.
- Seymour, R.S., A.S. White et P.G. deMaynadier, 2002. *Natural disturbance regimes in northeastern North America – evaluating silvicultural systems using natural scales and frequencies*. For. Ecol. Manage. 155(1-3) : 357-367. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(01\)00572-2](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(01)00572-2)
- Shigo, A.L., 1966. *Decay and discoloration following logging wounds on northern hardwoods*. USDA Forest Service, Northeastern Forest Experiment Station, Upper Darby, PA (États-Unis), Res. Pap. NE-47. 43 p. [https://www.fs.usda.gov/ne/newtown\\_square/publications/research\\_papers/pdfs/scanned/rp47.pdf](https://www.fs.usda.gov/ne/newtown_square/publications/research_papers/pdfs/scanned/rp47.pdf)
- Voyer, D., G. Moreau, F. Gennaretti, S. Bédard, F. Havreljuk, P. Grondin et A. Achim, 2024. *Age and growth reductions increase the proportion of dark heartwood in sugar maple at the northern limit of its range*. Forestry 2024 : cpae022. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpae022>
- Wardle, D.A., L.R. Walker et R.D. Bardgett, 2004. *Ecosystem properties and forest decline in contrasting long-term chronosequences*. Science 305(5683) : 509-513. <https://doi.org/10.1126/science.1098778>
- Weiskittel, A.R., D.W. Hann, J.A. Kershaw Jr. et J.K. Vanclay, 2011. *Forest growth and yield modeling*. Wiley-Blackwell, Oxford (Royaume-Uni), 415 p. <https://doi.org/10.1002/9781119998518>
- Wiedenbeck, J., M. Wiemann, D. Alderman, J. Baumgras et W. Luppold, 2004. *Defining hardwood veneer log quality attributes*. USDA Forest Service, Northern Research Station, Newtown Square, PA (États-Unis), Gen. Tech. Rep. NE-313. 36 p. <https://doi.org/10.2737/NE-GTR-313>
- Yanai, R.D., R.H. Germain, N.M. Anderson, T.A. Coates et A.K. Mishler, 2009. *Heart size of sugar maple sawlogs across six northern states*. J. For. 107(2) : 95-100. <https://doi.org/10.1093/jof/107.2.95>

**Annexe 1.** Caractéristiques des billes échantillons pour l'érable à sucre, par groupe de régions écologiques (Reg) et par catégorie de billes (classe Petro). À noter que chaque arbre peut contenir plusieurs billes. La valeur  $n$  représente le nombre d'arbres pour lesquels la qualité de bille est présente, et la valeur  $p$  correspond à la proportion d'arbres pour lesquels la qualité de bille est présente.

Reg	Classe Petro	Présence > 0				Volume net moyen global ± écart type (m <sup>3</sup> )	Étendue de variation (m <sup>3</sup> )
		$n$	$p$	Volume net moyen ± écart type (m <sup>3</sup> )	Étendue de variation (m <sup>3</sup> )		
2O	F1	60	0,230	0,914 ± 0,525	0,322-2,935	0,210 ± 0,459	0,000-2,935
	F2	103	0,395	0,589 ± 0,313	0,199-1,843	0,233 ± 0,349	0,000-1,843
	F3	143	0,548	0,447 ± 0,377	0,087-2,674	0,245 ± 0,357	0,000-2,674
	F4	8	0,031	0,133 ± 0,120	0,049-0,374	0,004 ± 0,030	0,000-0,374
	P	242	0,927	0,559 ± 0,419	0,083-2,674	0,518 ± 0,428	0,000-2,674
3O[a]	F1	21	0,068	0,662 ± 0,368	0,291-1,832	0,045 ± 0,192	0,000-1,832
	F2	104	0,338	0,457 ± 0,291	0,163-1,813	0,154 ± 0,275	0,000-1,813
	F3	174	0,565	0,337 ± 0,231	0,085-1,707	0,190 ± 0,241	0,000-1,707
	F4	40	0,130	0,099 ± 0,061	0,040-0,286	0,013 ± 0,040	0,000-0,286
	P	277	0,899	0,484 ± 0,368	0,076-2,334	0,435 ± 0,379	0,000-2,334
3O[b]	F1	74	0,075	0,617 ± 0,296	0,269-1,981	0,046 ± 0,182	0,000-1,981
	F2	325	0,330	0,541 ± 0,336	0,153-2,039	0,178 ± 0,319	0,000-2,039
	F3	656	0,666	0,414 ± 0,332	0,078-2,345	0,275 ± 0,334	0,000-2,345
	F4	111	0,113	0,130 ± 0,094	0,044-0,575	0,015 ± 0,052	0,000-0,575
	P	900	0,914	0,377 ± 0,280	0,041-3,546	0,344 ± 0,288	0,000-3,546
4E	F1	23	0,065	0,463 ± 0,121	0,322-0,848	0,030 ± 0,118	0,000-0,848
	F2	60	0,169	0,408 ± 0,174	0,190-0,960	0,069 ± 0,169	0,000-0,960
	F3	143	0,402	0,281 ± 0,143	0,089-0,852	0,113 ± 0,165	0,000-0,852
	F4	46	0,129	0,128 ± 0,073	0,046-0,330	0,017 ± 0,050	0,000-0,330
	P	351	0,986	0,621 ± 0,466	0,049-3,417	0,612 ± 0,469	0,000-3,417
4O[b]	F1	2	0,013	0,651 ± 0,310	0,432-0,870	0,008 ± 0,077	0,000-0,870
	F2	13	0,083	0,377 ± 0,150	0,224-0,724	0,031 ± 0,112	0,000-0,724
	F3	75	0,478	0,353 ± 0,160	0,124-0,930	0,169 ± 0,208	0,000-0,930
	F4	18	0,115	0,171 ± 0,085	0,053-0,334	0,020 ± 0,062	0,000-0,334
	P	156	0,994	0,490 ± 0,274	0,078-1,374	0,487 ± 0,276	0,000-1,374
4O[c]	F1	1	0,005	0,589	0,589	0,003 ± 0,040	0,000-0,589
	F2	23	0,107	0,366 ± 0,154	0,208-0,770	0,039 ± 0,124	0,000-0,770
	F3	94	0,437	0,289 ± 0,177	0,089-0,876	0,127 ± 0,185	0,000-0,876
	F4	23	0,107	0,150 ± 0,080	0,041-0,378	0,016 ± 0,053	0,000-0,378
	P	191	0,888	0,396 ± 0,246	0,044-1,337	0,352 ± 0,264	0,000-1,337
Total	F1	181	0,079	0,701 ± 0,411	0,269-2,935	0,056 ± 0,222	0,000-2,935
	F2	628	0,275	0,512 ± 0,311	0,153-2,039	0,141 ± 0,281	0,000-2,039
	F3	1285	0,563	0,380 ± 0,297	0,078-2,674	0,214 ± 0,292	0,000-2,674
	F4	246	0,108	0,130 ± 0,086	0,040-0,575	0,014 ± 0,049	0,000-0,575
	P	2117	0,928	0,462 ± 0,356	0,041-3,546	0,429 ± 0,363	0,000-3,546

**Annexe 2.** Caractéristiques des billes échantillons pour le bouleau jaune, par groupe de régions écologiques (Reg) et par catégorie de billes (classe Petro). À noter que chaque arbre peut contenir plusieurs billes. La valeur  $n$  représente le nombre d'arbres pour lesquels la qualité de bille est présente, et la valeur  $p$  correspond à la proportion d'arbres pour lesquels la qualité de bille est présente.

Reg	Classe Petro	Présence > 0				Volume net moyen global $\pm$ écart type (m <sup>3</sup> )	Étendue de variation (m <sup>3</sup> )
		$n$	$p$	Volume net moyen $\pm$ écart type (m <sup>3</sup> )	Étendue de variation (m <sup>3</sup> )		
3E	DE	47	0,155	0,420 $\pm$ 0,195	0,156-0,859	0,065 $\pm$ 0,170	0,000-0,859
	F1	27	0,089	0,592 $\pm$ 0,202	0,278-1,071	0,053 $\pm$ 0,179	0,000-1,071
	F2	105	0,347	0,440 $\pm$ 0,290	0,166-1,590	0,152 $\pm$ 0,270	0,000-1,590
	F3	145	0,479	0,283 $\pm$ 0,219	0,096-1,472	0,136 $\pm$ 0,207	0,000-1,472
	F4	67	0,221	0,130 $\pm$ 0,086	0,041-0,367	0,029 $\pm$ 0,067	0,000-0,367
	P	176	0,581	0,384 $\pm$ 0,307	0,029-1,928	0,223 $\pm$ 0,301	0,000-1,928
3O	DE	13	0,041	0,385 $\pm$ 0,158	0,179-0,774	0,016 $\pm$ 0,082	0,000-0,774
	F1	15	0,047	0,512 $\pm$ 0,212	0,318-1,167	0,024 $\pm$ 0,117	0,000-1,167
	F2	78	0,245	0,410 $\pm$ 0,241	0,154-1,087	0,100 $\pm$ 0,213	0,000-1,087
	F3	155	0,486	0,278 $\pm$ 0,148	0,096-0,882	0,135 $\pm$ 0,173	0,000-0,882
	F4	44	0,138	0,139 $\pm$ 0,087	0,049-0,453	0,019 $\pm$ 0,058	0,000-0,453
	P	284	0,890	0,386 $\pm$ 0,245	0,058-1,532	0,344 $\pm$ 0,261	0,000-1,532
4E	DE	5	0,022	0,404 $\pm$ 0,109	0,259-0,520	0,009 $\pm$ 0,062	0,000-0,520
	F1	14	0,063	0,477 $\pm$ 0,091	0,391-0,710	0,030 $\pm$ 0,118	0,000-0,710
	F2	43	0,193	0,411 $\pm$ 0,158	0,188-0,866	0,079 $\pm$ 0,177	0,000-0,866
	F3	72	0,323	0,307 $\pm$ 0,234	0,097-1,353	0,099 $\pm$ 0,196	0,000-1,353
	F4	34	0,152	0,192 $\pm$ 0,130	0,056-0,622	0,029 $\pm$ 0,086	0,000-0,622
	P	217	0,973	0,549 $\pm$ 0,371	0,084-2,324	0,535 $\pm$ 0,377	0,000-2,324
4O[b]	DE	7	0,013	0,419 $\pm$ 0,117	0,326-0,638	0,005 $\pm$ 0,049	0,000-0,638
	F1	27	0,050	0,464 $\pm$ 0,126	0,323-0,876	0,023 $\pm$ 0,105	0,000-0,876
	F2	135	0,250	0,368 $\pm$ 0,161	0,166-0,980	0,092 $\pm$ 0,178	0,000-0,980
	F3	212	0,393	0,320 $\pm$ 0,204	0,091-2,062	0,126 $\pm$ 0,202	0,000-2,062
	F4	38	0,071	0,263 $\pm$ 0,237	0,108-1,269	0,019 $\pm$ 0,092	0,000-1,269
	P	500	0,928	0,518 $\pm$ 0,392	0,047-2,950	0,480 $\pm$ 0,401	0,000-2,950
4O[c]	DE	28	0,048	0,420 $\pm$ 0,169	0,221-1,093	0,020 $\pm$ 0,097	0,000-1,093
	F1	41	0,070	0,574 $\pm$ 0,185	0,281-1,057	0,040 $\pm$ 0,154	0,000-1,057
	F2	200	0,341	0,417 $\pm$ 0,220	0,193-1,647	0,142 $\pm$ 0,236	0,000-1,647
	F3	360	0,613	0,271 $\pm$ 0,160	0,087-1,476	0,166 $\pm$ 0,182	0,000-1,476
	F4	74	0,126	0,134 $\pm$ 0,089	0,041-0,420	0,017 $\pm$ 0,054	0,000-0,420
	P	323	0,550	0,334 $\pm$ 0,271	0,068-2,202	0,184 $\pm$ 0,261	0,000-2,202
Total	<b>DE</b>	<b>100</b>	<b>0,051</b>	<b>0,415 <math>\pm</math> 0,173</b>	<b>0,156-1,093</b>	<b>0,021 <math>\pm</math> 0,099</b>	<b>0,000-1,093</b>
	<b>F1</b>	<b>124</b>	<b>0,063</b>	<b>0,536 <math>\pm</math> 0,179</b>	<b>0,278-1,167</b>	<b>0,034 <math>\pm</math> 0,138</b>	<b>0,000-1,167</b>
	<b>F2</b>	<b>561</b>	<b>0,285</b>	<b>0,408 <math>\pm</math> 0,222</b>	<b>0,154-1,647</b>	<b>0,116 <math>\pm</math> 0,219</b>	<b>0,000-1,647</b>
	<b>F3</b>	<b>944</b>	<b>0,479</b>	<b>0,288 <math>\pm</math> 0,186</b>	<b>0,087-2,062</b>	<b>0,138 <math>\pm</math> 0,193</b>	<b>0,000-2,062</b>
	<b>F4</b>	<b>257</b>	<b>0,130</b>	<b>0,160 <math>\pm</math> 0,134</b>	<b>0,041-1,269</b>	<b>0,021 <math>\pm</math> 0,072</b>	<b>0,000-1,269</b>
	<b>P</b>	<b>1500</b>	<b>0,761</b>	<b>0,442 <math>\pm</math> 0,341</b>	<b>0,029-2,950</b>	<b>0,336 <math>\pm</math> 0,352</b>	<b>0,000-2,950</b>

**Annexe 3.** Estimation des paramètres et exemple d'utilisation du meilleur modèle pour l'érablé à sucre en fonction du diamètre à hauteur de poitrine (DHP), de la classe de qualité ABCD et du groupe de régions écologiques (Reg), par catégorie de billes (classe Petro,  $k$ ). Les symboles \* et † indiquent les valeurs estimées qui sont significatives à des seuils de  $\alpha = 0,05$  et  $\alpha = 0,01$ , respectivement.

**a) Équation 1 : présence**

Classe Petro	$\hat{\beta}_{0,k}$ (DHP)	$\hat{\beta}_{1,k}$ (DHP <sup>2</sup> )	Classe de qualité ABCD				Reg					
			$\hat{\beta}_{2,k,1}$ (A)	$\hat{\beta}_{2,k,2}$ (B)	$\hat{\beta}_{2,k,3}$ (C)	$\hat{\beta}_{2,k,4}$ (D)	$\hat{\beta}_{3,k,1}$ 2O	$\hat{\beta}_{3,k,2}$ 3O[a]	$\hat{\beta}_{3,k,3}$ 3O[b]	$\hat{\beta}_{3,k,4}$ 4E	$\hat{\beta}_{3,k,5}$ 4O[b]	$\hat{\beta}_{3,k,6}$ 4O[c]
F1	0,5968†	-0,00497†	-20,2669†	-21,2469†	-22,2034†	-23,9371†	2,8066*	2,8100*	2,0646	2,6375*	0,1601	0
F2	0,4472†	-0,00399†	-12,7681†	-12,6517†	-13,9035†	-14,8891†	0,9884*	1,4320†	1,4117†	0,4794	-1,0469	0
F3	0,0221	-0,00017	-0,6498	-0,3483	-0,6887	-1,7037*	0,1988	0,3522	0,8466*	-0,0477	-0,0446	0
F4	-0,1203†	0,00117†	0,2802	0,7218	0,7265	0,3745	-1,3576*	-0,1341	-0,0959	0,2156	0,0179	0
P	0,0500	-0,00089	0,7207	1,3399	1,6367	2,0471	0,8445	-0,2701	0,2988	2,6422†	3,4750†	0

Variance et erreur type de l'effet aléatoire de site ( $\hat{\sigma}_{site}^2 = 0,2289$  (0,0745))

**b) Équation 2 : volume**

Classe Petro	$\hat{\gamma}_{0,k}$ (DHP)	Classe de qualité ABCD				Reg				Diagonale de $\hat{R}_{ij}$ ( $\hat{\sigma}_k^2$ )		
		$\hat{\gamma}_{1,k,1}$ (A)	$\hat{\gamma}_{1,k,2}$ (B)	$\hat{\gamma}_{1,k,3}$ (C)	$\hat{\gamma}_{1,k,4}$ (D)	$\hat{\gamma}_{2,k,1}$ 2O	$\hat{\gamma}_{2,k,2}$ 3O[a]	$\hat{\gamma}_{2,k,3}$ 3O[b]	$\hat{\gamma}_{2,k,4}$ 4E		$\hat{\gamma}_{2,k,5}$ 4O[b]	$\hat{\gamma}_{2,k,6}$ 4O[c]
F1	0,0455†	-2,5381†	-2,7264†	-2,6988†	-2,8932†	-0,0345	-0,0711	-0,3286	-0,3243	-0,1063	0	0,0760†
F2	0,0336†	-2,3885†	-2,4762†	-2,5376†	-2,7374†	0,1741	0,1490	0,0482	-0,0253	-0,0148	0	0,1615†
F3	0,0369†	-2,9413†	-2,7786†	-2,8088†	-2,9946†	0,1133	0,1194	0,1230	-0,1161	0,1443	0	0,2491†
F4	0,0255†	-2,9054†	-3,0048†	-2,9806†	-2,8896†	-0,3429	-0,6139†	-0,2576*	-0,2993*	0,0531	0	0,2271†
P	0,0318†	-2,5677†	-2,5555†	-2,4309†	-2,1935†	0,2686†	-0,0104	-0,0460	0,2719†	0,2645†	0	0,2938†

Variance et erreur type de l'effet aléatoire de site ( $\hat{\sigma}_{site}^2 = 0,0069$  (0,0027))

**c) Exemple d'utilisation du modèle : Marche à suivre pour estimer le volume net marginal des billes F1 d'un ERS de qualité A, ayant un DHP de 40 cm et issu du groupe de régions écologiques 2O.**

1. Estimer la probabilité marginale de présence de billes  $k = F1$  (équation 1) avec les paramètres de l'annexe 3a.

a) Calculer  $\mathbf{x}_{ijk}\hat{\beta}_k$  de l'équation 1.

$$\mathbf{x}\hat{\beta}_{F1} = DHP \times \hat{\beta}_{0,F1(DHP)} + DHP^2 \times \hat{\beta}_{1,F1(DHP^2)} + \hat{\beta}_{2,F1,1(A)} + \hat{\beta}_{3,F1,1(2O)}$$

$$\mathbf{x}\hat{\beta}_{F1} = 40 \times 0,5968 + 40^2 \times -0,00497 + -20,2669 + 2,8066 = -1,5403$$

b) Calculer la prévision marginale de présence de billes F1 :

Appliquer la méthode basée sur une quadrature Gauss-Hermite à 5 points (équation 6 de Fortin 2013)

$$\hat{\pi}_{F1} = \frac{1}{\sqrt{3,1416}} \sum_{l=1}^5 w_l f\left(\mathbf{x}\hat{\beta}_{F1} + \sqrt{2\sigma_{site}^2} v_{i,l}\right)$$

avec les valeurs ( $v_{i,l}$ ) et poids ( $w_l$ ) pour chacun des points du tableau suivant (tirés de Fortin 2013 et de *Digital Library of Mathematical Functions* 2012 sur <http://dlmf.nist.gov/3.5#P6>) :

Point	$v_{i,l}$	$w'_l$
1	-2,02018287045609	0,019953240590459
2	-0,958572464613819	0,393619323152241
3	0	0,945308720482942
4	0,958572464613819	0,393619323152241
5	2,02018287045609	0,019953240590459

i. Calculer la valeur de  $\mathbf{x}\hat{\beta}_{F1} + \sqrt{2\sigma_{site}^2} v_{i,l}$  (colonne de gauche du tableau ci-dessous) et appliquer la fonction  $f$  (colonne de droite du tableau ci-dessous) pour chacun des 5 points.

$pt1 = 1,5403 + \sqrt{2 \times 0,2289} \times v_{i,1} = -2,907174$	$pt1_{ilink} = \frac{e^{-2,907174}}{1 + e^{-2,907174}} = 0,051800$
$pt2 = 1,5403 + \sqrt{2 \times 0,2289} \times v_{i,2} = -2,188879$	$pt2_{ilink} = \frac{e^{-2,188879}}{1 + e^{-2,188879}} = 0,100754$
$pt3 = 1,5403 + \sqrt{2 \times 0,2289} \times v_{i,3} = -1,5403$	$pt3_{ilink} = \frac{e^{-1,5403}}{1 + e^{-1,5403}} = 0,176492$
$pt4 = 1,5403 + \sqrt{2 \times 0,2289} \times v_{i,4} = -0,891721$	$pt4_{ilink} = \frac{e^{-0,891721}}{1 + e^{-0,891721}} = 0,290755$
$pt5 = 1,5403 + \sqrt{2 \times 0,2289} \times v_{i,5} = -0,173426$	$pt5_{ilink} = \frac{e^{-0,173426}}{1 + e^{-0,173426}} = 0,456752$

ii. Calculer la probabilité marginale de présence de billes F1 en fonction des poids ( $w$ ).

$$\hat{\pi}_{F1} = \frac{1}{\sqrt{3,1416}} \times (w'_1 \times 0,051800 + w'_2 \times 0,100754 + w'_3 \times 0,176492 + w'_4 \times 0,290755 + w'_5 \times 0,456752)$$

$$= 0,186799$$



2. Estimer le volume net des billes F1 conditionnel à la présence de F1 (équation 2 et équation 3) avec les paramètres de l'annexe 3b :

a) Calculer le volume d'une bille à l'échelle logarithmique (équation 2).

$$\ln(\hat{v}_{F1}) = DHP \times \hat{\gamma}_{0,F1(DHP)} + \hat{\gamma}_{1,F1,1(A)} + \hat{\gamma}_{2,F1,1(20)}$$

$$\ln(\hat{v}_{F1}) = 40 \times 0,0455 + -2,5381 + -0,0345 = -0,7526$$

b) Convertir sur l'échelle d'origine et corriger pour le biais basé sur la normalité (équation 3).

$$\hat{v}_{F1} = e^{-0,7526+0,5(0,0069+0,0760)} = 0,49108 \text{ m}^3$$

3. Estimer le volume net (VN) marginal des billes F1 en m<sup>3</sup>.

$$\widehat{VN}_{F1} = \hat{\pi}_{F1} \times \hat{v}_{F1}$$

$$\widehat{VN}_{F1} = 0,186799 \times 0,49108 \text{ m}^3 = 0,0917 \text{ m}^3$$

**Annexe 4.** Estimation des paramètres du meilleur modèle pour le bouleau jaune en fonction du diamètre à hauteur de poitrine (DHP), de la classe de qualité ABCD et du groupe de régions écologiques (Reg), par catégorie de billes (classe Petro,  $k$ ). Les symboles \* et † indiquent les valeurs estimées qui sont significatives à des seuils de  $\alpha = 0,05$  et  $\alpha = 0,01$ , respectivement.

**a) Équation 1 : présence**

Classe Petro	$\hat{\beta}_{0,k}$ (DHP)	$\hat{\beta}_{1,k}$ (DHP <sup>2</sup> )	Classe de qualité ABCD				Reg				
			$\hat{\beta}_{2,k,1}$ (A)	$\hat{\beta}_{2,k,2}$ (B)	$\hat{\beta}_{2,k,3}$ (C)	$\hat{\beta}_{2,k,4}$ (D)	$\hat{\beta}_{3,k,1}$ 3E	$\hat{\beta}_{3,k,2}$ 3O	$\hat{\beta}_{3,k,3}$ 4E	$\hat{\beta}_{3,k,4}$ 4O[b]	$\hat{\beta}_{3,k,5}$ 4O[c]
DE	0,1061	-0,00117	-3,6937	-4,6547	-7,1669†	-8,4783†	1,3963†	-0,2719	-0,9119	-1,5884†	0
F1	0,5242†	-0,00448†	-15,5548†	-17,0206†	-17,3946†	-19,2511†	0,0288	-0,4476	-0,1583	-0,5469	0
F2	0,2281†	-0,00196†	-5,6959†	-5,7255†	-6,8511†	-8,2591†	-0,1114	-0,6477*	-0,9569†	-0,7581†	0
F3	-0,0822†	0,00043	2,9680†	3,4707†	3,3332†	2,1829†	-0,5668	-0,7216†	-1,1406†	-0,6441*	0
F4	-0,0056	0,00001	-1,7082*	-1,7755*	-1,6932*	-2,3754†	0,6845*	-0,0210	0,2991	-0,6044	0
P	-0,0003	0,00031	-0,8143	-0,6834	-0,6582	0,5212	0,1206	2,0488†	3,4231†	2,2733†	0

Variance et erreur type de l'effet aléatoire de site ( $\hat{\sigma}_{site}^2$ ) = 0,1147 (0,0427)

**b) Équation 2 : volume**

Classe Petro	$\hat{\gamma}_{0,k}$ (DHP)	$\hat{\gamma}_{1,k}$ (DHP <sup>2</sup> )	Classe de qualité ABCD				Reg				Diagonale de $\hat{R}_{ij}$ ( $\hat{\sigma}_k^2$ )	
			$\hat{\gamma}_{2,k,1}$ (A)	$\hat{\gamma}_{2,k,2}$ (B)	$\hat{\gamma}_{2,k,3}$ (C)	$\hat{\gamma}_{2,k,4}$ (D)	$\hat{\gamma}_{3,k,1}$ 3E	$\hat{\gamma}_{3,k,2}$ 3O	$\hat{\gamma}_{3,k,3}$ 4E	$\hat{\gamma}_{3,k,4}$ 4O[b]		$\hat{\gamma}_{3,k,5}$ 4O[c]
DE	0,0798†	-0,00046	-3,6229†	-3,7231†	-3,7882†	-3,8386†	0,1196	0,0463	-0,0675	0,0569	0	0,0631†
F1	0,0812†	-0,00052*	-3,3844†	-3,4060†	-3,3816†	-3,3723†	0,0162	0,0502	-0,0589	-0,0929	0	0,0496†
F2	0,0551†	-0,00026†	-3,0083†	-2,9177†	-2,9986†	-3,0268†	0,0559	0,0896	-0,0257	0,0106	0	0,1272†
F3	0,0385†	-0,00015	-2,7939†	-2,6585†	-2,6456†	-2,7969†	0,0237	0,0487	-0,0066	0,0548	0	0,2027†
F4	0,0785†	-0,00057†	-4,3470†	-4,5152†	-4,2821†	-4,5445†	0,0134	0,1017	0,2519*	0,4528†	0	0,2517†
P	0,0695†	-0,00036†	-3,9364†	-3,8712†	-3,7113†	-3,4801†	0,1320	0,4163†	0,6001†	0,3149†	0	0,2725†

Variance et erreur type de l'effet aléatoire de site ( $\hat{\sigma}_{site}^2$ ) = 0,0041 (0,0022)

**Annexe 5.** Biais moyen, biais relatif (%) et racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (REQM) des prévisions du modèle retenu pour l'éraable à sucre en fonction du groupe de régions écologiques (Reg) de la classe de qualité ABCD et de la classe de catégorie de billes (classe Petro).

Reg	Classe de qualité ABCD	Classe Petro	Nombre d'observations	Volume net observé (m³)	Volume net prévu (m³)	Biais		REQM	
						Moyenne (m³)	%	Moyenne (m³)	%
20	A	F1	77	0,537	0,456	0,082	15	0,537	100
		F2	77	0,454	0,432	0,022	5	0,393	87
		F3	77	0,248	0,265	-0,017	-7	0,281	113
		F4	77	0,003	0,003	0,000	11	0,030	872
		P	77	0,487	0,515	-0,027	-6	0,357	73
	B	F1	53	0,130	0,153	-0,023	-18	0,262	201
		F2	53	0,241	0,312	-0,071	-29	0,303	125
		F3	53	0,417	0,314	0,103	25	0,477	114
		F4	53	0,003	0,004	-0,002	-55	0,016	551
		P	53	0,486	0,506	-0,021	-4	0,413	85
	C	F1	80	0,056	0,038	0,018	32	0,224	404
		F2	80	0,073	0,088	-0,015	-21	0,222	305
		F3	80	0,183	0,184	-0,001	-1	0,254	139
		F4	80	0,003	0,004	0,000	-14	0,016	450
		P	80	0,491	0,453	0,038	8	0,374	76
	D	F1	51	0,041	0,011	0,030	73	0,168	409
		F2	51	0,140	0,049	0,091	65	0,325	232
		F3	51	0,160	0,108	0,051	32	0,258	162
		F4	51	0,007	0,003	0,004	54	0,052	704
		P	51	0,641	0,684	-0,043	-7	0,493	77
30[a]	A	F1	9	0,108	0,195	-0,086	-80	0,276	255
		F2	9	0,300	0,329	-0,029	-10	0,293	98
		F3	9	0,186	0,204	-0,018	-10	0,188	101
		F4	9	0,020	0,006	0,014	70	0,045	222
		P	9	0,298	0,254	0,044	15	0,290	98
	B	F1	40	0,098	0,085	0,013	13	0,219	224
		F2	40	0,284	0,275	0,009	3	0,312	110
		F3	40	0,185	0,263	-0,078	-42	0,285	154
		F4	40	0,005	0,009	-0,003	-63	0,024	450
		P	40	0,345	0,283	0,062	18	0,254	74
	C	F1	94	0,060	0,031	0,029	48	0,183	305
		F2	94	0,154	0,116	0,038	25	0,223	145
		F3	94	0,195	0,202	-0,007	-3	0,231	118
		F4	94	0,006	0,009	-0,003	-52	0,022	368
		P	94	0,338	0,313	0,024	7	0,246	73
	D	F1	165	0,020	0,012	0,008	39	0,167	816
		F2	165	0,115	0,082	0,034	29	0,243	211
		F3	165	0,189	0,135	0,054	29	0,260	137
		F4	165	0,018	0,008	0,010	54	0,049	267
		P	165	0,520	0,508	0,012	2	0,365	70

Reg	Classe de qualité ABCD	Classe Petro	Nombre d'observations	Volume net observé (m³)	Volume net prévu (m³)	Biais		REQM	
						Moyenne (m³)	%	Moyenne (m³)	%
30[b]	A	F1	134	0,200	0,175	0,025	12	0,333	167
		F2	134	0,434	0,382	0,052	12	0,364	84
		F3	134	0,350	0,295	0,056	16	0,308	88
		F4	134	0,012	0,010	0,003	20	0,048	386
		P	134	0,327	0,314	0,013	4	0,254	78
	B	F1	166	0,062	0,042	0,020	32	0,175	284
		F2	166	0,279	0,259	0,020	7	0,280	100
		F3	166	0,322	0,308	0,014	4	0,286	89
		F4	166	0,014	0,013	0,001	8	0,049	349
		P	166	0,318	0,305	0,014	4	0,195	61
	C	F1	444	0,014	0,012	0,002	15	0,088	642
		F2	444	0,116	0,083	0,033	29	0,233	200
		F3	444	0,252	0,218	0,034	13	0,236	94
		F4	444	0,015	0,014	0,001	7	0,046	314
		P	444	0,308	0,298	0,010	3	0,249	81
	D	F1	241	0,011	0,003	0,008	73	0,109	999
		F2	241	0,081	0,044	0,037	46	0,259	320
		F3	241	0,246	0,144	0,102	41	0,383	156
		F4	241	0,016	0,012	0,004	25	0,064	388
		P	241	0,438	0,440	-0,002	0	0,327	75
4E	A	F1	29	0,259	0,171	0,088	34	0,272	105
		F2	29	0,234	0,201	0,033	14	0,251	107
		F3	29	0,165	0,144	0,021	13	0,206	124
		F4	29	0,013	0,012	0,001	6	0,051	404
		P	29	0,537	0,491	0,046	9	0,248	46
	B	F1	66	0,041	0,046	-0,004	-10	0,140	339
		F2	66	0,171	0,131	0,040	23	0,231	135
		F3	66	0,225	0,168	0,057	25	0,199	88
		F4	66	0,021	0,016	0,005	23	0,050	238
		P	66	0,423	0,447	-0,024	-6	0,255	60
	C	F1	112	0,004	0,019	-0,015	-415	0,053	1462
		F2	112	0,038	0,042	-0,004	-12	0,119	314
		F3	112	0,110	0,123	-0,014	-13	0,141	128
		F4	112	0,026	0,017	0,009	34	0,066	255
		P	112	0,439	0,461	-0,022	-5	0,233	53
	D	F1	149	0,000	0,008	-0,008	-	0,012	-
		F2	149	0,015	0,030	-0,016	-106	0,083	567
		F3	149	0,055	0,094	-0,039	-70	0,149	269
		F4	149	0,008	0,020	-0,012	-139	0,042	497
		P	149	0,841	0,872	-0,031	-4	0,433	51

Reg	Classe de qualité ABCD	Classe Petro	Nombre d'observations	Volume net observé (m³)	Volume net prévu (m³)	Biais		REQM	
						Moyenne (m³)	%	Moyenne (m³)	%
40[b]	A	F1	23	0,038	0,036	0,002	5	0,179	474
		F2	23	0,129	0,082	0,048	37	0,242	187
		F3	23	0,228	0,196	0,032	14	0,226	99
		F4	23	0,000	0,014	-0,014	-	0,014	-
		P	23	0,586	0,513	0,072	12	0,303	52
	B	F1	43	0,010	0,007	0,003	33	0,066	653
		F2	43	0,032	0,052	-0,020	-61	0,103	321
		F3	43	0,215	0,218	-0,003	-1	0,234	109
		F4	43	0,036	0,019	0,017	48	0,078	220
		P	43	0,415	0,448	-0,033	-8	0,214	52
	C	F1	72	0,000	0,002	-0,002	-	0,004	-
		F2	72	0,008	0,015	-0,007	-94	0,047	630
		F3	72	0,163	0,171	-0,008	-5	0,206	127
		F4	72	0,019	0,019	0,000	2	0,064	331
		P	72	0,492	0,486	0,005	1	0,205	42
	D	F1	19	0,000	0,000	0,000	-	0,001	-
		F2	19	0,000	0,005	-0,005	-	0,006	-
		F3	19	0,012	0,077	-0,065	-541	0,085	710
		F4	19	0,009	0,015	-0,007	-75	0,038	433
		P	19	0,515	0,620	-0,105	-20	0,232	45
40[c]	A	F1	17	0,035	0,023	0,012	34	0,142	409
		F2	17	0,145	0,143	0,003	2	0,228	157
		F3	17	0,206	0,156	0,050	24	0,220	107
		F4	17	0,027	0,013	0,014	53	0,091	335
		P	17	0,378	0,276	0,102	27	0,263	70
	B	F1	39	0,000	0,004	-0,004	-	0,008	-
		F2	39	0,084	0,095	-0,011	-13	0,150	179
		F3	39	0,234	0,180	0,055	23	0,216	92
		F4	39	0,015	0,017	-0,002	-14	0,052	350
		P	39	0,312	0,281	0,031	10	0,204	65
	C	F1	104	0,000	0,002	-0,002	-	0,003	-
		F2	104	0,026	0,030	-0,004	-15	0,098	378
		F3	104	0,109	0,136	-0,027	-25	0,154	141
		F4	104	0,022	0,018	0,004	18	0,056	256
		P	104	0,345	0,306	0,039	11	0,247	72
	D	F1	55	0,000	0,000	0,000	-	0,001	-
		F2	55	0,000	0,011	-0,011	-	0,017	-
		F3	55	0,058	0,066	-0,008	-13	0,130	223
		F4	55	0,002	0,016	-0,014	-693	0,020	1032
		P	55	0,384	0,418	-0,034	-9	0,168	44

**Annexe 6.** Biais moyen, biais relatif (%) et racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (REQM) des prévisions du modèle retenu pour le bouleau jaune en fonction du groupe de régions écologiques, de la classe de qualité ABCD et catégorie de billes (classe Petro).

Reg	Classe de qualité ABCD	Classe Petro	Nombre d'observations	Volume net observé (m <sup>3</sup> )	Volume net prévu (m <sup>3</sup> )	Biais		REQM	
						Moyenne (m <sup>3</sup> )	%	Moyenne (m <sup>3</sup> )	%
3E	A	DE	51	0,171	0,271	-0,100	-59	0,284	166
		F1	51	0,150	0,203	-0,053	-35	0,272	181
		F2	51	0,268	0,305	-0,037	-14	0,264	98
		F3	51	0,083	0,112	-0,029	-35	0,153	184
		F4	51	0,033	0,040	-0,007	-22	0,086	261
		P	51	0,264	0,184	0,080	30	0,308	117
	B	DE	56	0,129	0,113	0,016	13	0,197	152
		F1	56	0,069	0,045	0,024	34	0,199	290
		F2	56	0,159	0,261	-0,102	-64	0,290	183
		F3	56	0,185	0,168	0,017	9	0,280	151
		F4	56	0,025	0,029	-0,003	-13	0,065	255
		P	56	0,223	0,172	0,051	23	0,238	107
	C	DE	137	0,024	0,008	0,016	67	0,121	495
		F1	137	0,022	0,015	0,007	30	0,100	462
		F2	137	0,142	0,082	0,061	43	0,260	182
		F3	137	0,153	0,152	0,001	1	0,193	126
		F4	137	0,032	0,031	0,002	5	0,066	203
		P	137	0,129	0,147	-0,018	-14	0,220	170
	D	DE	59	0,008	0,003	0,005	58	0,060	762
		F1	59	0,025	0,008	0,018	70	0,148	581
		F2	59	0,069	0,058	0,011	16	0,190	275
		F3	59	0,093	0,064	0,028	31	0,181	195
		F4	59	0,020	0,018	0,001	7	0,051	261
		P	59	0,405	0,458	-0,053	-13	0,361	89
3O	A	DE	39	0,087	0,077	0,010	12	0,192	221
		F1	39	0,146	0,123	0,023	16	0,261	179
		F2	39	0,218	0,222	-0,005	-2	0,282	130
		F3	39	0,083	0,105	-0,023	-28	0,152	184
		F4	39	0,027	0,023	0,004	14	0,086	318
		P	39	0,335	0,355	-0,020	-6	0,241	72
	B	DE	54	0,026	0,025	0,001	3	0,084	325
		F1	54	0,014	0,020	-0,006	-41	0,075	528
		F2	54	0,200	0,180	0,020	10	0,248	124
		F3	54	0,215	0,159	0,056	26	0,219	102
		F4	54	0,024	0,017	0,007	29	0,055	234
		P	54	0,265	0,312	-0,047	-18	0,212	80
C	DE	161	0,001	0,002	0,000	-2	0,019	1259	
	F1	161	0,008	0,009	-0,001	-16	0,071	929	
	F2	161	0,057	0,055	0,002	4	0,153	271	
	F3	161	0,149	0,147	0,002	1	0,163	110	
	F4	161	0,018	0,019	-0,001	-6	0,056	312	
	P	161	0,317	0,304	0,013	4	0,190	60	
D	DE	65	0,000	0,001	-0,001	-	0,001	-	
	F1	65	0,000	0,003	-0,003	-	0,004	-	
	F2	65	0,056	0,027	0,029	52	0,184	330	
	F3	65	0,068	0,062	0,006	8	0,132	195	
	F4	65	0,013	0,009	0,004	29	0,035	265	
	P	65	0,480	0,553	-0,072	-15	0,234	49	



Reg	Classe de qualité ABCD	Classe Petro	Nombre d'observations	Volume net observé (m³)	Volume net prévu (m³)	Biais		REQM	
						Moyenne (m³)	%	Moyenne (m³)	%
4E	A	DE	27	0,065	0,041	0,024	37	0,160	246
		F1	27	0,172	0,153	0,019	11	0,251	146
		F2	27	0,228	0,187	0,041	18	0,233	102
		F3	27	0,185	0,074	0,111	60	0,333	180
		F4	27	0,046	0,037	0,009	20	0,083	179
		P	27	0,325	0,514	-0,189	-58	0,322	99
	B	DE	39	0,007	0,013	-0,006	-90	0,042	632
		F1	39	0,011	0,032	-0,021	-187	0,075	666
		F2	39	0,210	0,158	0,052	25	0,202	96
		F3	39	0,155	0,120	0,035	22	0,165	106
		F4	39	0,043	0,027	0,017	38	0,114	264
		P	39	0,492	0,481	0,011	2	0,277	56
	C	DE	84	0,000	0,001	-0,001	-	0,001	-
		F1	84	0,019	0,017	0,002	9	0,099	518
		F2	84	0,040	0,053	-0,013	-34	0,145	363
		F3	84	0,108	0,112	-0,005	-4	0,189	175
		F4	84	0,031	0,032	-0,001	-3	0,091	290
		P	84	0,499	0,482	0,017	3	0,293	59
	D	DE	73	0,000	0,000	0,000	-	0,000	-
		F1	73	0,000	0,004	-0,004	-	0,006	-
		F2	73	0,000	0,018	-0,018	-	0,023	-
		F3	73	0,028	0,042	-0,014	-50	0,129	457
		F4	73	0,013	0,015	-0,002	-13	0,050	386
		P	73	0,677	0,711	-0,034	-5	0,348	51

Reg	Classe de qualité ABCD	Classe Petro	Nombre d'observations	Volume net observé (m³)	Volume net prévu (m³)	Biais		REQM	
						Moyenne (m³)	%	Moyenne (m³)	%
40[b]	A	DE	78	0,038	0,023	0,014	38	0,125	332
		F1	78	0,120	0,093	0,027	22	0,214	178
		F2	78	0,230	0,195	0,035	15	0,242	105
		F3	78	0,151	0,111	0,039	26	0,273	181
		F4	78	0,024	0,020	0,004	17	0,069	293
		P	78	0,321	0,340	-0,019	-6	0,233	73
	B	DE	103	0,000	0,007	-0,007	-	0,007	-
		F1	103	0,014	0,017	-0,002	-15	0,083	570
		F2	103	0,162	0,163	-0,001	0	0,228	141
		F3	103	0,161	0,166	-0,006	-3	0,181	112
		F4	103	0,007	0,014	-0,007	-91	0,038	517
		P	103	0,339	0,310	0,030	9	0,260	77
	C	DE	197	0,000	0,001	-0,001	-	0,001	-
		F1	197	0,009	0,016	-0,007	-85	0,062	720
		F2	197	0,064	0,083	-0,018	-28	0,154	239
		F3	197	0,158	0,158	-0,001	0	0,209	133
		F4	197	0,032	0,020	0,012	38	0,136	424
		P	197	0,411	0,413	-0,002	-1	0,260	63
	D	DE	161	0,000	0,000	0,000	-	0,000	-
		F1	161	0,000	0,004	-0,004	-	0,005	-
		F2	161	0,015	0,034	-0,020	-133	0,093	630
		F3	161	0,053	0,061	-0,008	-15	0,139	264
		F4	161	0,007	0,009	-0,003	-41	0,041	617
		P	161	0,732	0,753	-0,021	-3	0,373	51

Reg	Classe de qualité ABCD	Classe Petro	Nombre d'observations	Volume net observé (m³)	Volume net prévu (m³)	Biais		REQM	
						Moyenne (m³)	%	Moyenne (m³)	%
40[c]	A	DE	69	0,129	0,097	0,032	25	0,232	180
		F1	69	0,164	0,193	-0,029	-18	0,287	174
		F2	69	0,271	0,301	-0,029	-11	0,242	89
		F3	69	0,130	0,152	-0,022	-17	0,191	147
		F4	69	0,024	0,023	0,002	7	0,080	327
		P	69	0,188	0,156	0,032	17	0,228	121
	B	DE	116	0,025	0,031	-0,006	-26	0,086	350
		F1	116	0,047	0,037	0,010	21	0,161	342
		F2	116	0,238	0,249	-0,012	-5	0,246	103
		F3	116	0,176	0,206	-0,030	-17	0,210	119
		F4	116	0,020	0,016	0,004	21	0,053	264
		P	116	0,166	0,142	0,024	15	0,230	138
	C	DE	277	0,000	0,002	-0,002	-	0,002	-
		F1	277	0,020	0,014	0,006	32	0,108	542
		F2	277	0,099	0,078	0,021	21	0,182	184
		F3	277	0,188	0,181	0,007	4	0,157	84
		F4	277	0,018	0,017	0,001	3	0,052	296
		P	277	0,109	0,112	-0,002	-2	0,157	144
	D	DE	125	0,000	0,001	-0,001	-	0,001	-
		F1	125	0,010	0,006	0,004	37	0,075	785
		F2	125	0,078	0,052	0,026	33	0,218	281
		F3	125	0,130	0,095	0,035	27	0,197	151
		F4	125	0,008	0,009	-0,002	-22	0,036	479
		P	125	0,363	0,349	0,014	4	0,250	69

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.

On peut citer ce texte en indiquant la référence.

Citation recommandée :

Havreljuk, F., F. Guillemette, I. Auger et S. Bédard, 2025. *Modèles régionalisés de répartition des volumes de bois par classes de qualité des billes pour l'érable à sucre et le bouleau jaune*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles et des Forêts, Direction de la recherche forestière. Note de recherche forestière n° 165, 36 p.

ISSN 0834-4833

ISBN (PDF) : 978-2-555-00228-9

G.F.D.C. : 524.2--015.5 (714)

L.C. : SD 387.M33 397.S774 397.Y44 433

Dépôt légal 2025

Bibliothèque nationale du Québec

© 2025 Gouvernement du Québec

**Ressources naturelles  
et Forêts**

Québec 