

Titre :	Artémis 2014 v. 4.2.0, une nouvelle version du modèle de croissance
Auteur(s) :	Hugues Power, ing.f., Ph. D.
Date :	Octobre 2021

Le modèle de croissance par tige individuelle Artémis est utilisé pour prévoir l'évolution de placettes-échantillons lors des calculs de possibilité forestière ou des analyses de rentabilité économique. D'abord diffusé en 2009, il a été revu en 2014 (Artémis 2014 version 3.0.6) pour intégrer plus de mesures dans ses données de calibration. Afin de tenir compte de l'ajout de nouvelles mesures provenant des placettes-échantillons permanentes et de tester de nouvelles variables explicatives, les paramètres associés aux principales végétations potentielles ont été révisés et intégrés à une nouvelle version du modèle, soit la version 4.2.0.

1. Introduction

Artémis est un modèle de croissance par tige individuelle développé par Mathieu Fortin et Luc Langevin (Fortin et Langevin 2010) dans les années 2000. Il permet de simuler l'accroissement et le risque de mortalité des arbres de dimension marchande de même que le recrutement pour les placettes-échantillons réparties dans les principales végétations potentielles du Québec. La version originale du modèle (Artémis 2009) a été mise à jour en 2014 afin d'intégrer les mesures de placettes-échantillons permanentes (PEP) issues du 4^e inventaire écoforestier décennal du Québec méridional (Power 2016). Cette nouvelle version du modèle a été diffusée sous le nom d'Artémis 2014.

Depuis la diffusion de la version 3.0.6 d'Artémis 2014, l'ajout d'autres mesures de PEP, notamment celles du 4^e inventaire décennal de la région de l'Outaouais, ainsi que le développement de nouvelles connaissances concernant le comportement du modèle (Power et Auger 2020) nous ont amenés à revoir les paramètres du modèle pour les végétations potentielles sur lesquelles celui-ci est le plus souvent utilisé.

Les travaux de mise à jour d'Artémis 2014 se sont déroulés en 2 temps : d'abord à l'automne 2018, pour un premier groupe de végétations potentielles (FE2 = érablières à tilleuls; FE3 = érablières à bouleau jaune; MJ1 = bétulaies jaunes à sapin et à érable à sucre; MJ2 = bétulaies jaunes à sapin), puis à l'automne 2020, pour un second groupe (MS1 = sapinières à bouleau jaune; MS2 = sapinières à bouleau blanc). Les résultats de ces travaux ont mené à la conception de la version 4.2.0 du modèle Artémis 2014.

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

2. Matériel et méthodes

Dans la version 4.2.0, le nombre de mesures ayant servi à paramétrer le modèle a augmenté pour chacune des végétations potentielles (tableau 1). La version 3.0.6 d'Artémis 2014 avait été paramétrée en utilisant uniquement les mesures des PEP de la Direction des inventaires forestiers. La version 4.2.0, quant à elle, inclut aussi les placettes du réseau de suivi des effets réels (ER) des coupes de jardinage de la Direction de la recherche forestière (Guillemette *et al.* 2013). Ces placettes, majoritairement situées sur la végétation potentielle FE3, ont la même dimension que les PEP de la Direction des inventaires forestiers, et les mesures qui y sont prises sont semblables. Elles viennent ainsi augmenter significativement le nombre de placettes suivies après des coupes partielles qui sont disponibles pour paramétrer le modèle. Les mesures utilisées pour la révision des paramètres des végétations potentielles FE2, FE3, MJ1 et MJ2 ont été prises de 1970 à 2016, alors que celles utilisées pour les végétations potentielles MS1 et MS2 ont été prises jusqu'en 2019.

Tableau 1. Nombre de mesures par végétation potentielle utilisées pour paramétrer les versions 3.0.6 et 4.2.0 du modèle Artémis 2014.

Végétation potentielle	Nombre de mesures	
	Artémis 2014 v. 3.0.6	Artémis 2014 v. 4.2.0
FE2 (érablières à tilleul)	927	1 091
FE3 (érablières à bouleau jaune)	2 880	3 961
MJ1 (bétulaies jaunes à sapin et à érable à sucre)	1 672	1 877
MJ2 (bétulaies jaunes à sapin)	2 302	2 907
MS1 (sapinières à bouleau jaune)	1 072	1 409
MS2 (sapinières à bouleau blanc)	4 860	5 964

2.1 Nouvelles variables

Nous avons testé différentes variables afin d'améliorer la performance du modèle. Lors de la calibration du module de mortalité, nous avons remarqué un biais spatial distinguant les régions écologiques situées au nord ou au nord du fleuve Saint-Laurent. Comme la mortalité était plus forte sur le territoire situé au nord du Saint-Laurent pour les végétations potentielles FE2 et FE3, nous avons créé une variable afin de les distinguer l'une de l'autre, et nous l'avons intégrée au module de mortalité de ces 2 végétations potentielles.

Une sous-estimation du recrutement du hêtre à grandes feuilles (*Fagus grandifolia* Ehrh.), notamment après coupe partielle, avait également été rapportée, et ce, tant par des travaux scientifiques (MFFP 2017) que par des communications personnelles d'aménagistes forestiers. Afin de pallier cette faiblesse du modèle, nous avons testé une interaction entre le hêtre à grandes feuilles et la présence de coupe partielle comme variable explicative du recrutement sur les végétations potentielles FE2 et FE3.

Nous avons testé les caractéristiques édaphiques dérivées de la carte numérique des sols (Sylvain *et al.* 2021) lors de la période de travail sur le second groupe de végétations potentielles (MS1 et MS2) seulement, puisque ces données n'étaient pas disponibles lors de la révision des paramètres du premier groupe de végétations potentielles. Ces données comprennent 6 caractéristiques du sol : sa capacité d'échange cationique, son contenu en matière organique, son pH et ses proportions en argile, en limon et en sable.

Finalement, pour les paramètres des végétations potentielles MS1 et MS2, nous avons aussi testé s'il y avait un avantage à remplacer la variable binaire indiquant la présence de défoliations modérées à sévères de la tordeuse des bourgeons de l'épinette (TBE; *Choristoneura fumiferana* (Clemens)) sur une période de 4 ans ou plus (Pothier et Mailly 2006) par un indice de sévérité de défoliation (Pothier *et al.* 2005), utilisé notamment par le modèle Natura (Auger 2017).

2.2 Établissement des paramètres et choix des modèles

Nous avons établi les paramètres des modules de mortalité, d'accroissement diamétral et de recrutement comme pour la version 3.0.6 d'Artémis 2014 (Power 2016). Par la suite, nous avons comparé le biais et la précision des estimations de la surface terrière pour les modèles qui incluaient les nouveaux paramètres aux valeurs de la version 3.0.6 d'Artémis 2014. Lorsque le nouveau modèle avait une meilleure performance que la version précédente, nous avons conservé les nouveaux paramètres. Lorsque les biais et la précision ne présentaient pas d'amélioration notable par rapport à la version précédente, nous avons recalculé les biais et la précision de la version 3.0.6 d'Artémis 2014 avec les données de calibration de la version 4.2.0. Si le biais et la précision de la version 3.0.6 demeuraient semblables à ceux de la version 4.2.0 après cette étape, nous avons réexaminé les biais des paramètres de la version 3.0.6 par module. Lorsque les modules intégrant les nouveaux paramètres présentaient de meilleures performances que les anciens, nous avons remplacé les modules de la version 3.0.6 avec ceux contenant les nouveaux paramètres dans la version 4.2.0.

2.3 Validation des modèles

Nous avons vérifié les prévisions des modèles à l'aide de la technique de la validation croisée (Efron et Gong 1983). Pour chaque végétation potentielle, les placettes ont d'abord été divisées en 10 groupes. Puis, tour à tour, les placettes de chaque groupe ont été simulées avec les paramètres calibrés à l'aide des placettes des 9 autres groupes. Chaque placette, à partir de sa première mesure, a été simulée pour une période de temps correspondant à l'intervalle entre 2 mesures consécutives. Par la suite, nous avons comparé les résultats des simulations aux observations de chacune des mesures correspondantes, pour ensuite calculer les biais et les erreurs pour les estimations de la surface terrière, par type de placettes (avec ou sans coupe partielle) et par durée de simulation (période 1 = 1-14 ans; période 2 = 15-24 ans; période 3 = 25-34 ans; période 4 = >34 ans).

Nous avons aussi examiné le comportement des modèles avec les paramètres mis à jour, en simulant les placettes-échantillons temporaires du 4^e inventaire écoforestier décennal du Québec méridional avec les 2 versions du modèle. Cette validation a permis de comparer le comportement des 2 versions du modèle, notamment quant à la moyenne et à la distribution de leurs prévisions de la surface terrière marchande.

3. Résultats et discussion

Dans le cas des végétations potentielles du 1^{er} groupe (FE2, FE3, MJ1 et MJ2), nous avons retenu les nouveaux paramètres des modules de mortalité, d'accroissement diamétral et de recrutement dans la version 4.2.0 du modèle Artémis. Pour le 2^e groupe (MS1 et MS2), le biais et la précision des prévisions de la surface terrière nous ont amenés à modifier seulement le module de recrutement de la végétation potentielle MS1, et à conserver tels quels les paramètres de la végétation potentielle MS2.

Pour les intervalles de croissance ne faisant pas suite à une coupe partielle, les biais et la précision représentée par la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (REQM) des versions 3.0.6 et 4.2.0 sont généralement comparables (tableau 2). Parmi les différences observées, notons que pour les végétations potentielles MS1 et MS2, le biais des prévisions de la surface terrière totale est plus grand dans la version 4.2.0 que dans la version 3.0.6. En revanche, le biais des prévisions de la surface terrière des principales essences est plus faible dans la version 4.2.0. C'est notamment le cas pour le sapin baumier (*Abies balsamea* (L.) Mill.), pour lequel la surestimation aux périodes 3 et 4 est plus grande dans la version 3.0.6 que dans la version 4.2.0.

En général, en ce qui concerne la performance des modèles après coupe partielle (tableau 3), on note que les biais des prévisions de la surface terrière (totale et par essence) diminuent et que la précision des prévisions augmente dans la version 4.2.0 par rapport à la version 3.0.6. Pour les végétations potentielles FE3 et MJ2, notamment, le biais des prévisions de la surface terrière a diminué, la précision s'est améliorée et le biais des prévisions de la surface terrière des essences principales a diminué. Pour la végétation potentielle FE3, cette situation est d'ailleurs documentée en détail dans l'avis technique SSRF-24 (Bilodeau-Gauthier *et al.* 2021). L'amélioration du comportement du modèle Artémis 2014 dans ces circonstances repose entre autres sur l'ajout d'une variable définissant la seconde période de croissance suivant l'application d'une coupe partielle. Celle-ci a permis de mieux capter l'augmentation du recrutement qui se produit durant cette période.

L'ajout des données ER au jeu de calibration a permis d'augmenter substantiellement le nombre de mesures après coupe partielle dans la version 4.2.0 du modèle Artémis. Pour la végétation potentielle FE3, notamment, le nombre de mesures après coupe partielle a augmenté de 75 %. Cette amélioration permet au modèle de bien capter le comportement des placettes-échantillons après une coupe partielle, situation pour laquelle le modèle est souvent utilisé.

Tableau 2. Biais total et par essence, racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (REQM) et coefficient de détermination (R^2) des prévisions de la surface terrière par les versions 3.0.6 et 4.2.0 d'Artémis 2014, pour les intervalles de croissance (périodes) des placettes échantillons permanentes n'ayant pas fait l'objet de coupe partielle. Les biais relatifs sont présentés entre parenthèses.

Végétation potentielle	Version du modèle	Période	n	Biais total des prévisions de la surface terrière (m ² /ha)		REQM (m ²)	R^2	Biais par essence des prévisions de la surface terrière (m ² /ha)						
								ERS		ERR		HEG		
FE2	3.0.6	Toutes	520	0,0	(0,2 %)	4,4	(18,2 %)	0,70	0,3	(2,6 %)	0,0	(0,8 %)	-0,2	(-6,7 %)
		1	278	0,4	(1,8 %)	3,1	(13,4 %)		0,4	(3,3 %)	0,0	(2,3 %)	-0,1	(-3,3 %)
		2	141	0,5	(1,9 %)	4,9	(19,5 %)		0,4	(3,0 %)	0,1	(6,3 %)	-0,1	(-1,6 %)
		3	73	-0,9	(-3,6 %)	6,2	(24,8 %)		0,2	(1,7 %)	-0,1	(-3,7 %)	-0,4	(-14,7 %)
	4.2.0	Toutes	572	0,1	(0,4 %)	4,8	(19,8 %)	0,65	0,3	(3,1 %)	0,0	(0,7 %)	-0,2	(-6,5 %)
		1	282	0,5	(2,1 %)	3,3	(14,5 %)		0,4	(3,6 %)	0,1	(2,7 %)	-0,1	(-2,9 %)
		2	163	0,8	(3 %)	5,3	(21,1 %)		0,4	(3,1 %)	0,1	(5,3 %)	0,0	(0,1 %)
		3	73	-0,7	(-2,7 %)	5,9	(23,7 %)		0,1	(1,1 %)	-0,1	(-4,3 %)	-0,2	(-8,6 %)
		4	54	-3,0	(-12,5 %)	7,0	(28,7 %)		0,4	(3,7 %)	-0,4	(-19,1 %)	-1,2	(-35,5 %)
FE3	3.0.6	Toutes	1 833	0,0	(0,2 %)	5,1	(21,3 %)	0,53	0,2	(1,9 %)	0,0	(-1,5 %)	0,1	(5,4 %)
		1	894	0,2	(1,0 %)	3,7	(16,3 %)		0,2	(1,9 %)	0,0	(0,0 %)	0,1	(3,5 %)
		2	514	0,1	(0,4 %)	5,5	(22,8 %)		0,3	(2,9 %)	0,0	(-1,6 %)	0,2	(8,2 %)
		3	331	-0,3	(-1,3 %)	6,7	(26,6 %)		0,1	(0,6 %)	-0,1	(-2,6 %)	0,0	(0,8 %)
		4	94	-0,6	(-2,2 %)	6,7	(26,1 %)		0,3	(1,9 %)	-0,3	(-9,4 %)	0,5	(21,0 %)
	4.2.0	Toutes	1 950	-0,2	(-0,7 %)	5,2	(21,7 %)	0,52	0,1	(1,2 %)	-0,1	(-4,2 %)	0,1	(4,6 %)
		1	892	0,1	(0,3 %)	3,5	(15,4 %)		0,2	(1,7 %)	0,0	(-1,3 %)	0,0	(2,4 %)
		2	543	0,0	(-0,2 %)	5,4	(22,6 %)		0,3	(2,3 %)	-0,1	(-3,5 %)	0,2	(7,3 %)
		3	332	-0,4	(-1,5 %)	6,4	(25,8 %)		0,2	(1,5 %)	-0,2	(-7,0 %)	0,0	(-0,5 %)
		4	183	-1,4	(-5,6 %)	7,8	(30,9 %)		-0,6	(-4,7 %)	-0,5	(-15,6 %)	0,4	(15,0 %)

Végétation potentielle	Version du modèle	Période	n	Biais total des prévisions de la surface terrière (m ² /ha)		REQM (m ²)	R ²	Biais par essence des prévisions de la surface terrière (m ² /ha)					
								BOJ		SAB		ERR	
MJ1	3.0.6	Toutes	1 052	-0,1	(-0,4 %)	5,6	(24,0 %)	0,0	(2,0 %)	-0,3	(-7,6 %)	0,1	(2,6 %)
		1	461	0,3	(1,4 %)	4,1	(18,7 %)	0,0	(2,0 %)	-0,1	(-2,7 %)	0,1	(3,2 %)
		2	310	0,3	(1,2 %)	5,5	(22,8 %)	0,0	(3,8 %)	-0,4	(-8,3 %)	0,2	(4,9 %)
		3	211	-1,1	(-4,6 %)	7,4	(31,0 %)	-0,2	(1,1 %)	-0,5	(-11,2 %)	-0,1	(-3,4 %)
		4	70	-1,3	(-4,9 %)	7,6	(29,2 %)	-0,3	(-1,9 %)	-1,2	(-21,6 %)	0,1	(3,8 %)
	4.2.0	Toutes	1 087	-0,3	(-1,3 %)	5,6	(23,8 %)	-0,1	(-1,7 %)	-0,6	(-12,3 %)	0,1	(2,9 %)
		1	455	0,1	(0,7 %)	4,2	(19,1 %)	-0,1	(-1,2 %)	-0,3	(-5,7 %)	0,1	(2,9 %)
		2	313	0,1	(0,4 %)	5,6	(23,0 %)	-0,2	(-0,3 %)	-0,5	(-11,3 %)	0,2	(6,2 %)
		3	208	-1,2	(-5,1 %)	7,1	(30,0 %)	-0,2	(-2,2 %)	-0,9	(-20,0 %)	-0,1	(-3,7 %)
		4	111	-1,5	(-5,7 %)	6,9	(27,1 %)	-0,4	(-6,3 %)	-1,3	(-26,8 %)	0,1	(3,1 %)
MJ2	3.0.6	Toutes	1 714	-0,2	(-1,2 %)	5,5	(26,4 %)	-0,5	(-13,6 %)	0,0	(0,9 %)	0,1	(1,8 %)
		1	770	-0,5	(-2,6 %)	4,0	(20,5 %)	-0,6	(-16,0 %)	-0,1	(-2,4 %)	0,0	(-0,1 %)
		2	468	0,2	(0,7 %)	5,4	(25,7 %)	-0,5	(-14,8 %)	0,2	(4,8 %)	0,1	(3,5 %)
		3	444	-0,3	(-1,1 %)	7,1	(31,5 %)	-0,4	(-9,2 %)	0,0	(-0,4 %)	0,1	(2,5 %)
		4	32	0,5	(2,1 %)	9,7	(42,1 %)	-0,4	(-7,2 %)	0,9	(23,4 %)	0,2	(5,9 %)
	4.2.0	Toutes	2 007	-0,2	(-1,0 %)	6,1	(28,9 %)	-0,4	(-10,7 %)	0,0	(0,9 %)	0,0	(-0,3 %)
		1	799	-0,3	(-1,7 %)	4,0	(20,6 %)	-0,5	(-12,4 %)	-0,1	(-2,5 %)	0,0	(-0,2 %)
		2	543	0,2	(0,9 %)	5,7	(26,8 %)	-0,5	(-12,1 %)	0,1	(3,2 %)	0,0	(1,4 %)
		3	450	-0,8	(-3,4 %)	7,6	(34,1 %)	-0,6	(-15,2 %)	0,0	(0,8 %)	0,0	(-0,9 %)
		4	215	0,3	(1,3 %)	9,2	(37,3 %)	0,1	(1,7 %)	0,2	(6,1 %)	-0,1	(-2,6 %)

Végétation potentielle	Version du modèle	Période	n	Biais total des prévisions de la surface terrière (m ² /ha)		REQM (m ²)	R ²	Biais par essence des prévisions de la surface terrière (m ² /ha)						
								SAB		BOP		BOJ		
MS1	3.0.6	Toutes	746	0,2	(1,1 %)	7,1	(34,2 %)	0,46	-0,7	(-10,4 %)	0,6	(14,3 %)	0,1	(7,1 %)
		1	392	0,9	(4,7 %)	5,2	(25,3 %)	0,4	(5,8 %)	0,3	(8,2 %)	0,0	(4,1 %)	
		2	201	-0,2	(-0,8 %)	7,9	(39,3 %)	-1,6	(-29,6 %)	1,0	(22,2 %)	0,1	(11,1 %)	
		3	137	-1,1	(-5,0 %)	9,8	(46,0 %)	-2,3	(-37,7 %)	0,8	(17,9 %)	0,1	(9,6 %)	
	4.2.0	Toutes	936	-0,5	(-2,5 %)	6,9	(32,6 %)	0,46	-0,5	(-6,6 %)	0,3	(8,6 %)	-0,2	(-6,1 %)
		1	378	0,5	(2,7 %)	4,6	(22,9 %)	0,4	(5,2 %)	0,2	(6,3 %)	-0,1	(-2,4 %)	
		2	272	-0,3	(-1,5 %)	7	(32,1 %)	-0,5	(-7,7 %)	0,5	(11,9 %)	0,0	(0,2 %)	
		3	178	-2,4	(-11 %)	8,9	(41,6 %)	-1,8	(-25,9 %)	0,3	(6,6 %)	-0,5	(-17,5 %)	
		4	108	-1,8	(-7,8 %)	9,2	(39,6 %)	-1,2	(-14,4 %)	0,4	(9,6 %)	-0,4	(-14,9 %)	
MS2	3.0.6	Toutes	3 155	-0,4	(-2,1 %)	7,3	(37,7 %)	0,49	-0,8	(-11,5 %)	0,5	(9,2 %)	-0,2	(-4,6 %)
		1	1 531	0,1	(0,5 %)	5,8	(30,6 %)	-0,2	(-2,6 %)	0,2	(5,1 %)	-0,1	(-3,2 %)	
		2	918	-0,4	(-2,5 %)	7,6	(38,7 %)	-1,1	(-18,7 %)	0,7	(12,5 %)	-0,2	(-4,6 %)	
		3	573	-1,3	(-6,2 %)	9,2	(45,3 %)	-1,6	(-23,0 %)	0,7	(12,7 %)	-0,2	(-6,5 %)	
	4.2.0*	4	133	-2,7	(-12,9 %)	11,5	(52,9 %)	-1,7	(-24,7 %)	0,4	(7,1 %)	-0,3	(-9,3 %)	
		Toutes	3 827	-1,2	(-5,9 %)	7,7	(38,6 %)	0,44	-0,2	(-2,4 %)	-0,1	(-1,9 %)	-0,4	(-12,6 %)
		1	1 527	-0,3	(-1,5 %)	5,8	(30,8 %)	-0,1	(-1,5 %)	0,1	(2,1 %)	-0,2	(-7,2 %)	
		2	1 091	-1,1	(-5,7 %)	7,7	(38,5 %)	-0,4	(-5,9 %)	0,0	(0,8 %)	-0,5	(-13,3 %)	
		3	774	-2,1	(-10,3 %)	9,3	(44,7 %)	-0,4	(-4,8 %)	-0,2	(-4,8 %)	-0,6	(-15,4 %)	
		4	435	-2,7	(-11,7 %)	10,4	(44,7 %)	0,5	(4,6 %)	-0,8	(-16,1 %)	-0,9	(-20,7 %)	

* Les valeurs présentées dans le tableau pour la version 4.2.0 sont le résultat de l'application des paramètres des modules de mortalité, d'accroissement diamétral et de recrutement de la version 3.0.6 aux données ayant servi à la calibration de la version 4.2.0

Tableau 3. Biais total et par essence, racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (REQM) et coefficient de détermination (R^2) des prévisions de la surface terrière par les versions 3.0.6 et 4.2.0 d'Artémis 2014, pour les intervalles de croissance (périodes) des placettes-échantillons permanentes suivies après l'application de coupe partielle. Les biais relatifs sont présentés entre parenthèses.

Végétation potentielle	Version du modèle	Période	n	Biais total de la surface terrière (m ² /ha)		REQM (m ²)		R ²	Biais par essence de la surface terrière (m ² /ha)					
									ERS		ERR		HEG	
FE2	3.0.6	Toutes	135	0,0	(-0,2 %)	5,2	(25,7 %)	0,65	-0,3	(-3,2 %)	-0,3	(-3,3 %)	0,1	(28,6 %)
		1	89	-0,1	(-0,6 %)	4,0	(21,2 %)		-0,3	(-3,7 %)	-0,3	(-3,7 %)	0,2	(31,3 %)
		2	36	0,3	(1,5 %)	6,1	(26,5 %)		0,5	(3,9 %)	0,4	(3,6 %)	0,1	(34,0 %)
	4.2.0	Toutes	189	0,4	(2,0 %)	5,0	(24,8 %)	0,68	-0,2	(-2,7 %)	-0,3	(-3,0 %)	0,2	(20,1 %)
		1	122	0,3	(1,6 %)	4,1	(22,0 %)		-0,2	(-2,8 %)	-0,2	(-2,8 %)	0,2	(26,0 %)
		2	47	0,3	(1,3 %)	5,6	(24,6 %)		0,2	(2,0 %)	0,2	(1,6 %)	0,2	(20,6 %)
FE3	3.0.6	Toutes	333	0,0	(0,0 %)	4,7	(24,6 %)	0,70	0,1	(1,0 %)	0,0	(0,5 %)	-0,1	(-8,7 %)
		1	229	-0,4	(-2,5 %)	3,6	(20,6 %)		-0,2	(-2,2 %)	0,0	(-2,4 %)	0,0	(-0,7 %)
		2	80	0,9	(4,2 %)	6,3	(29,4 %)		0,8	(7,1 %)	0,2	(9,6 %)	-0,3	(-11,8 %)
	4.2.0	Toutes	581	-0,1	(-0,4 %)	4,1	(19,8 %)	0,74	0,0	(-0,2 %)	0,1	(3,1 %)	-0,1	(-5,4 %)
		1	426	-0,1	(-0,4 %)	3,5	(17,2 %)		-0,2	(-1,4 %)	0,1	(4,9 %)	0,0	(-1,3 %)
		2	106	-0,1	(-0,5 %)	5,5	(24,9 %)		0,4	(4,1 %)	-0,1	(-3,4 %)	-0,1	(-3,3 %)
		3	33	-0,5	(-2,3 %)	6,1	(26,1 %)		0,6	(5,5 %)	0,1	(3,8 %)	-0,8	(-49,2 %)
MJ1	3.0.6	Toutes	221	-0,2	(-0,9 %)	4,8	(28,6 %)	0,69	0,3	(7,1 %)	0,8	(20,8 %)	-0,2	(-17,3 %)
		1	144	-0,6	(-4,2 %)	4,1	(27,4 %)		0,2	(4,5 %)	0,6	(19,8 %)	-0,2	(-22,3 %)
		2	60	0,9	(4,4 %)	5,7	(29,2 %)		0,5	(11,6 %)	1,4	(27,4 %)	-0,1	(-9,7 %)
	4.2.0	Toutes	283	0,1	(0,6 %)	4,5	(24,6 %)	0,73	0,3	(5,6 %)	0,6	(16,1 %)	-0,4	(-13,0 %)
		1	184	0,3	(1,5 %)	4,1	(23,9 %)		0,3	(5,7 %)	0,6	(18,5 %)	-0,3	(-10,8 %)
		2	74	0,1	(0,3 %)	5,1	(24,9 %)		0,4	(6,9 %)	0,8	(15,9 %)	-0,4	(-13,7 %)

Végétation potentielle	Version du modèle	Période	n	Biais total de la surface terrière (m ² /ha)		REQM (m ²)		R ²	Biais par essence de la surface terrière (m ² /ha)					
				SAB	BOP	BOJ	SAB		BOP	BOJ	EPX			
MJ2	3.0.6	Toutes	200	-0,4	(-2,7 %)	4,7	(30,3 %)	0,66	0,0	(1,5 %)	-0,5	(-23,7 %)	0,0	(-1,5 %)
		1	143	0,1	(0,6 %)	4,0	(26,6 %)		0,4	(13,4 %)	-0,3	(-16,2 %)	0,0	(-0,2 %)
		2	46	-2,0	(-12,3 %)	6,4	(39,6 %)		-0,7	(-20,8 %)	-0,8	(-36,6 %)	-0,2	(-5,8 %)
	4.2.0	Toutes	332	0,0	(0,1 %)	5,2	(28,8 %)	0,68	0,4	(8,7 %)	-0,4	(-23,1 %)	0,0	(-0,1 %)
		1	217	0,1	(0,6 %)	4,0	(24,3 %)		0,5	(11,4 %)	-0,3	(-20,4 %)	0,1	(3,1 %)
		2	80	-0,2	(-1,2 %)	6,9	(35,1 %)		0,3	(6,9 %)	-0,3	(-12,0 %)	-0,1	(-2,1 %)
MS1	3.0.6	Toutes	104	0,7	(4,3 %)	5,6	(35,2 %)	0,63	0,5	(9,9 %)	-0,4	(-33,0 %)	0,1	(3,8 %)
		1	70	0,2	(1,2 %)	4,4	(30,7 %)		0,5	(11,2 %)	-0,4	(-36,8 %)	-0,1	(-1,6 %)
	4.2.0	Toutes	149	0,1	(0,7 %)	5,6	(33,0 %)	0,62	0,9	(13,2 %)	-0,3	(-16,5 %)	-0,4	(-10,6 %)
		1	86	-0,8	(-5,6 %)	4,8	(33,4 %)		0,6	(11,8 %)	-0,6	(-33,7 %)	-0,4	(-12,6 %)
		2	37	0,8	(4,5 %)	5,8	(31,0 %)		1,0	(12,7 %)	-0,2	(-21,8 %)	-0,5	(-10,8 %)
MS2	3.0.6	Toutes	282	-0,6	(-4,2 %)	5,9	(44,1 %)	0,60	0,1	(1,0 %)	-0,7	(-27,0 %)	-0,2	(-12,9 %)
		1	197	-0,3	(-2,6 %)	4,5	(37,7 %)		0,1	(2,7 %)	-0,6	(-24,4 %)	-0,1	(-6,6 %)
		2	66	-0,6	(-3,4 %)	7,8	(47,1 %)		0,1	(1,2 %)	-0,8	(-23,8 %)	-0,5	(-32,6 %)
	4.2.0*	Toutes	488	0,3	(2 %)	7,1	(43,9 %)	0,55	1,4	(17,4 %)	-0,9	(-41 %)	-0,2	(-8,9 %)
		1	274	-0,9	(-7,1 %)	5,2	(42,7 %)		0,4	(7,2 %)	-0,7	(-37,1 %)	-0,2	(-13,7 %)
		2	149	1,6	(8,6 %)	8,2	(42,9 %)		2,1	(22 %)	-1,0	(-45 %)	0,0	(-0,1 %)
		3	56	2,0	(7,8 %)	10,7	(42,1 %)		3,6	(25,1 %)	-1,3	(-38,7 %)	-0,3	(-14,8 %)

* Les valeurs présentées dans le tableau pour la version 4.2.0 sont les résultats de l'application des paramètres des modules de mortalité, d'accroissement diamétral et de recrutement de la version 3.0.6 aux données ayant servi à la calibration de la version 4.2.0

En fin de compte, les variables issues de la cartographie des sols n'ont pas été retenues parmi les variables prédictives des différents modules du modèle. Même si certaines d'entre elles améliorent statistiquement le modèle, leur effet sur le biais et la précision du modèle demeure marginal. Puisque les statistiques de validation des modèles étaient similaires, nous avons conservé la version la plus simple, soit celle sans ces variables. Ces données pourraient cependant être utilisées dans de futures versions d'Artémis ou dans d'autres modèles de croissance.

Comme l'ajout des données de la cartographie des sols, le remplacement de la variable binaire de défoliation de la TBE par un indice de sévérité des dommages n'a mené qu'à des gains marginaux de précision. Puisque l'implantation dans le modèle de 2 manières distinctes de prévoir la défoliation de la TBE (une pour les équations des végétations potentielles révisées et une autre pour celles non révisées) pouvait entraîner une difficulté, nous avons choisi de ne conserver que la variable binaire pour toutes les végétations potentielles.

La variable discriminant entre les placettes situées au nord et au sud du fleuve s'est avérée statistiquement significative. Nous l'avons donc intégrée aux modules de mortalité des végétations potentielles FE2 et FE3, pour lesquelles son utilisation a amélioré la précision des modèles. Cette variable augmente le taux de mortalité des arbres situés sur le Bouclier canadien par rapport à ceux situés sur les basses terres du Saint-Laurent et dans les Appalaches. Ce taux de mortalité plus élevé pourrait s'expliquer par la plus faible fertilité des sols du Bouclier canadien, qui sont aussi reconnus pour être plus acides. Ces différences pourraient favoriser le dépérissement de l'érable à sucre (*Acer saccharum* Marshall) (Moore *et al.* 2013) qui domine dans ces 2 végétations potentielles.

Lors de la simulation des placettes du 4^e inventaire décennal, les prévisions de la surface terrière ont peu varié entre les 2 versions du modèle, que ce soit à l'échelle de la végétation potentielle (figure 1) ou du sous-domaine bioclimatique (figures 2 à 6). La végétation potentielle MJ1 est la seule pour laquelle les prévisions des 2 versions du modèle diffèrent de façon notable. Pour celle-ci, après 60 ans de simulation, la version 4.2.0 du modèle produit des estimations moyennes de la surface terrière inférieures de 7,5 % à celles de la version 3.0.6 (31,5 m²/ha pour la version 4.2.0, contre 34,0 m²/ha pour la version 3.0.6). Cette situation pourrait s'expliquer par le taux de mortalité plus élevé et un recrutement plus faible pour certaines essences comme les chênes et les peupliers dans la base de données de la version 4.2.0. Quant à elles, les variations entre les prévisions des sous-domaines bioclimatiques de la végétation potentielle FE3 (figure 3) pourraient s'expliquer par l'utilisation de la variable binaire qui différencie les peuplements au nord et au sud du fleuve Saint-Laurent dans le module de mortalité. Dans la version 4.2.0, les prévisions de la surface terrière diminuent pour les sous-domaines bioclimatiques de l'Ouest et augmentent pour les sous-domaines de l'Est. Un examen des biais des modèles par sous-domaine bioclimatique a montré que la version 4.2.0 produisait des biais moindres que la version 3.0.6 pour la surface terrière. Ainsi, la forte

sous-estimation par la version 3.0.6 de la surface terrière marchande pour la végétation potentielle FE3 dans les sous-domaines bioclimatiques de l'Est est grandement atténuée dans la version 4.2.0.

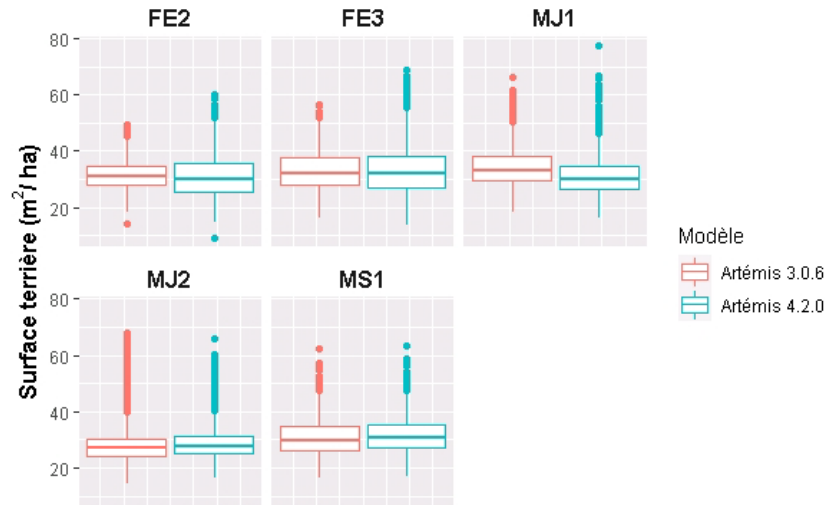


Figure 1. Comparaison de la surface terrière marchande estimée par les versions 3.0.6 et 4.2.0 du modèle Artémis 2014 après 60 ans de simulation, pour les végétations potentielles FE2, FE3, MJ1, MJ2 et MS1.

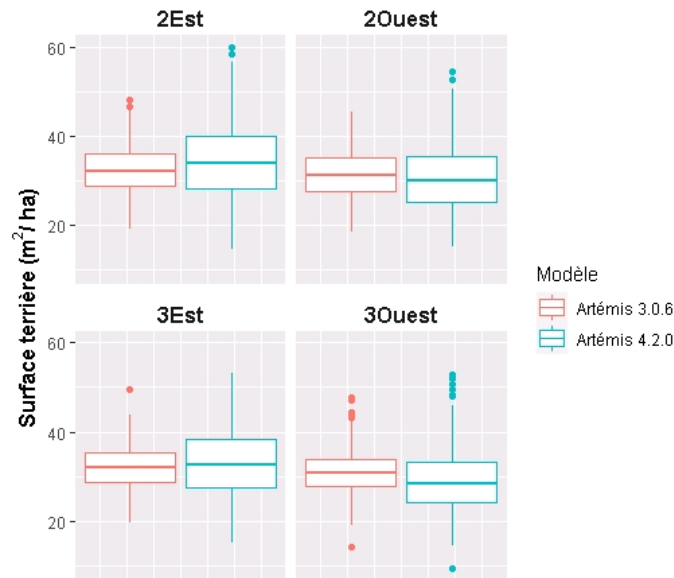


Figure 2. Comparaison de la surface terrière marchande estimée par les versions 3.0.6 et 4.2.0 du modèle Artémis 2014 après 60 ans de simulation, pour les principaux sous-domaines bioclimatiques de la végétation potentielle FE2 (érablières à tilleuls).

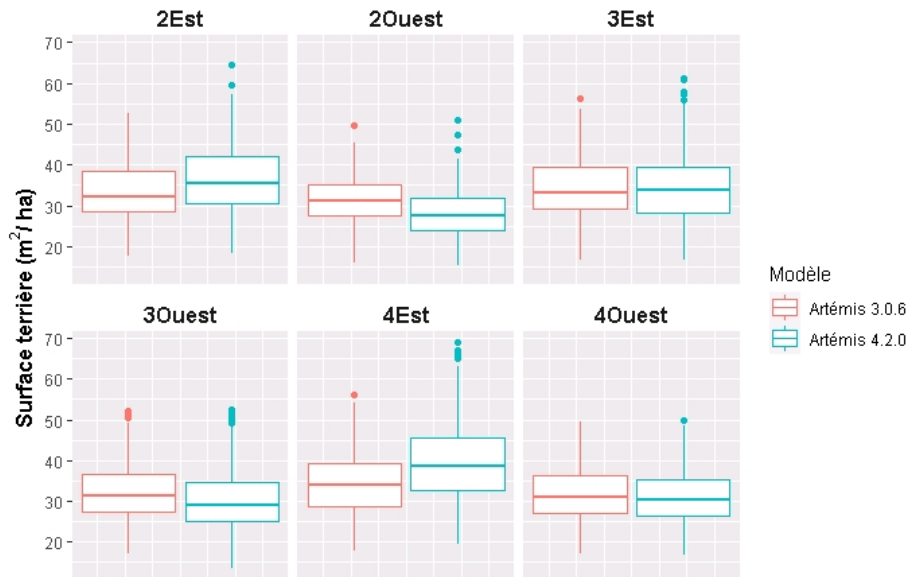


Figure 3. Comparaison de la surface terrière marchande estimée par les versions 3.0.6 et 4.2.0 du modèle Artémis 2014 après 60 ans de simulation, pour les principaux sous-domaines bioclimatiques de la végétation potentielle FE3 (érablières à bouleau jaune).

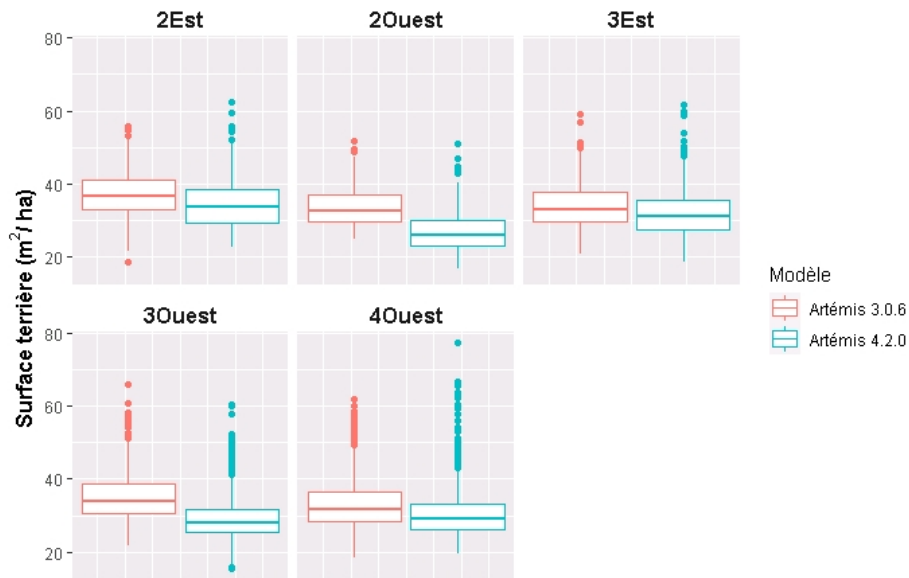


Figure 4. Comparaison de la surface terrière marchande estimée par les versions 3.0.6 et 4.2.0 du modèle Artémis 2014 après 60 ans de simulation, pour les principaux sous-domaines bioclimatiques de la végétation potentielle MJ1 (bétulaies jaunes à sapin et à érable à sucre).

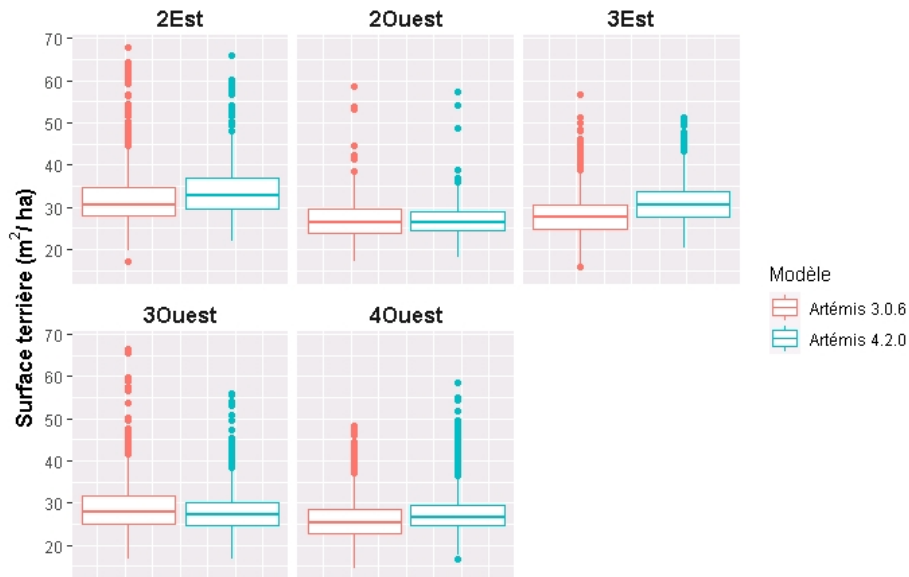


Figure 5. Comparaison de la surface terrière marchande estimée par les versions 3.0.6 et 4.2.0 du modèle Artémis 2014 après 60 ans de simulation, pour les principaux sous-domaines bioclimatiques de la végétation potentielle MJ2 (bétulaies jaunes à sapin).

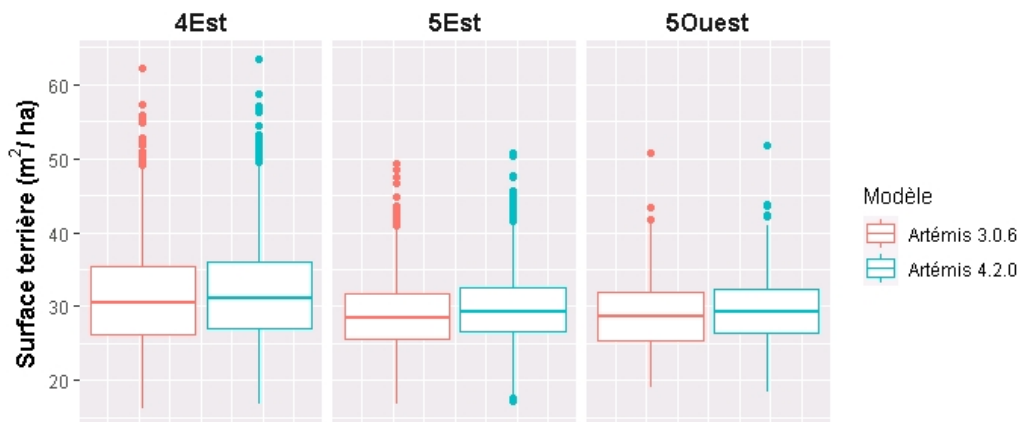


Figure 6. Comparaison de la surface terrière marchande estimée par les versions 3.0.6 et 4.2.0 du modèle Artémis 2014 après 60 ans de simulation, pour les principaux sous-domaines bioclimatiques de la végétation potentielle MS1 (sapinières à bouleau jaune).

Notons également que la version 4.2.0 du modèle comprend une mise à jour de l'équation de mortalité du hêtre en présence de la maladie corticale ainsi qu'une fonctionnalité permettant de prévoir les tendances associées aux changements de composition des placettes. Pour plus d'information sur ces sujets, le lecteur peut se référer à l'Avis technique SSRF-24 (Bilodeau-Gauthier *et al.* 2021).

4. Conclusion et recommandations

La version 4.2.0 d'Artémis 2014 présente une évolution du modèle. La robustesse des prévisions est améliorée grâce à l'ajout de mesures de placettes du réseau des PEP de la Direction des inventaires forestiers (notamment celles de la région de l'Outaouais) et celles de la base de données des ER, qui augmentent le nombre de mesures après coupe partielle. D'ailleurs, les prévisions après coupe partielle de la nouvelle version sont généralement plus précises que celles de la version 3.0.6. La nouvelle version devrait donc être utilisée pour les végétations potentielles FE2, FE3, MJ1, MJ2 et MS1.

Pour la végétation potentielle MS2, la version 4.2.0 n'a pas été modifiée, car les prévisions des nouveaux paramètres n'étaient pas significativement améliorées par rapport à celles de la version 3.0.6.

5. Références bibliographiques

Auger, I., 2017. *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. 32 p.

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

Bilodeau-Gauthier, S., H. Power, F. Guillemette et S. Bédard, 2021. *Solutions pour mieux simuler l'évolution des peuplements situés sur les végétations potentielles de l'érablière dans un contexte d'envahissement par le hêtre*. Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de la recherche forestière. Avis technique SSRF-24. 26 p. https://mffp.gouv.qc.ca/documents/forets/recherche/AT_SSRF-24.pdf

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>

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 Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de la recherche forestière. Mémoire de recherche forestière n° 156. 48 p.

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

Guillemette, F., M.-M. Gauthier, M.-C. Lambert et S. Bédard, 2013. *Effets réels décennaux des coupes de jardinage pratiquées de 1995 à 1999 dans un contexte opérationnel*. Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de la recherche forestière. Mémoire de recherche forestière n° 168. 34 p.

<https://mffp.gouv.qc.ca/documents/forets/connaissances/recherche/Memoire168.pdf>

- [MFFP] Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, 2017. *Expansion du hêtre à grandes feuilles et déclin de l'érable à sucre au Québec : portrait de la situation, défis et pistes de solution*. Avis scientifique du comité chargé d'étudier l'écologie et la sylviculture des peuplements contenant du hêtre et de l'érable. Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de la recherche forestière. Avis scientifique. 146 p. <https://mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/AvisScientHEG-ERS.pdf>
- Moore, J.-D., R. Ouimet, N. Thiffault et F. Marquis, 2013. « *L'amendement des sols forestiers* ». Dans : Larouche, C., F. Guillemette, P. Raymond et J.-P. Saucier (édits.). *Le guide sylvicole du Québec, Tome 2. Les concepts et l'application de la sylviculture*. Les publications du Québec. Québec, QC. p. 159-177.
- Pothier, D. et D. Mailly, 2006. *Stand-level prediction of balsam fir mortality in relation to spruce budworm defoliation*. Can. J. For. Res. 36(7): 1631-1640. <https://doi.org/10.1139/x06-062>
- Pothier, D., D. Mailly et S. Tremblay, 2005. *Predicting balsam fir growth reduction caused by spruce budworm using large-scale historical records of defoliation*. Ann. For. Sci. 62(3): 261-267. <https://doi.org/10.1051/forest:2005018>
- Power, H., 2016. *Comparaison des biais et de la précision des estimations des modèles Artémis-2009 et Artémis-2014 pour la surface terrière 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://mffp.gouv.qc.ca/documents/forets/connaissances/recherche/Note143.pdf>.
- Power, H. et I. Auger, 2020. *Temporal pattern in basal area prediction error of a growth model for Quebec's temperate forest*. For. Chron. 96(2): 141-151. <https://doi.org/10.5558/tfc2020-019>
- Sylvain, J.-D., F. Anctil et É. Thiffault, 2021. *Using bias correction and ensemble modelling for predictive mapping and related uncertainty: A case study in digital soil mapping*. Geoderma 403: 115-153. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115153>

Hugues Power, ing.f., Ph. D.

Direction de la recherche forestière
Service de la sylviculture et du rendement des forêts