

Équation de défilement pour le pin gris en peuplement naturel au Québec

Robert Schneider*¹, Mathieu Fortin² et Jean-Pierre Saucier

Résumé

Les équations de défilement servent à prédire le diamètre du fût à partir de données d'inventaire telles que la hauteur totale de l'arbre et le diamètre à hauteur de poitrine. Il est alors possible d'estimer le volume d'une bille n'importe où le long du fût, et de combiner ces prédictions avec un modèle de débitage et de transformation pour quantifier les différents produits forestiers. De telles équations sont disponibles pour plusieurs essences commerciales du Québec (Schneider *et al.* 2013), mais pas encore pour le pin gris (*Pinus banksiana* Lamb.). Cette note de recherche applique donc les méthodes établies par Schneider *et al.* (2013) au pin gris. Au total, trois modèles ont été étalonnés, qui intègrent des variables à l'échelle de l'arbre, du peuplement, ou les deux en combinaison. Le modèle complet, qui combine les variables à l'échelle de l'arbre et du peuplement, présente les meilleures statistiques d'ajustement. Ses paramètres montrent que le défilement du pin gris est plus important dans le sous-domaine bioclimatique de la pessière à mousses de l'Ouest et dans la végétation potentielle de la pessière noire à lichens.

Mots-clés : coefficient de forme, défilement des tiges, pin gris, qualité des tiges

Abstract

*Taper equations are used to predict stem diameter from inventory data such as total tree height and diameter at breast height. Log diameter can then be estimated anywhere along the stem, and combined with a sawing and transformation model to simulate a variety of forest products. Such taper equations are available for several of Québec's commercial tree species (Schneider et al. 2013), but not yet for jack pine (*Pinus banksiana* Lamb.). This research note applies the methods of Schneider et al. (2013) to jack pine. Three models were calibrated using variables measured either at the level of the tree, of the stand, or both. The complete model which combines both tree- and stand-level variables showed the best fit. Its parameters show that jack pine stem taper is more pronounced in the western spruce-moss bioclimatic subdomain and in the black spruce-lichen potential vegetation.*

Keywords : jack pine, shape coefficient, stem quality, stem taper

* Correspondance : robert_schneider@uqar.ca

¹ Département de biologie, chimie et géographie, Université du Québec à Rimouski, 300, Allée des Ursulines, Rimouski (Québec) G5L 3A1

² AgroParisTech/INRA, Laboratoire d'étude des Ressources Forêt-Bois (LERFoB - UMR 1092), 14, rue Girardet, 54042 Nancy, France



Introduction

Les équations de défilement prédisent le diamètre du fût à n'importe quelle hauteur, à l'aide de variables faciles à obtenir comme le diamètre à hauteur de poitrine (dhp) et la hauteur totale (H) de l'arbre. En incluant des variables biophysiques dans le modèle de défilement, il est possible d'étudier la variation de la forme du fût en fonction de variables climatiques, stationnelles ou géographiques. Dans la gestion forestière, les équations de défilement sont essentiellement utilisées pour prédire le volume d'un ou de plusieurs tronçons de tige. Ces prédictions peuvent ainsi servir à évaluer le panier de produits forestiers à partir des données d'inventaire.

Plusieurs formes fonctionnelles ont été proposées pour les équations de défilement (p. ex. : Li et Weiskittel 2010). Récemment, des équations de défilement ont été étalonnées pour neuf espèces commerciales du Québec (Schneider *et al.* 2013), sur la base des travaux de Sharma et Oderwald (2001) et Sharma et Zhang (2004). Au total, trois types de modèles ont été élaborés : (i) des modèles n'employant que des variables mesurées à l'échelle de la placette, et décrivant le peuplement (surface terrière, densité, altitude, drainage, végétation potentielle, sous-domaine bioclimatique); (ii) des modèles ne comprenant que des variables mesurées à l'échelle de l'arbre (diamètre à hauteur de poitrine, hauteur totale, position dans la tige); (iii) des modèles complets intégrant les variables à l'échelle de la placette et celles à l'échelle de l'arbre. Certaines tendances géographiques propres à chaque espèce ont pu être soulignées. Toutefois, l'innovation des modèles de Schneider *et al.* (2013) a été d'inclure une fonction de variance dans laquelle non seulement la taille de l'arbre, mais aussi la position le long du tronc ont un effet sur la variance de l'erreur résiduelle. Cette nouvelle fonction de variance réduit l'erreur résiduelle à un minimum lorsque la position le long du tronc s'approche de 1,3 m ou du sommet de l'arbre.

Cette note de recherche présente les résultats de l'étalonnage des modèles de Schneider *et al.* (2013) pour le pin gris (*Pinus banksiana* Lamb.). Comme pour les autres espèces, les trois types de modèles ont été étalonnés avec la fonction de variance. L'interprétation des variables mesurées à l'échelle de la placette est ensuite brièvement exposée.

Matériel et méthodes

Données

Les données ayant servi à l'étalonnage des modèles de défilement pour le pin gris proviennent d'un programme d'acquisition de données de croissance qui avait comme objectif d'estimer les indices de qualité de station (IQS) des principales essences commerciales à partir d'analyses de tiges. Celles-ci ont été réalisées conformément aux normes établies par la Direction des inventaires forestiers et la Direction de la recherche forestière du ministère des Ressources naturelles et de la Faune (MRNF 2009). Les modalités de récolte sont décrites dans Schneider *et al.* (2013). Les caractéristiques des 186 placettes d'échantillonnage ayant servi à l'étalonnage des modèles sont présentées au tableau 1.

Tableau 1. Sommaire des données d'analyses de tiges pour le pin gris

Variable	Moyenne	Étendue de variation
dhp (mm)	209,8	84-474
Hauteur (m)	16,7	9,2-27,5
Densité (ti·ha ⁻¹)	1486	350-3025
Surface terrière (m ² ·ha ⁻¹)	25,9	5,1-48,0
Altitude (m)	398	40-640
Répartition	Nombre d'arbres	
Par végétation potentielle		
Sapinière à bouleau blanc (MS2)	14	
Pessière noire à lichens (RE1)	58	
Pessière noire à mousses ou à éricacées (RE2)	800	
Sapinière à épinette noire (RS2)	77	
Par classe de drainage		
Excessif (1)	8	
Rapide (2)	418	
Bon (3)	483	
Imparfait (4)	40	
Par sous-domaine bioclimatique		
Sapinière à bouleau jaune de l'Est (4est)	25	
Sapinière à bouleau jaune de l'Ouest (4ouest)	78	
Sapinière à bouleau blanc de l'Est (5est)	35	
Sapinière à bouleau blanc de l'Ouest (5ouest)	364	
Pessière à mousses de l'Est (6est)	102	
Pessière à mousses de l'Ouest (6ouest)	345	
Total	949	

Modèle de défilement

L'équation de défilement employée est celle de Schneider *et al.* (2013) (Équation 1).

$$d_{ijk}^2 = (\alpha + b_{i,1}) \cdot D_{ij}^2 \cdot \left(\frac{H_{ij} - h_{ijk}}{H_{ij} - 1,3} \right) \cdot \left(\frac{h_{ijk}}{1,3} \right)^{2 - (\mathbf{x}_{ijk} \boldsymbol{\beta} + b_{i,2})} + \varepsilon_{ijk} \quad [1]$$

pour $i=1, 2, \dots, q$; $j=1, 2, \dots, n_i$ et $k=1, 2, \dots, o_{ij}$

où

d_{ijk}^2 est le diamètre sous écorce mis au carré (mm²), à une hauteur h_{ijk} (m), pour la section k de l'arbre j de la placette i ,

H_{ij} est la hauteur totale de l'arbre (m),

D_{ij} est le diamètre à hauteur de poitrine (mm),

α est un paramètre inconnu destiné à prendre en compte l'épaisseur de l'écorce,

$\boldsymbol{\beta}$ est un vecteur de paramètres inconnus,

\mathbf{x}_{ijk} est un vecteur de variables indépendantes,

$b_{i,1}$ et $b_{i,2}$ sont des effets aléatoires de placette, où

$$\mathbf{b}_i = (b_{i,1}, b_{i,2})^T \sim N_2(\mathbf{0}, \mathbf{G}_{placette}),$$

$$\mathbf{G}_{placette} = \begin{bmatrix} \sigma_{plac,1}^2 & \rho_{plac} \sigma_{plac,1} \sigma_{plac,2} \\ \rho_{plac} \sigma_{plac,1} \sigma_{plac,2} & \sigma_{plac,2}^2 \end{bmatrix}$$

et

ε_{ijk} correspond à l'erreur résiduelle.

Le produit des vecteurs \mathbf{x}_{ijk} et $\boldsymbol{\beta}$ peut être décomposé en une somme de produits vectoriels :

$$\mathbf{x}_{ijk} \boldsymbol{\beta} = \beta_0 + \mathbf{x}_{ijk}^{position} \boldsymbol{\beta}^{position} + \mathbf{x}_{ij}^{arbre} \boldsymbol{\beta}^{arbre} + \mathbf{x}_i^{placette} \boldsymbol{\beta}^{placette} \quad [2]$$

où les variables se distinguent entre elles en fonction de l'échelle à laquelle elles s'expriment, c'est-à-dire la position au sein de l'arbre, l'arbre lui-même ou la placette.

Au total, trois modèles ont donc été ajustés :

I. un **modèle-arbre**, qui ne comprend que des variables d'arbre et de position, et dont le vecteur de position est défini comme :

$$\mathbf{x}_{ijk}^{position} \boldsymbol{\beta}^{position} = \beta_1 t_{ijk} + \beta_2 \ln(t_{ijk}) + \beta_3 e^{s_{ijk}} + \beta_4 t_{ijk} s_{ijk} \quad [3]$$

où $s_{ijk} = h_{ijk} / H_{ij}$ et $t_{ijk} = (H_{ij} - h_{ijk}) / (H_{ij} - 1,3)$

et où le vecteur arbre est :

$$\mathbf{x}_{ij}^{arbre} \boldsymbol{\beta}^{arbre} = \beta_5 D_{ij} + \beta_6 H_{ij} \quad [4]$$

II. un **modèle-placette**, qui ne comprend que des variables mesurées à l'échelle de la placette, c'est-à-dire :

$$\mathbf{x}_i^{placette} \boldsymbol{\beta}^{placette} = \beta_7 N_i + \beta_{8,p_i} + \beta_{9,sdb_i} \quad [5]$$

où

β_7 est le paramètre pour la densité de la placette (nombre de tiges·ha⁻¹) N_i ,

β_{8,p_i} est le paramètre pour la végétation potentielle p_i , et

β_{9,sdb_i} est le paramètre pour le sous-domaine bioclimatique sdb_i .

III. un **modèle complet** qui combine les variables des deux approches précédentes.

La méthode de sélection de la forme fonctionnelle de la position, le choix des variables explicatives d'arbre et de placette, ainsi que le regroupement des niveaux des variables catégoriques ont été effectués de la même façon que dans Schneider *et al.* (2013). La performance des trois modèles a été évaluée à l'aide du critère d'information d'Akaike (AIC), et dans une moindre mesure, avec le R². Contrairement à Schneider *et al.* (2013), les effets aléatoires d'arbres n'ont pas été inclus dans le modèle-arbre pour le pin gris, puisqu'ils n'étaient pas nécessaires selon le critère AIC. Il en a été de même pour le drainage, la surface terrière et l'altitude dans le modèle-placette. Les régressions ont été effectuées à l'aide du module *nlme* (Pinheiro *et al.* 2010) du progiciel R. Pour plus de détails sur les postulats, les conditions d'étalonnage, les calculs du R², la fonction de variance et la structure de corrélation utilisée, le lecteur est invité à consulter Schneider *et al.* (2013).

Résultats

L'examen des résidus normalisés issus des régressions ne montre aucune divergence par rapport aux postulats d'homogénéité de la variance et de normalité (non illustré). Les valeurs du critère d'information d'Akaike (AIC) et les estimations des paramètres de la fonction de variance indiquent que le modèle complet est le meilleur (Tableau 2), mais que la différence entre le modèle-arbre et le modèle complet est très faible. Le modèle-placette a le moins bon ajustement. Les différences d'ajustement se reflètent dans les biais des modèles, définis comme les différences entre les valeurs observées et prédites, en fonction de la hauteur relative (Tableau 3). Le modèle

complet et le modèle-arbre ont toujours des biais plus faibles que le modèle-placette. Les estimés des paramètres diffèrent tous de 0 à un seuil d'erreur de 0,05 (Tableau 2).

L'estimation de la valeur des paramètres du modèle complet indique que le défilement est plus important pour les pins gris dans les pessières noires à lichens ($\hat{\beta}_{8,RE1} = 0,0367$) et dans le sous-domaine bioclimatique de la pessière à mousses de l'Ouest ($\hat{\beta}_{9,6ouest} = 0,0247$) (Tableau 2). L'effet de la densité, bien que statistiquement significatif dans le modèle-placette, ne l'est pas dans le modèle complet (Tableau 2).

Tableau 2. Statistiques d'ajustement et estimation des paramètres significatifs au seuil $\alpha < 0,05$ (erreur-type entre parenthèses) pour les trois modèles de défilement pour le pin gris

	Arbre	Modèle Placette	Complet
Statistiques d'ajustement			
AIC	199 590,1	202 333,5	199 561,2
R ²	0,986	0,977	0,986
Estimation des paramètres			
Pente ($\hat{\alpha}$)	0,9176 (0,0016)	0,9215 (0,0017)	0,9176 (0,0016)
Ordonnée à l'origine ($\hat{\beta}_0$)	6,4046 (0,3859)	2,1070 (0,0070)	6,6921 (0,3921)
Variables de position			
$\hat{\beta}_1$	-2,0702 (0,2073)		-2,2360 (0,2109)
$\hat{\beta}_2$	-0,4132 (0,0220)		-0,4208 (0,0221)
$\hat{\beta}_3$	-1,8039 (0,1464)		-1,9203 (0,1489)
$\hat{\beta}_4$	-1,2147 (0,0902)		-1,2837 (0,0917)
Variables de l'arbre			
$\hat{\beta}_5$ (dhp)	-0,00006 (0,00002)		-0,00005 (0,00002)
$\hat{\beta}_6$ (hauteur)	-0,0099 (0,0011)		-0,0100 (0,0011)
Variables de la placette			
$\hat{\beta}_7$ (densité)		0,000013 (0,000004)	
$\hat{\beta}_8$ (végétation potentielle)*			
MS2			0
RE1			0,0367 (0,0131)
RE2			0
RS2			0
$\hat{\beta}_9$ (sous-domaine bioclimatique)*			
4est		0	0
4ouest		0	0
5est		0	0
5ouest		0	0
6est		0	0
6ouest		0,0253 (0,0058)	0,0247 (0,0057)

Tableau 2. (suite et fin)

	Modèle		
	Arbre	Placette	Complet
Fonction de variance [†]			
$\hat{\sigma}$	3586,58	4220,70	3584,66
$\hat{\delta}_1$	0,3607	0,4298	0,3609
$\hat{\delta}_2$	0,5601	0,5740	0,5603
Fonction de corrélation [†]			
$\hat{\rho}_{res}$	0,5422	0,6946	0,5425
Effets aléatoires			
$\hat{\sigma}_{plac,1}$	0,0181	0,0188	0,0181
$\hat{\sigma}_{plac,2}$	0,0328	0,0338	0,0309
$\hat{\rho}_{plac}$	0,209	0,403	0,319

* Voir la signification des codes dans le tableau 1.

† Voir Schneider et al. (2013) pour la définition des paramètres des fonctions de variance et de corrélation.

Tableau 3. Biais moyen (mm²) des trois modèles de défilement pour le pin gris (les valeurs entre parenthèses sont les biais relatifs)

Classe de hauteur relative	Biais moyen (mm ²)		
	Modèle		
	Arbre	Placette	Complet
0,0 - 0,1	-947 (-0,02)	-1332 (-0,03)	-947 (-0,02)
0,1 - 0,2	1043 (0,03)	2486 (0,06)	1032 (0,02)
0,2 - 0,3	610 (0,02)	3694 (0,10)	608 (0,02)
0,3 - 0,4	-208 (-0,01)	3875 (0,12)	-208 (-0,01)
0,4 - 0,5	-388 (-0,02)	3671 (0,14)	-376 (-0,01)
0,5 - 0,6	139 (0,01)	3412 (0,16)	158 (0,01)
0,6 - 0,7	574 (0,04)	2455 (0,15)	587 (0,04)
0,7 - 0,8	459 (0,05)	649 (0,06)	469 (0,05)
0,8 - 0,9	142 (0,03)	-1054 (-0,23)	148 (0,03)
0,9 - 1,0	28 (0,03)	-1120 (-1,33)	33 (0,04)

Discussion

Des trois modèles testés, le modèle complet est celui qui a les meilleures statistiques d'ajustement. Ceci est en accord avec les résultats présentés par Schneider et al. (2013). La forme mathématique du modèle ne permet pas de bien épouser le défilement d'un arbre sans considérer les variables à l'échelle de l'arbre. Il en résulte que le modèle-placette s'ajuste moins bien.

Les variables du vecteur de position étant corrélées, le modèle peut avoir un problème de multicollinéarité (Kozak 1997). Les estimations des paramètres et

leur erreur-type sont alors très sensibles. Toutefois, les estimations de l'ordonnée à l'origine et celles de l'ajustement de l'ordonnée à l'origine pour la pessière à mousses de l'Ouest ne varient pas beaucoup entre le modèle-placette et le modèle complet. Cette faible variabilité indique que la multicollinéarité n'a pas une grande influence sur l'estimation des paramètres. De plus, les modèles seront sans doute utilisés avec des données ayant la même structure de multicollinéarité; cette dernière ne devrait donc pas poser de problème, d'autant plus que les modèles seront utilisés avec des données ayant les mêmes étendues géographique et biophysique que celles ayant servi à l'étalonnage (Quinn et Keough 2002).

Les pins gris se trouvant sur des sites dont la végétation potentielle est celle de la pessière à lichens ont un défilement plus important que les autres. Ces peuplements sont plus ouverts, et par conséquent, la cime vivante des arbres est plus longue, ce qui induit un défilement plus important des tiges (Larson 1963). Le même effet a été observé pour l'épinette noire (Schneider et al. 2013) pour ces stations.

Le défilement du pin gris est aussi plus important dans le sous-domaine bioclimatique de la pessière à mousses de l'Ouest (6ouest). Ces résultats sont similaires à ceux du sapin baumier et de l'épinette noire (Schneider et al. 2013). Inversement, le bouleau à papier et le peuplier faux-tremble ont un défilement plus important dans les régions de l'Est du Québec (Schneider et al. 2013). Pour l'instant, aucune hypothèse ne peut être émise quant à ces divergences. Pour tenter de répondre à ces questions, des études plus poussées sont en cours sur la répartition spatiale de ces tendances et sur les choix d'allocations en lien avec les données climatiques.

Conclusion

En s'appuyant sur une base de données de 949 arbres, 3 modèles de défilement ont été étalonnés pour le pin gris. Le modèle complet, qui intègre les variables à l'échelle de l'arbre et de la placette, a les meilleures statistiques d'ajustement. Comme pour les autres espèces commerciales du Québec, l'effet des facteurs biophysiques (végétation potentielle, sous-domaine bioclimatique) est marginal, mais statistiquement significatif. L'équation de défilement présentée ici permet d'élargir les études de panier de produits au pin gris. Les gestionnaires pourront ainsi évaluer non seulement le volume sur pied, mais aussi la quantité de produits et par le fait même, la valeur des peuplements.

Remerciements

Les auteurs remercient la Direction de la recherche forestière du ministère des Ressources naturelles pour le support financier (projet n° 112310107), de même que la Direction des inventaires forestiers pour les données. Le soutien de M. Vincent Laffèche a été bien apprécié. Les auteurs remercient aussi Mme Josianne DeBlois et l'évaluateur anonyme pour la révision scientifique de la note, Mme Denise Tousignant pour l'édition, Mme Nathalie Langlois pour la révision typographique et Mme Maripierre Jalbert pour la mise en page.

Références

- Kozak, A., 1997. *Effects of multicollinearity and autocorrelation on the variable-exponent taper functions*. Can. J. For. Res. 27(5): 619-629.
- Larson, P.R., 1963. *Stem form development of forest trees*. For. Sci. Monograph 5 (Supplement to number 4, 1 December 1963): a0001-42.
- Li, R. et A.R. Weiskittel, 2010. *Comparison of model forms for estimating stem taper and volume in the primary conifer species of the North American Acadian Region*. Ann. For. Sci. 67(3): 302.
- Ministère des Ressources naturelles et de la Faune (MRNF), 2009. *Normes d'inventaire forestier. Analyse des tiges. Sélection, récolte et mesure en laboratoire. Édition 2009*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Direction des inventaires forestiers. 143 p.
- Pinheiro, J., D. Bates, S. DebRoy, D. Sarkar et R Development Core Team, 2010. *nlme: Linear and nonlinear mixed effects models*. R package version 3.1-97. [<http://cran.r-project.org/web/packages/nlme/index.html>].
- Quinn, G.P. et M.J. Keough, 2002. *Experimental design and data analysis for biologists*. Cambridge University Press, Royaume-Uni. 537 p.
- Schneider, R., M. Fortin et J.-P. Saucier, 2013. *Équations de défilement en forêt naturelle pour les principales essences commerciales du Québec*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles, Direction de la recherche forestière. Mémoire de recherche forestière n° 167. 34 p. [<http://www.mrn.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Divers/Memoire167.pdf>].
- Sharma, M. et R.G. Oderwald, 2001. *Dimensionally compatible volume and taper equations*. Can. J. For. Res. 31(5): 797-803.
- Sharma, M. et S.Y. Zhang, 2004. *Variable-exponent taper equations for jack pine, black spruce, and balsam fir in eastern Canada*. Forest Ecol. Manage. 198(1-3): 39-53.



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.

**Ressources
naturelles**

Québec 

ISSN 0834-4833
ISBN 978-2-550-69845-6
ISBN (pdf) 978-2-550-69846-3
F.D.C. 521
L.C. SD 557
Dépôt légal 2014
Bibliothèque nationale du Québec
© 2014 Gouvernement du Québec