

Titre : Comparaison des estimations de hauteur d'arbres obtenues à partir des relations hauteur-diamètre développées à la DRF et à la DIF

Responsables : Isabelle Auger, stat. ASSQ, M. Sc., Sylvain Bernier, stat., M. Sc.

Collaborateur : Carl Bergeron, ing.f., M. Sc.

Date : Août 2017

1. Contexte

La hauteur d'un arbre est une caractéristique dendrométrique essentielle en foresterie. Elle permet, entre autres, d'estimer le volume d'un arbre à l'aide d'un tarif de cubage. Lorsque la hauteur n'est pas mesurée, on utilise une relation hauteur-diamètre (HD) pour estimer la hauteur des arbres. Dans ce contexte, deux nouvelles relations HD ont été développées au cours des deux dernières années à la Direction générale de la connaissance et de l'aménagement durable des forêts (DGCADF) : l'une à la Direction des inventaires forestiers (DIF) et l'autre, à la recherche forestière (DRF). L'objectif de cet avis technique est de comparer, sur la base de critères statistiques, les estimations de la hauteur des tiges obtenues avec ces deux relations HD, puis de formuler une recommandation quant à la relation HD à utiliser dans les simulateurs de croissance forestière utilisés au Bureau du forestier en chef (BFEC).

La relation HD développée à la DIF (MFFP 2016a) sert principalement à estimer le volume marchand brut des arbres dénombrés dans les placettes-échantillons temporaires (PET) des inventaires écoforestiers du Québec méridional (IEQM) effectués par la DIF, pour ensuite estimer le volume marchand brut par peuplement sur la carte écoforestière originale. Les données de ces placettes-échantillons sont aussi transmises au BFEC qui les utilise pour développer des courbes d'évolution utilisées dans le calcul des possibilités forestières (CPF).

On peut citer tout ou partie de ce texte en indiquant la référence
© Gouvernement du Québec

La relation HD développée à la DRF (Auger 2016) est principalement utilisée dans les modèles de croissance forestière Artémis-2014 (Power 2016) et Natura-2014 (Auger, accepté). Ces modèles de croissance permettent de simuler l'évolution temporelle des caractéristiques des placettes-échantillons. Ils utilisent la relation HD pour estimer le volume des arbres à différentes périodes. Ils sont aussi utilisés par le BFEC dans le CPF pour construire les courbes d'évolution (Poulin 2013). Ainsi, pour les mêmes placettes-échantillons, le BFEC reçoit deux estimations différentes des volumes de bois sur pied : une de la DIF et une de la DRF. Il est à noter que depuis 2011, la DIF et la DRF utilisent le même tarif de cubage, soit celui de Fortin *et al.* (2007). L'historique de l'évolution des relations HD à la DGCADF est présenté à l'annexe 1.

2. Méthodologie

2.1. Relations hauteur-diamètre

La relation HD de la DIF s'appuie sur un modèle non linéaire mixte utilisant la fonction de Chapman-Richards à quatre paramètres (MFFP 2016a). Dans un premier temps, un modèle a été ajusté pour chaque essence à l'échelle provinciale, avec les données de la dernière mesure de la hauteur des arbres-études sélectionnés avec la méthode « systématique » des placettes-échantillons permanentes (PEP) du réseau BAS1 de la DIF (MFFP 2014), en ne conservant que les PEP situées au sud de la limite nordique des unités d'aménagement (UA). Dans un second temps, les estimations des paramètres du modèle provincial ont servi de loi *a priori* dans un ajustement bayésien de la fonction de Chapman-Richards à partir des PET, pour chaque unité de sondage et chaque essence. L'approche bayésienne permet de tenir compte de l'apport local provenant des données des PET dans l'estimation de la loi *a posteriori* des paramètres. Le diamètre à hauteur de poitrine (DHP, mesuré à une hauteur de 1,3 m) est la principale variable explicative du modèle, mais la surface terrière et le nombre de tiges marchandes à l'hectare de la placette sont aussi utilisés comme variables explicatives. De plus, certaines régions écologiques ou groupes de régions écologiques sont utilisées comme modificateurs de paramètres dans la forme générale du modèle.

La relation HD de la DRF a été étalonnée avec un modèle linéaire mixte qui utilise le logarithme du DHP comme principale variable explicative (Auger 2016). Des variables telles que la surface terrière marchande de la placette, le statut social de l'arbre, le climat, le type écologique et le sous-domaine bioclimatique sont aussi utilisées dans le modèle pour moduler la relation HD. Le modèle a été ajusté à partir des mesures des arbres-études sélectionnés avec la méthode « systématique » provenant de tous les mesurages des PEP et de celles obtenues lors du quatrième inventaire des PET de l'IEQM. Le modèle a été étalonné pour chaque essence, à l'échelle de l'ensemble du territoire forestier du Québec.

2.2. Données

Les estimations de hauteur d'arbres disponibles avec la relation HD de la DIF proviennent des compilations réalisées à partir du sondage des PET de 2014 et 2015 de 12 UA touchant les régions écologiques 4d, 4e, 5b, 5d, 5f, 5g, 6a, 6c, 6d, 6e, 6f, 6g, 6h et 6i. Ainsi, 20 % des placettes-échantillons sont situées dans

3 sous-domaines bioclimatiques de l'Est (sapinière à bouleau jaune, sapinière à bouleau blanc et pessière à mousses), et 80 % dans 2 sous-domaines de l'Ouest (sapinière à bouleau blanc et pessière à mousses). Ces UA comprennent des arbres répartis en 10 essences, dont 7 comptent au moins 20 arbres (Tableau 1). Nous avons aussi estimé la hauteur de ces mêmes arbres avec la relation HD de la DRF. Le tableau 2 présente le nombre d'arbres-études par essence pour chacune des UA ainsi que les régions écologiques qui touchent ces UA.

Tableau 1. Statistiques descriptives par essence des arbres-études systématiques dans les 12 unités d'aménagement (Moy. : moyenne; Min. : minimum; Max. : maximum).

Code de l'essence	Nom de l'essence	Nombre d'arbres	DHP (cm)			Hauteur (m)		
			Moy.	Min.	Max.	Moy.	Min.	Max.
BOP	Bouleau à papier	305	13,5	9,1	33,9	12,3	6,9	23,4
EPB	Épinette blanche	74	18,9	9,1	48,2	13,4	5,2	26,1
EPN	Épinette noire	2 851	14,4	9,1	36,2	12,4	4,5	26,2
MEL	Mélèze laricin	22	13,3	9,1	24,9	11,6	7,6	21,2
PET	Peuplier faux-tremble	160	18,1	9,1	44,1	15,3	8,2	27,6
PIG	Pin gris	501	14,5	9,1	35,0	12,4	6,2	24,7
SAB	Sapin baumier	854	14,1	9,1	53,6	11,5	4,3	22,8

Tableau 2. Nombre d'arbres-études par essence pour chacune des unités d'aménagement, et liste des régions écologiques touchées.

Unité d'aménagement	Régions écologiques [†]	Code de l'essence*										
		BOJ	BOP	EPB	EPN	ERR	MEL	PET	PIG	SAB	THO	Total
U02651_4OR	6e 6c 5b	0	20	3	214	0	3	2	31	45	0	318
U02661_4OR	6d 6g 6f	0	5	0	209	0	2	0	62	43	0	321
U02662_4OR	6f 6g 6e 6c	0	24	4	184	0	0	7	36	51	0	306
U02663_4OR	6c 6d	0	11	0	215	0	2	7	77	14	0	326
U02664_4OR	6e 6c 6f 6d	0	17	2	202	0	2	9	32	42	2	308
U02665_4OR	6c 6d	0	14	0	227	0	2	6	59	8	0	316
U02751_4OR	5d 6h 6g 6e 4e	2	71	20	400	2	2	27	46	242	0	812
U08666_4OR	6d 6a 6c	0	8	0	255	0	2	2	32	21	0	320
U08762_4OR	6c 6a	0	25	9	203	0	2	3	37	31	0	310
U08763_4OR	6a 6c	0	20	2	171	0	2	22	25	71	0	313
U08764_4OR	6a 6c	0	24	4	215	0	1	20	35	27	0	326
U09751_4OR	6h 5g 5f 4d 6i	4	66	30	356	7	2	55	29	259	2	810

* BOJ : bouleau jaune; ERR : érable rouge; THO : thuya occidental. Les codes des autres essences sont définis au tableau 1.

† Les régions écologiques sont énumérées en ordre décroissant du nombre d'arbres.

2.3. Analyses

Pour évaluer la qualité des estimations de hauteur, nous avons comparé les hauteurs estimées avec chacune des deux relations HD avec la hauteur mesurée des arbres, puis estimé le biais (Éq. 1), la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (REQM, éq. 2) et le R^2 (Éq. 3) des deux relations HD, par essence et par unité d'aménagement.

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

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

$$R^2 = 1 - \left[\sum_{l=1}^n (h_l - \hat{h}_l)^2 / \sum_{l=1}^n (h_l - \bar{h})^2 \right] \quad [3]$$

où \hat{h}_l est l'estimation de la hauteur (m),

h_l est la hauteur mesurée,

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

n est le nombre d'observations.

Le biais est un écart systématique par rapport à la vraie valeur, alors que la REQM et le R^2 sont des mesures de l'exactitude (une combinaison du biais et de la précision), qui représentent le degré auquel les estimations se rapprochent de la réalité (Pretzsch 2009). Le R^2 exprime la REQM par rapport à la variation des hauteurs mesurées. Une valeur positive du biais indique qu'en moyenne, les estimations sous-estiment la hauteur mesurée, tandis qu'un biais négatif indique une surestimation. Nous avons calculé ces statistiques pour les groupes d'au moins 20 observations.

3. Résultats et discussion

Globalement, les biais des estimations de la hauteur des arbres obtenues avec la relation HD de la DIF sont toujours plus petits que ceux des estimations obtenues avec le modèle de la DRF, peu importe l'essence (Tableau 3) : la valeur moyenne est plus grande que 30 cm pour toutes les essences avec la relation HD de la DRF, alors qu'elle est généralement près de 0 avec la relation de la DIF, sauf pour le mélèze laricin (MEL) et l'épinette blanche (EPB), qui ont des valeurs moyennes plus grandes que 30 cm (Tableau 4). Toutefois, le nombre d'arbres est beaucoup plus faible pour ces 2 essences que pour les autres. Les biais par essence, en valeur absolue, varient de 0 à 0,4 m pour les estimations avec la relation HD de la DIF, et de 0 à 0,8 m pour celles avec celle de la DRF. Dans tous les cas sauf celui du PIG avec

la relation HD de la DIF, les modèles sous-estiment en moyenne les hauteurs. À l'exception du MEL, les écarts de REQM ne dépassent pas 0,2 m en moyenne.

Les résultats par essence et par UA confirment que les estimations obtenues avec la relation HD de la DRF ont des biais plus grands que celles obtenues avec la relation de la DIF, et que ces biais sont en moyenne plus grands que 30 cm (Tableau 4). Les biais des estimations obtenues avec la relation HD de la DIF sont en général près de 0, tandis que ceux des estimations obtenues avec la relation de la DRF varient de 0 à 1,4 m en valeur absolue, selon l'essence et l'UA. L'écart entre les estimations obtenues avec les 2 relations HD est aussi généralement plus grand que 30 cm.

Les REQM, selon l'essence et l'UA, sont semblables pour les estimations obtenues avec les 2 relations HD, l'écart entre les 2 modèles pour cette statistique dépassant rarement 30 cm (Tableau 4). Pour le tiers des combinaisons d'UA et d'essences, les valeurs de R^2 des estimations obtenues avec la relation HD de la DIF sont plus grandes d'au moins 5 % (écart de 7 à 29 %) que celles obtenues avec la relation de la DRF.

En général, la qualité des estimations de hauteur avec la relation de la DIF est meilleure qu'avec celle de la DRF, en particulier si l'on considère le biais. La meilleure performance du modèle de la DIF peut être attribuée en partie à son échelle de développement. Le modèle de la DRF a été ajusté pour l'ensemble du territoire forestier du Québec, en utilisant des variables explicatives de caractéristiques de station, de peuplement et de rang social de l'arbre pour obtenir des estimations de hauteur les plus précises possible. Un tel modèle peut difficilement être aussi performant qu'un modèle ajusté plus localement, comme celui de la DIF. De plus, le fait que le modèle de la DRF ait été ajusté en conservant les placettes au nord de la limite nordique des UA peut avoir contribué à certaines sous-estimations.

L'étalonnage de plusieurs dizaines de modèles pour chaque essence afin d'obtenir des estimations locales, sur un territoire forestier aussi grand que celui du Québec, est très exigeant. Un travail de cette ampleur est justifiable lorsque la précision des estimations locales est d'une grande importance. C'est le cas pour la DIF, qui a à estimer le volume de bois sur pied le plus précisément possible pour chaque UA et agence de la forêt privée sondées, mais peut-être moins pour la DRF, qui utilise principalement les estimations de hauteur à une échelle plus grande dans ses modèles de croissance.

Il reste à vérifier ces constats pour les essences non évaluées, principalement des essences feuillues tolérantes à l'ombre que l'on retrouve plus au sud dans des forêts mélangées, comme le bouleau jaune, l'érable à sucre, l'érable rouge, le hêtre à grandes feuilles, le frêne noir, l'ostryer de Virginie et le tilleul d'Amérique, ainsi que les essences résineuses tolérantes à l'ombre, comme la pruche de l'Est et le pin blanc.

Il aurait été d'intérêt d'estimer les biais à l'échelle du volume de l'arbre, puisque c'est généralement cette variable, qui est utilisée par les forestiers, la hauteur n'étant qu'une variable intermédiaire pour l'obtenir. Toutefois, les biais des estimations de hauteurs devraient se transposer directement en biais sur le volume, car la formule pour estimer ce dernier relie linéairement la hauteur au volume (Fortin *et al.* 2007).

Tableau 3. Évaluation par essence des estimations de hauteurs obtenues avec la relation HD de la DIF et avec celle de la DRF.

Code de l'essence	Nombre d'arbres	Hauteur mesurée moyenne (m)	Biais (m)				REQM				R2		
			DIF	DRF	Différence entre les estimations	Différence relative (%)	DIF	DRF	Différence	Différence relative (%)	DIF	DRF	Différence
BOP	305	12,30	0,02	0,42	0,40	3,3	1,81	1,91	0,10	0,8	0,54	0,49	-0,05
EPB	74	13,38	0,36	0,79	0,43	3,2	1,91	2,07	0,16	1,2	0,80	0,77	-0,03
EPN	2 851	12,44	0,00	0,50	0,50	4,0	1,54	1,58	0,04	0,3	0,80	0,79	-0,01
MEL	22	11,61	0,32	0,66	0,34	2,9	0,61	1,52	0,91	7,9	0,97	0,78	-0,18
PET	160	15,31	0,06	0,48	0,42	2,7	1,72	1,93	0,21	1,4	0,85	0,82	-0,04
PIG	501	12,37	-0,03	0,57	0,60	4,9	1,39	1,62	0,23	1,9	0,84	0,78	-0,06
SAB	854	11,47	0,07	0,56	0,49	4,3	1,60	1,74	0,14	1,3	0,78	0,73	-0,04

La statistique de la relation HD de la DIF indique une meilleure estimation de la hauteur que celle de la DRF.
 La statistique de la relation HD de la DRF indique une meilleure estimation de la hauteur que celle de la DIF.
 Le biais est plus grand que 30 cm.
 La différence entre la statistique des 2 relations HD est plus grande que 30 cm pour le biais et la REQM (différence plus grande que 0,05 pour le R²).

Tableau 4. Évaluation par essence et par unité d'aménagement des estimations de hauteurs obtenues avec la relation HD de la DIF et avec celle de la DRF.

Code de l'essence	Unité d'aménagement	Nombre d'arbres	Hauteur mesurée moyenne (m)	Biais				REQM				R ²		
				DIF (m)	DRF (m)	Différence entre les estimations (m)	Différence relative (%)	DIF (m)	DRF (m)	Différence (m)	Différence relative (%)	DIF	DRF	Différence
BOP	U02651_4OR	20	12,61	-0,17	0,12	0,28	2,3	1,94	1,97	0,03	0,2	0,63	0,62	-0,01
	U02662_4OR	24	11,73	0,00	0,81	0,81	6,9	1,94	2,20	0,25	2,2	0,37	0,19	-0,18
	U02751_4OR	71	12,75	0,10	-0,03	-0,13	-1,0	1,82	1,72	-0,10	-0,8	0,56	0,61	0,05
	U08762_4OR	25	11,70	-0,05	0,26	0,31	2,6	2,15	2,04	-0,11	-0,9	0,56	0,60	0,04
	U08763_4OR	20	13,05	-0,01	0,97	0,98	7,5	2,13	2,41	0,27	2,1	0,50	0,36	-0,14
	U08764_4OR	24	12,20	-0,04	0,21	0,26	2,1	1,44	1,41	-0,03	-0,3	0,58	0,60	0,02
	U09751_4OR	66	12,50	0,04	1,22	1,18	9,5	1,98	2,28	0,30	2,4	0,31	0,09	-0,22
EPB	U02751_4OR	20	13,23	0,16	0,29	0,13	1,0	1,65	1,67	0,02	0,1	0,71	0,70	-0,01
	U09751_4OR	30	11,57	0,11	0,42	0,30	2,6	2,29	2,18	-0,12	-1,0	0,56	0,60	0,04
EPN	U02651_4OR	214	14,77	0,06	0,98	0,91	6,2	1,75	1,93	0,19	1,3	0,77	0,72	-0,05
	U02661_4OR	209	11,81	-0,04	0,57	0,61	5,1	1,51	1,61	0,10	0,8	0,78	0,75	-0,03
	U02662_4OR	184	11,61	-0,05	0,35	0,40	3,5	1,26	1,29	0,03	0,2	0,83	0,82	-0,01
	U02663_4OR	215	11,93	0,01	0,67	0,66	5,5	1,36	1,48	0,12	1,0	0,77	0,72	-0,04
	U02664_4OR	202	12,46	0,01	0,49	0,49	3,9	1,45	1,47	0,02	0,1	0,79	0,78	0,00
	U02665_4OR	227	12,47	0,00	0,46	0,46	3,7	1,34	1,40	0,05	0,4	0,83	0,82	-0,01

Tableau 4. (fin)

Code de l'essence	Unité d'aménagement	Nombre d'arbres	Hauteur mesurée moyenne (m)	Biais				REQM				R ²		
				DIF (m)	DRF (m)	Différence entre les estimations (m)	Différence relative (%)	DIF (m)	DRF (m)	Différence (m)	Différence relative (%)	DIF	DRF	Différence
	U02751_4OR	400	12,82	0,00	0,30	0,31	2,4	1,73	1,67	-0,06	-0,5	0,76	0,78	0,02
	U08666_4OR	255	11,83	0,00	0,36	0,36	3,1	1,51	1,53	0,01	0,1	0,81	0,81	0,00
	U08762_4OR	203	13,51	0,02	0,66	0,65	4,8	1,47	1,56	0,10	0,7	0,81	0,78	-0,03
	U08763_4OR	171	13,29	0,03	0,60	0,57	4,3	1,67	1,74	0,07	0,5	0,80	0,79	-0,02
	U08764_4OR	215	12,16	0,04	0,39	0,35	2,8	1,63	1,60	-0,03	-0,3	0,79	0,80	0,01
	U09751_4OR	356	11,30	-0,04	0,42	0,46	4,1	1,54	1,56	0,02	0,2	0,75	0,74	-0,01
PET	U02751_4OR	27	15,88	-0,01	0,09	0,09	0,6	1,50	1,99	0,50	3,1	0,89	0,81	-0,08
	U08763_4OR	22	17,25	0,17	1,44	1,28	7,4	2,05	2,74	0,69	4,0	0,84	0,71	-0,13
	U08764_4OR	20	13,34	-0,06	-0,39	-0,34	-2,5	1,56	1,48	-0,09	-0,6	0,77	0,79	0,02
	U09751_4OR	55	15,25	0,02	0,78	0,76	5,0	1,94	1,86	-0,08	-0,5	0,82	0,83	0,01
PIG	U02651_4OR	31	17,14	0,06	0,45	0,39	2,3	1,85	2,18	0,33	1,9	0,62	0,47	-0,15
	U02661_4OR	62	10,57	-0,03	0,86	0,89	8,5	1,08	1,44	0,36	3,4	0,70	0,47	-0,23
	U02662_4OR	36	11,56	0,00	0,89	0,89	7,7	1,58	1,93	0,35	3,0	0,40	0,11	-0,29
	U02663_4OR	77	11,50	-0,05	0,56	0,61	5,3	1,07	1,35	0,28	2,4	0,84	0,75	-0,09
	U02664_4OR	32	13,16	-0,04	0,39	0,43	3,2	1,25	1,38	0,13	1,0	0,80	0,75	-0,04
	U02665_4OR	59	11,26	-0,10	0,34	0,44	3,9	1,17	1,32	0,15	1,4	0,85	0,81	-0,04
	U02751_4OR	46	14,57	0,01	0,86	0,85	5,8	1,57	1,78	0,21	1,4	0,85	0,80	-0,04
	U08666_4OR	32	12,24	-0,02	1,13	1,15	9,4	1,32	1,73	0,41	3,3	0,75	0,57	-0,18
	U08762_4OR	37	12,10	-0,05	0,06	0,11	0,9	1,60	1,65	0,05	0,4	0,76	0,75	-0,02
	U08763_4OR	25	13,32	0,06	0,46	0,40	3,0	1,92	1,98	0,06	0,5	0,78	0,76	-0,01
	U08764_4OR	35	12,77	-0,10	-0,43	-0,33	-2,6	1,22	1,21	-0,01	0,0	0,90	0,90	0,00
	U09751_4OR	29	11,43	-0,08	1,22	1,30	11,3	1,53	1,97	0,44	3,8	0,69	0,49	-0,20
SAB	U02651_4OR	45	12,56	0,18	1,43	1,24	9,9	1,56	2,12	0,56	4,5	0,74	0,51	-0,22
	U02661_4OR	43	10,02	-0,08	-0,65	-0,57	-5,7	1,71	1,77	0,06	0,6	0,75	0,73	-0,02
	U02662_4OR	51	11,78	0,12	0,52	0,39	3,3	1,59	1,70	0,10	0,9	0,69	0,65	-0,04
	U02664_4OR	42	12,03	0,07	0,90	0,83	6,9	1,34	1,60	0,26	2,1	0,84	0,77	-0,07
	U02751_4OR	242	11,78	-0,07	0,22	0,29	2,4	1,78	1,74	-0,03	-0,3	0,77	0,78	0,01
	U08666_4OR	21	11,45	0,19	0,16	-0,03	-0,3	1,00	1,00	0,00	0,0	0,90	0,90	0,00
	U08762_4OR	31	11,17	0,22	1,13	0,90	8,1	1,74	2,04	0,30	2,7	0,62	0,47	-0,14
	U08763_4OR	71	12,73	0,09	0,98	0,89	7,0	1,41	1,74	0,33	2,6	0,86	0,79	-0,07
	U08764_4OR	27	10,65	0,18	0,32	0,13	1,3	1,56	1,65	0,09	0,9	0,73	0,70	-0,03
	U09751_4OR	259	10,94	0,14	0,79	0,65	6,0	1,56	1,75	0,19	1,7	0,73	0,66	-0,07

La statistique de la relation HD de la DIF indique une meilleure estimation de la hauteur que celle de la DRF.

La statistique de la relation HD de la DRF indique une meilleure estimation de la hauteur que celle de la DIF.

Le biais est plus grand que 30 cm.

La différence entre la statistique des 2 relations HD est plus grande que 30 cm pour le biais et la REQM (différence plus grande que 0,05 pour le R²).

4. Conclusion et recommandations

En considérant les résultats présentés dans cet avis technique et l'utilisation des modèles, des constats et recommandations peuvent être faits selon trois aspects :

1) *Meilleur modèle sur la base des critères statistiques considérés*

Tout d'abord, sur le plan statistique, puisque le BFEC réalise le CPF l'échelle de l'UA et que la relation HD de la DIF estime les hauteurs sans biais, nous recommandons au BFEC d'utiliser cette dernière sur les territoires couverts par cette étude, soit les UA présentées au tableau 2.

2) *Intégration du modèle de la DIF dans la plateforme de simulation Capsis*

La DRF pourra intégrer la relation HD de la DIF dans la plateforme de simulation Capsis, sur laquelle ses modèles de croissance sont disponibles. Elle pourra ainsi pouvoir fournir au BFEC les mêmes estimations de volume que la DIF. Toutefois, cette intégration ne peut se faire immédiatement, car pour l'instant, les estimations de hauteurs avec la relation HD de la DIF sont obtenues avec une approche stochastique par simulation dont le temps d'exécution peut parfois être long. Lorsqu'une méthode déterministe valable sera disponible pour estimer la hauteur avec la relation HD de la DIF, cette dernière pourra être ajoutée dans la plateforme Capsis.

3) *Utilisation des modèles d'estimation de la hauteur des tiges au travers l'ensemble du processus de création des courbes d'évolution par le BFEC*

Il faut considérer que le BFEC ne développe plus les courbes d'évolution par UA dans le CPF 2018-2023, mais plutôt par sous-domaine bioclimatique. De plus, l'ensemble des PET du troisième et du quatrième inventaire, de même que les PEP situées dans les UA des sous-domaines, sont utilisées pour le développement des courbes d'évolution. Ainsi, en fonction du calendrier de livraison des PET et des compilations forestières, le nouveau modèle de la DIF pourrait ne pas être disponible pour une partie du territoire où le BFEC développe ses courbes. Dans de tels cas, les anciennes relations HD de la DIF (Annexe 1) sont utilisées dans certaines placettes-échantillons. Tant que le nouveau modèle de la DIF ne sera pas disponible pour l'ensemble des territoires, il subsistera des différences entre les volumes estimés par la DIF et par la DRF à l'échelle du sous-domaine bioclimatique.

5. Références

Auger, I., (accepté). *Natura-2014 : Mise à jour et évaluation du modèle de croissance forestière à l'échelle du peuplement*. Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de la recherche forestière. Note de recherche forestière.

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://www.mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Auger-Isabelle/Note146.pdf>]

Fortin, M., J. DeBlois, S. Bernier et G. Blais, 2007. *Mise au point d'un tarif de cubage général pour les forêts québécoises : une approche pour mieux évaluer l'incertitude associée aux prévisions*. For. Chron. 83: 754-765.

Fortin, M., S. Bernier, J.-P. Saucier et F. Labbé, 2009. *Une relation hauteur-diamètre tenant compte de l'influence de la station et du climat pour 20 essences commerciales du Québec*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Direction de la recherche forestière. Mémoire de recherche forestière n° 153. 22 p.

[<https://www.mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Fortin-Mathieu/Memoire153.pdf>]

Fortin, M. et L. Langevin, 2010. *ARTÉMIS-2009 : un modèle de croissance basé sur une approche par tiges individuelles pour les forêts du Québec*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Direction de la recherche forestière. Mémoire de recherche forestière n° 156. 48 p.

[<https://www.mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Fortin-Mathieu/Memoire156.pdf>]

Labbé, F., 2006. *Estimation de l'importance du biais du tarif de cubage local causé par le mode de sélection des arbres étudiés lors des 2^e et 3^e programmes d'inventaire — Analyse réalisée à partir du réseau BASE1 de placettes-échantillons permanentes*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Direction des inventaires forestiers. 13 p. (rapport interne).

[MFFP] Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, 2014. *Réseaux des placettes-échantillons permanentes du Québec méridional*. Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction des inventaires forestiers. 10 p.

[<http://www.mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/Reseaux-PEP.pdf>]

- [MFFP] Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, 2016a. *Précisions sur les variables dendrométriques estimées dans les compilations forestières*. Dans : Annexe XII du *Guide d'utilisation des produits intégrés de l'inventaire écoforestier du Québec méridional*. Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction des inventaires forestiers. 6 p.
[\[http://www.mffp.gouv.qc.ca/forets/inventaire/pdf/guide-donnees-dendometriques.pdf\]](http://www.mffp.gouv.qc.ca/forets/inventaire/pdf/guide-donnees-dendometriques.pdf)
- [MFFP] Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, 2016 b. *Norme d'inventaire écoforestier — Placettes-échantillons temporaires*. Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction des inventaires forestiers. 172 p.
[\[http://www.mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/Norme-PET.pdf\]](http://www.mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/Norme-PET.pdf)
- [MFFP] Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, 2016 c. *Norme d'inventaire écoforestier — Placettes-échantillons permanentes*. Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction des inventaires forestiers. 238 p.
[\[http://www.mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/Norme-PEP.pdf\]](http://www.mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/Norme-PEP.pdf)
- [MRN] Ministère des Ressources naturelles, 2002. *Normes d'inventaire forestier – Placettes-échantillons temporaires, peuplement de 7 m et plus de hauteur*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles, Direction des inventaires forestiers. 194 p.
[\[ftp://ftp.mrn.gouv.qc.ca/Public/Bibliointer/Mono/2013/12/1143430.pdf\]](ftp://ftp.mrn.gouv.qc.ca/Public/Bibliointer/Mono/2013/12/1143430.pdf)
- Poulin, J., 2013. *Évolution des strates. Fascicule 2.4*. Dans : Bureau du forestier en chef. *Manuel de détermination des possibilités forestières 2013-2018*. Gouvernement du Québec, Roberval, QC. p. 55-61.
[\[http://forestierenchef.gouv.qc.ca/wp-content/uploads/2013/01/055-61_MDPF_Evolution.pdf\]](http://forestierenchef.gouv.qc.ca/wp-content/uploads/2013/01/055-61_MDPF_Evolution.pdf)
- Pothier, D. et I. Auger, 2011. *NATURA-2009 : un modèle de prévision de la croissance à l'échelle du peuplement pour les forêts du Québec*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Direction de la recherche forestière. Mémoire de recherche forestière n° 163. 56 p.
[\[https://www.mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Auger-Isabelle/Memoire163.pdf\]](https://www.mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Auger-Isabelle/Memoire163.pdf)
- Power, H., 2016. *Comparaison des biais et de la précision des estimations des modèles Artémis-2009 et Artémis-2014 pour la surface terrière totale des peuplements forestiers, avec et sans coupe partielle, sur une période de 40 ans*. Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de la recherche forestière. Note de recherche forestière n° 143. 21 p.
[\[https://www.mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Power-Huques/Note143.pdf\]](https://www.mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Power-Huques/Note143.pdf)
- Pretzsch, H., 2009. *Forest dynamics, growth and yield, from measurement to model*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg. 664 p.

Annexe 1

Historique de l'évolution des relations hauteur-diamètre à la Direction générale de la connaissance et de l'aménagement durable des forêts

La situation actuelle, où plus d'une relation HD est utilisée dans un même calcul des possibilités forestières (CPF), était présente dès les premiers CPF réalisés par le Bureau du forestier en chef (BFEC) pour la période 2013-2018. Un retour sur l'évolution des différentes méthodes d'estimation de la hauteur de tiges est fait à titre de référence afin d'expliquer l'origine de l'utilisation de modèles différents dans les compilations forestières et dans le CPF.

Afin d'estimer la hauteur des tiges marchandes des essences commerciales dénombrées dans les placettes-échantillons temporaires (PET), la Direction des inventaires forestiers (DIF) a appliqué des relations HD locales qui ont évolué d'un inventaire à l'autre. À la fin du troisième inventaire, il a été démontré que les estimations obtenues avec le modèle linéaire alors appliqué étaient biaisées (Labbé 2006). Ces biais étaient causés par les critères de sélection des arbres-études dans les PET des deuxième et troisième inventaires (MRN 2002). Les arbres sélectionnés dans ces placettes-échantillons devaient être représentatifs du diamètre moyen et de la hauteur des arbres appartenant aux étages dominants et codominants. L'échantillon ainsi créé n'était pas représentatif de l'ensemble des tiges de la population sondée. Depuis le quatrième inventaire, un des trois arbres-études mesurés dans les PET est sélectionné de façon systématique (MFFP 2016b) afin de représenter l'ensemble des tiges et de développer des relations non biaisées avec la même méthodologie d'un modèle linéaire à trois paramètres (« LIN3 ») en fonction du DHP et du DHP².

Pour les besoins du CPF 2013-2018, le BFEC a demandé à la DIF de remédier au problème de biais pour les compilations forestières des unités d'aménagement (UA) avec les données du troisième inventaire. La Direction de la recherche forestière (DRF), en collaboration avec la DIF, a donc développé un nouveau modèle (Fortin *et al.* 2009) à partir des arbres-études sélectionnés selon la méthode « systématique » et mesurés dans les placettes-échantillons permanentes de l'inventaire produit par la DIF (MFFP 2016c). En comparaison avec les relations LIN3 du troisième inventaire, les biais par unité de compilation et essence étaient en général significativement plus faibles avec ce nouveau modèle. Cependant, Labbé (comm. pers.) a montré que, dans près du quart des unités de compilation, les biais étaient supérieurs à 5 %. La DIF a donc adapté le modèle de Fortin *et al.* (2009) à l'échelle plus locale des régions écologiques. Dans ce modèle, l'indice de statut social retenu dans les variables explicatives du modèle de Fortin *et al.* (2009) avait été exclu puisqu'il induisait parfois des estimations peu réalistes, lorsqu'il était appliqué aux tiges des PET. Ces modèles plus locaux ont été utilisés dans les compilations du troisième inventaire fournies au BFEC.

Après avoir constaté que la relation HD de Fortin *et al.* (2009) était biaisée dans certaines situations, la DRF a développé, pour ses besoins, un nouveau modèle à l'échelle provinciale. Pour ce faire, elle a utilisé, en

plus des arbres-études « systématiques » des PEP, les nouvelles données de hauteur des arbres-études « systématiques » disponibles dans les PET du quatrième inventaire (Auger 2016). Parallèlement, la DIF, qui avait besoin de relations HD à une échelle locale, a aussi développé un nouveau modèle à partir des arbres-études des PET du quatrième inventaire.

Par ailleurs, la DRF a fourni au BFEC des modèles de croissance forestière dans lesquels une relation HD était utilisée pour estimer la hauteur des arbres. Pour le CPF 2013-2018, les modèles de croissance Artémis-2009 (Fortin et Langevin 2010) et Natura-2009 (Pothier et Auger 2011) ont été utilisés par le BFEC, dans lesquels la relation HD de Fortin *et al.* (2009) était utilisée. Pour le CPF 2018-2023, le BFEC a utilisé les modèles de croissance Artémis-2014 (Power 2016) et Natura-2014 (Auger, accepté) de la DRF, dans lesquels la relation HD de Auger (2016) était implantée. C'est ainsi que les courbes d'évolution développées par le BFEC dans ces deux CPF ont utilisé des relations HD différentes de celles utilisées dans les compilations forestières fournies par la DIF.