

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

Hugues Power

Résumé

Les modèles de croissance sont des outils essentiels pour l'aménagiste forestier qui veut prévoir l'évolution de différentes caractéristiques des peuplements. Artémis est un modèle de croissance à l'échelle de l'arbre développé en 2009 par la Direction de la recherche forestière du ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs du Québec. Il a été utilisé récemment pour calculer, entre autres, les possibilités forestières des forêts de feuillus tolérants (érablières, bétulaies jaunes, chênaies), des cédrières, des pinèdes blanches, des prucheraies et des sapinières à bouleau jaune, ainsi que pour l'ensemble des forêts du Québec ayant des végétations potentielles feuillues, MJ1, MJ2 ou MF1. Le modèle a été paramétré à nouveau en 2014, en ajoutant de nouvelles données de mesurage provenant du réseau provincial de placettes-échantillons permanentes. Le biais et la précision du modèle ont été estimés en comparant des surfaces terrières totales mesurées à celles simulées dans chaque placette-échantillon. En général, les deux versions du modèle génèrent des estimations avec des biais et des précisions comparables. Dans la version 2014, les biais proviennent principalement des modules de mortalité et d'accroissement diamétral, lorsque les peuplements ne subissent pas de coupe partielle. Dans les premières années après une coupe partielle, les biais proviennent majoritairement du module de recrutement. Certaines faiblesses du modèle ont été décelées, notamment quant à la prédiction de la surface terrière du sapin baumier (*Abies balsamea* [L.] Mill.). Ces faiblesses pourraient être associées à la présence d'épidémies de tordeuse des bourgeons de l'épinette (*Choristoneura fumiferana* Clemens). Étant donné l'ajout de plusieurs mesurages, la version 2014 d'Artémis peut être considérée comme plus robuste que la version 2009. Par ailleurs, le modèle Artémis doit être utilisé avec prudence pour les végétations potentielles résineuses.

Mots-clés : modélisation, possibilité forestière, croissance, accroissement, mortalité, recrutement

Abstract

*For many years, forest growth models have been essential tools for managers wishing to predict stand growth. In Quebec (Canada), a tree-level forest growth simulator called Artémis was developed in 2009 by the provincial forest research department (Direction de la recherche forestière, Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs) to calculate annual allowable cuts for stands containing shade-tolerant hardwoods (e.g., *Acer sp.*, *Betula sp.* and *Quercus sp.*), eastern white cedar (*Thuja occidentalis* L.), white pine (*Pinus strobus* L.), eastern hemlock (*Tsuga canadensis* [L.] Carr.), and mixes of yellow birch (*Betula alleghaniensis* Britt.) and balsam fir (*Abies balsamea* [L.] Mill.), as well as for other forests in Quebec with potential vegetations defined by hardwoods or for the MJ1, MJ2 or MF1 potential vegetations. The simulator's parameters were updated in 2014, following the release of new forest inventory data from the provincial network of permanent sampling plots. Bias and accuracy of the updated model were estimated by comparing observed and simulated stand and species basal areas in each permanent sampling plot. Overall, values generated by Artémis-2014 and Artémis-2009 had comparable biases and precision. The biases of Artémis-2014 for uncut stands were mainly associated with the simulator's mortality and diameter increment modules. After a partial cutting, the main source of bias was the recruitment component. Artémis simulations showed lower precision and greater bias for balsam fir growth, bias that can be related to spruce budworm (*Choristoneura fumiferana* Clemens) infestations. Considering the larger bias obtained in coniferous forests, Artémis should be used with caution for softwood stands.*

Keywords : modelling, allowable cuts, growth, increment, mortality, recruitment



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

Introduction

Les modèles de croissance servent à simuler la dynamique de croissance d'un peuplement forestier et fournissent de l'information nécessaire à l'aménagement forestier. Ils se basent sur des mesures répétées dans un même peuplement et décrivent l'évolution de ses différentes composantes (Weiskittel *et al.* 2011). Les modèles de croissance se distinguent des tables de rendement par leur plus grande flexibilité et leur capacité à s'adapter à des changements de conditions de croissance (p. ex. une coupe partielle). Cette flexibilité est attribuable au fait que les modèles de croissance prédisent l'accroissement des arbres ou du peuplement, alors que les tables de rendement en prédisent directement le volume (Stage 2003). Les modèles de croissance se divisent en différentes familles, catégorisées entre autres selon leur résolution (arbre, peuplement, cohorte) qui doit être adaptée aux besoins des utilisateurs (Landsberg 2003). Parmi ces familles, les modèles à l'échelle de l'arbre fournissent l'information la plus détaillée et ont été parmi les plus utilisés au cours des dernières années (Fortin et Langevin 2010; Weiskittel *et al.* 2011).

Au début des années 2000, les modèles de rendement par courbes et le modèle de croissance par taux, utilisés jusqu'alors au Québec pour calculer les possibilités forestières, ont été examinés pour en évaluer les erreurs de prévisions. Plusieurs critiques ont été soulevées à leur égard, notamment quant à la présence de biais importants pour le modèle de croissance par taux (Jobidon *et al.* 2004). À la suite de ces constats, il a été décidé de développer de nouveaux modèles, notamment un modèle de croissance à l'échelle de l'arbre (Auger *et al.* 2011).

Artémis est un modèle de croissance à l'échelle de l'arbre qui a été paramétré pour 25 végétations potentielles parmi les plus courantes du Québec. Une végétation potentielle est un regroupement de sites partageant un ensemble d'espèces végétales et un régime de perturbations (Cauboue *et al.* 1996). Artémis comprend 6 modules qui estiment la mortalité, la croissance diamétrale, le recrutement de nouvelles tiges (nombre et diamètre des recrues), la hauteur et le volume des arbres (Fortin et Langevin 2010). Le modèle peut être utilisé en mode déterministe, pour des simulations rapides et constantes, ou en mode stochastique, pour estimer l'erreur associée des prévisions. Il est utilisé depuis 2010 pour le calcul des possibilités forestières des forêts composées principalement de feuillus tolérants, de thuya occidental (*Thuja occidentalis* L.), de pin blanc (*Pinus strobus* L.), de pruche du Canada

(*Tsuga canadensis* [L.] Carr.) et de mélanges de sapin baumier (*Abies balsamea* [L.] Mill.) et de bouleau jaune (*Betula alleghaniensis* Britt.). Le modèle est également utilisé pour l'ensemble des forêts des végétations potentielles MJ1, MJ2 ou MF1 (bétulaie jaune à érable à sucre [*Acer saccharum* Marsh.] et à sapin, bétulaie jaune à sapin et frênaie noire à sapin, respectivement) (BFC 2013), et ce, peu importe leur composition.

Le paramétrage des modèles de croissance est un processus itératif au cours duquel les besoins des utilisateurs, le comportement du modèle et les données utilisées doivent être constamment évalués et remis en question (Weiskittel *et al.* 2011). Ces changements peuvent justifier des ajustements périodiques aux modèles. À titre d'exemple, le *Forest Vegetation Simulator* (FVS, Dixon 2002) n'a cessé d'évoluer depuis son origine au milieu des années 1970. De plus, l'utilisation de longues périodes de simulation (150 ans) lors du calcul des possibilités forestières fait ressortir le besoin d'évaluer les modèles sur la plus longue période possible. Avec le début des travaux d'estimation des possibilités forestières pour la période de 2018 à 2023 ainsi que la complétion du 4^e inventaire écoforestier provincial par la Direction des inventaires forestier (DIF) du ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, les conditions étaient donc réunies, à l'année 2014, pour un ajustement des paramètres d'Artémis.

1. Matériel et méthodes

Tout comme la version 2009 (Artémis-2009), la version 2014 du modèle (Artémis-2014) se base sur les mesurages des placettes-échantillons permanente du réseau de la DIF. Ce réseau, mis en place à partir du début des années 1970, compte environ 10 900 placettes. En plus de celles-ci, les placettes des réseaux de la Société de protection contre les insectes et maladies (1 129 placettes), de l'Université Laval (204 placettes) et de Parcs Canada (86 placettes) ont été utilisées. Les placettes de ces réseaux sont mesurées en moyenne aux 10 ans, à l'exception de celles de l'Université Laval, qui sont mesurées aux 5 ans. L'ensemble couvre tout le territoire de la forêt commerciale du Québec (DIF 2014). Pour toutes ces placettes-échantillons, la végétation potentielle, le diamètre à hauteur de poitrine (DHP), l'état (vivant, mort sur pied, coupé) et l'espèce de l'ensemble des arbres de DHP > 9,0 cm est noté à chaque mesurage. L'utilisation de placettes-échantillons permanentes est essentielle, puisqu'Artémis est un modèle dynamique qui modélise la croissance, et donc, le changement entre deux mesurages (Figure 1).

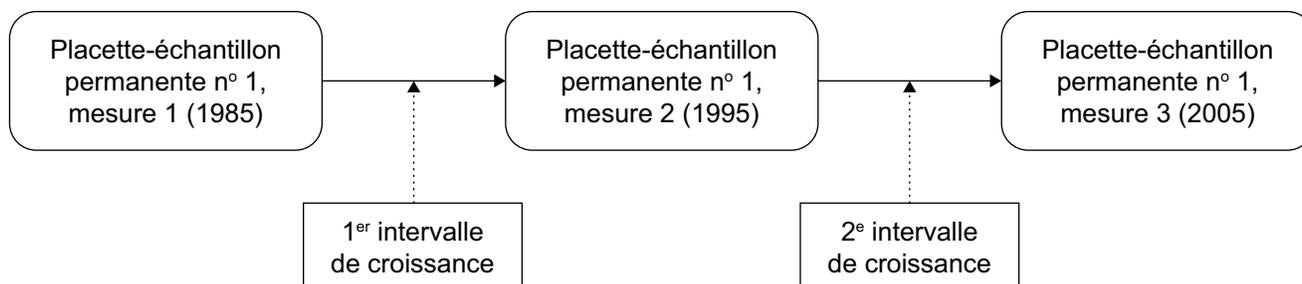


Figure 1. Exemple de mesures et d'intervalles de croissance d'une placette-échantillon permanente.

La végétation potentielle identifiée lors de l'inventaire forestier a été attribuée à chacune des placettes. Les placettes n'ayant pas de végétation potentielle identifiée ont été retirées du jeu de données de paramétrage.

Les données des placettes-échantillons ont d'abord été séparées en intervalles de croissance correspondant à 2 mesurages consécutifs d'une même

placette (Figure 1). Le nombre d'intervalles provenant d'une placette-échantillon correspond au nombre total de mesurages de cette placette moins 1 (p. ex. 3 mesurages d'une même placette-échantillon correspondent à 2 intervalles de croissance). Le tableau 1 compare le nombre de segments de croissance par végétation potentielle pour Artémis-2009 et Artémis-2014.

Tableau 1. Nombre d'intervalles de croissance par végétation potentielle pour Artémis-2009 et Artémis-2014.

Code et nom de la végétation potentielle		Nombre d'intervalles de croissance		
		Artémis-2014	Artémis-2009	Rapport Artémis-2014/Artémis-2009
FC1	Chênaie	54	49	1,10
FE1	Érablière à caryer	63	49	1,29
FE2	Érablière à tilleul	927	724	1,28
FE3	Érablière à bouleau jaune	2 880	2 467	1,17
FE4	Érablière à bouleau jaune et hêtre	59	59	1,00
FE5	Érablière à ostryer	191	175	1,09
FE6	Érablière à chêne rouge	336	318	1,06
FO1	Ormaie à frêne noir	73	65	1,12
MF1	Frênaie noire à sapin	167	149	1,12
MJ1	Bétulaie jaune à érable à sucre et à sapin	1 672	1 306	1,28
MJ2	Bétulaie jaune à sapin	2 302	2 055	1,12
MS1	Sapinière à bouleau jaune	1 072	919	1,17
MS2	Sapinière à bouleau blanc	4 860	3 733	1,18
MS6	Sapinière à érable rouge	443	405	1,09
RB1	Pessière blanche issue d'agriculture	103	81	1,27
RC3	Cèdrière tourbeuse à sapin	263	212	1,24
RE1	Pessière noire à lichens	1 002	766	1,31
RE2	Pessière noire à mousses	3 856	2 666	1,45
RE3	Pessière noire à sphaignes	1 445	947	1,53
RP1	Pinède blanche ou rouge	340	332	1,02
RS1	Sapinière à thuya	736	599	1,23
RS2	Sapinière à épinette noire	3 544	2 740	1,29
RS3	Sapinière à épinette noire et sphaignes	574	429	1,34
RS5	Sapinière à épinette rouge	243	157	1,55
RT1	Prucheraie	200	160	1,25
Total		27 563	21 683	1,25

1.1 Tordeuse des bourgeons de l'épinette

Afin de distinguer les intervalles de croissance associés à des épidémies de tordeuse des bourgeons de l'épinette (*Choristoneura fumiferana* Clemens, TBE), nous avons identifié les mesurages pendant lesquels les arbres avaient subi 4 années consécutives ou plus de défoliations sévères ou modérées (seuil à partir duquel augmente le risque de mortalité, Pothier et Mailly 2006), sur la base des observations de défoliations effectuées par la Direction de la protection des forêts (DPF) du ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs. Pour Artémis-2009, ces inventaires utilisaient la grille Romer, une couverture de tesselles de tout le Québec dont chaque unité fait 60 km² de superficie. Par contraste, les données d'Artémis-2014 provenaient du transfert des contours de défoliation en polygones numériques¹, ce qui a permis de déterminer avec plus de précision quelles placettes avaient été touchées par des défoliations sévères ou modérées. Une variable binaire indiquant l'atteinte du seuil de 4 années a été créée pour permettre de modifier les équations prédisant la probabilité de mortalité, l'accroissement diamétral et la probabilité de recrutement des sapins et des épinettes (*Picea* sp.).

1.2 Données climatiques

Tout comme Artémis-2009, Artémis-2014 utilise les valeurs normales de 30 ans des précipitations annuelles totales et de la température annuelle moyenne comme variables explicatives dans les modules de mortalité, d'accroissement diamétral et de recrutement. Ces variables ont été estimées par interpolation des données de stations météorologiques, à l'aide du logiciel BioSIM (Régnière *et al.* 2014). La période de référence d'Artémis-2014 va de 1981 à 2010 et comprend plus d'intervalles de croissance pour le paramétrage que la période de référence d'Artémis-2009, qui va de 1971 à 2000. En plus des normales climatiques de 30 ans, la moyenne des précipitations annuelles et celle des températures correspondant à la période d'observation de chacune des mesures des placettes-échantillons permanentes ont été testées comme variables explicatives dans les différents modules d'Artémis-2014. Cependant, ces moyennes n'ont pas été retenues, car elles ne performaient pas toujours mieux que les normales de 30 ans et il était difficile de les utiliser en contexte de simulation.

¹ Ces couches de données numériques sont rendues disponibles par la DPF, par l'entremise du site Données ouvertes du Gouvernement du Québec (www.donnees.gouv.qc.ca/?node=/donnees-details&id=2eed323f-e3fd-40cf-98c4-d0d25c52c404).

1.3 Paramétrage des modules de mortalité, d'accroissement diamétral et de recrutement

Pour Artémis-2014, la version 9.3 du logiciel SAS (SAS Institute Inc., Cary, NC [États-Unis]) a été utilisée afin de réestimer les paramètres des modules de mortalité, d'accroissement diamétral et de recrutement (présence, nombre et DHP des recrues) pour les 25 végétations potentielles, selon les mêmes procédures que pour Artémis-2009 (Fortin et Langevin 2010). Pour chacune des équations, la durée de l'intervalle de croissance a été incluse en tant que variable explicative pour tenir compte de la durée variable des périodes d'observation.

Le module d'accroissement, consistant en une régression linéaire mixte, a été paramétré à l'aide de la procédure MIXED du logiciel SAS. Le modèle comprenait des effets aléatoires prenant en compte la placette ainsi que l'intervalle de croissance (équation [1]). La structure de corrélation unissant les accroissements d'un même arbre a été modélisée à l'aide d'une structure log-linéaire (équation [2]) ou d'une structure de puissance (équation [3]). Le choix entre les deux structures s'est fait en comparant les valeurs de leur critère d'information d'Akaike (Akaike 1973) :

$$\ln(acc_{ijk} + 1) = \beta x_{ijk} + \mu_i + \mu_{ik} + \varepsilon_{ijk} \quad [1]$$

$$cov_{ijkl} = \sigma^2 (1 - \rho \ln(\Delta t_{ikl})) \quad [2]$$

$$cov_{ijkl} = \sigma^2 \rho^{\Delta t_{ikl}} \quad [3]$$

où

acc_{ijk} = accroissement diamétral de l'arbre j de la placette i à la fin de l'intervalle de croissance k ,

β = vecteur de paramètres,

x_{ijk} = vecteur de variables explicatives,

μ_i = effet aléatoire de placette,

μ_{ik} = effet aléatoire d'intervalle,

ε_{ijk} = erreur résiduelle du modèle,

COV_{ijkl} = covariance entre deux termes d'erreur résiduelle (mesures k et l) d'un même arbre,

σ^2 = variance résiduelle de l'accroissement diamétral,

ρ = paramètre de corrélation, et

t_{ikl} = durée en années séparant les intervalles de croissance k et l de la placette i .

Les modules de mortalité (équation [4]) et de recrutement (probabilité de recrutement : équation [5]; nombre de recrues : équation [6]; diamètre des recrues : équation [7]) ont d'abord été paramétrés avec la procédure GLIMMIX de SAS :

$$\pi_{ijk} = 1 - e^{\beta x_{ijk} + \mu_i + \mu_{ik} + \ln(\Delta t_{ikl})} \quad [4]$$

$$\pi_{iks} = \frac{e^{\beta x_{iks} + \mu_i + \mu_{ik}}}{1 + e^{\beta x_{iks} + \mu_i + \mu_{ik}}} \quad [5]$$

$$\lambda_{iks} = e^{\beta x_{iks} + \mu_i + \mu_{ik}} \quad [6]$$

$$\phi_{ijk} = e^{\beta x_{iks} + \mu_i + \mu_{ik}} \quad [7]$$

où

π_{ijk} = probabilité de mortalité de l'arbre j de la placette i durant l'intervalle k (équation [4]),

π_{iks} = probabilité d'observer le recrutement d'au moins un arbre de DHP > 9,0 cm pour le groupe d'espèces s dans la placette i durant l'intervalle k (équation [5]),

λ_{iks} = nombre de recrues du groupe d'espèces s dans la placette i à la fin de l'intervalle k ,

ϕ_{ijk} = nombre de millimètres excédant le seuil de 9,1 cm du DHP de la recrue i de la placette j à la fin de l'intervalle k (équation [7]),

β = vecteur de paramètres,

x_{ijk} et x_{iks} = vecteurs de variables explicatives,

μ_i = effet aléatoire de placette,

u_{ik} = effet aléatoire d'intervalle, et

t_{ikl} = temps écoulé entre les intervalles de croissance k et l de la placette i .

Cette procédure permet de paramétrer des modèles linéaires mixtes généralisés pour estimer des effets aléatoires tenant compte de la corrélation entre les observations d'une même placette effectuées au cours d'une même période. Un effet aléatoire de placette et d'intervalle ont été inclus dans les modèles. Puisque les modèles mixtes généralisés produisent des estimations biaisées à l'échelle de la population lorsque seule la partie à effets fixes est utilisée (et que les effets aléatoires sont fixés à 0), nous avons appliqué à ces prévisions une correction basée sur la quadrature gaussienne (Fortin 2013). Cependant, lorsqu'ils ont été évalués à l'aide du processus de validation croisée (Efron et Gong 1983), les modèles linéaires mixtes généralisés corrigés produisaient toujours des estimations biaisées de la mortalité et du recrutement. En conséquence, nous avons paramétré à nouveau les équations mixtes généralisées sans les effets aléatoires. La validation croisée a confirmé que les résultats produits étaient moins biaisés.

Quelques variables explicatives ont été ajoutées à celles testées lors du paramétrage d'Artémis-2009. L'annexe 1 résume les différences entre Artémis-2009 et Artémis-2014, et l'annexe 2 présente la liste des variables explicatives pour les deux versions.

1.4 Évaluation du modèle

Les prévisions des modèles Artémis-2009 et Artémis-2014 ont été évaluées à l'aide de la technique de la validation croisée (Efron et Gong 1983), qui consiste à diviser le jeu de données en plusieurs groupes égaux. Dans notre cas, les placettes-échantillons permanentes ont été divisées en 10 groupes. Après l'attribution d'un groupe, le modèle a été calibré à l'aide des données des placettes des 9 autres groupes, et son ajustement a été évalué sur le 10^e groupe. Cette procédure a ensuite été répétée pour tous les autres groupes. Cette technique permet d'évaluer le modèle sur des données qui n'ont pas servi à sa calibration, ce qui fournit une meilleure évaluation de l'erreur et du biais lors de son application à l'ensemble de la population.

La majorité des placettes-échantillons permanentes ont été mesurées dans des peuplements n'ayant pas subi de perturbations anthropiques. Cependant, l'application du modèle dans un contexte de calcul des possibilités forestières implique des interventions comme une coupe partielle. Pour tenir compte de cette réalité, le jeu de données de validation a été séparé en 2 groupes : l'un incluant les mesures

effectuées en l'absence de coupe partielle, et l'autre incluant les mesures effectuées après une coupe partielle dans la placette-échantillon. Par exemple, si une placette-échantillon comptant 4 mesurages avait subi une coupe partielle entre la deuxième et la troisième mesure, le premier intervalle de croissance (de la mesure 1 à la mesure 2) a été évalué séparément du troisième (de la mesure 3 à la mesure 4). Le deuxième intervalle de croissance (de la mesure 2 à la mesure 3) n'a pas été utilisé pour la validation, puisqu'un prélèvement d'arbres y a été effectué. Si l'évaluation du modèle n'avait pas tenu compte de ces conditions de croissance bien distinctes, un mauvais ajustement du modèle après une coupe partielle aurait pu être masqué par un bon ajustement du modèle pour un plus grand nombre de mesures sans coupe partielle. L'évaluation séparée du modèle pour les deux groupes permet de valider sa capacité à représenter l'évolution d'un peuplement avec ou sans coupe partielle.

Les deux versions du modèle ont été évaluées pour chacune des placettes, sur l'horizon de mesure qui leur était propre et avec une approche déterministe, qui est de loin la plus largement utilisée (Fortin et Langevin 2012). Cette évaluation comprend plusieurs étapes (Figure 2) : d'abord, on prend comme point de départ la première mesure de chacune des placettes-échantillons, puis on simule l'évolution de la placette jusqu'à la seconde mesure. Les différences entre les résultats simulés et les observations à la deuxième mesure servent à évaluer le premier pas de simulation du modèle. Ensuite, on réintroduit les résultats simulés dans le modèle pour évaluer le deuxième pas de simulation, et l'on répète cette étape jusqu'à l'obtention de prévisions pour l'ensemble des mesurages. Ainsi, une placette comportant 3 mesurages peut être évaluée sur 2 pas de simulation, soit de la première à la deuxième et de la première à la troisième mesure. Pour la représentation des résultats, l'horizon de temps a été ramené à une moyenne de 10, 20, 30 ou 40 ans pour 1, 2, 3 ou 4 pas de simulation, respectivement.

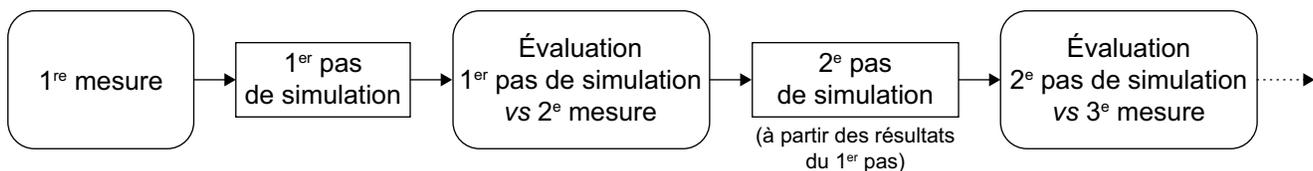


Figure 2. Étapes de l'évaluation du modèle Artémis.

La racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (REQM, équation [8]), le coefficient de détermination (R^2 , équation [9]) de la surface terrière totale ainsi que le biais (équation [10]) de la surface terrière totale et de la surface terrière de chacune des 3 espèces dominantes ont été calculés pour chacune des végétations potentielles comptant au moins 30 placettes-échantillons permanentes. Ces statistiques d'ajustement du modèle ont été calculées pour l'ensemble des pas de simulation, de même que pour chacun des pas de simulation comptant plus de 30 mesurages :

$$\text{REQM} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} (y_{ij} - \hat{y}_{ij})^2} \quad [8]$$

$$R^2 = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} (y_{ij} - \hat{y}_{ij})^2}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} (y_{ij} - \bar{y})^2} \right] \quad [9]$$

$$\text{biais} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} (y_{ij} - \hat{y}_{ij}) \quad [10]$$

où

y_{ij} = surface terrière de la placette i à la fin de l'intervalle j ,

\hat{y}_{ij} = prévision de la surface terrière de la placette i à la fin de l'intervalle j ,

\bar{y} = moyenne des y_{ij} ,

m_i = nombre d'intervalles dans la placette i ,

n = nombre de placettes, et

N = nombre total d'observations.

En plus de ces statistiques déjà rapportées dans la publication de Fortin et Langevin (2010), le biais sur la prévision de l'accroissement en surface terrière ainsi que la répartition de ce biais par module (mortalité, accroissement diamétral et recrutement) ont été calculés pour Artémis-2014.

2. Résultats

La fin du 4^e inventaire décennal a permis d'augmenter le nombre d'intervalles de croissance servant à paramétrer Artémis. La version 2014 s'appuie donc, en moyenne, sur 25 % plus de mesures que la précédente (Tableau 1). Cependant, les intervalles de croissance ajoutés n'étaient pas répartis également parmi les végétations potentielles. Pour certaines végétations potentielles (p. ex. : RE3 et RS5), l'augmentation du nombre d'intervalles a été de plus de 50 % alors que pour d'autres (p. ex. : FE4, FE6, FE5, MS6 et RP1), elle a été de moins de 10 %.

Les comportements des modèles Artémis-2009 et Artémis-2014 se ressemblent à plusieurs égards. Ainsi, on note peu de différences marquées dans la précision et les biais des deux versions, tant pour les peuplements n'ayant pas subi de coupe partielle

(Tableau 2, figure 3) que pour ceux ayant subi une coupe partielle (Tableau 3, figure 4). Le biais relatif total pour la surface terrière, toutes espèces confondues, demeure généralement inférieur à 5 % pour les deux versions du modèle, mais il est souvent un peu plus faible, en valeur absolue, chez Artémis-2014 que chez Artémis-2009. Par ailleurs, Artémis-2009 sous-estimait presque toujours la surface terrière, alors qu'Artémis-2014 la surestime pour quelques végétations potentielles (MF1, MS2, RB1, RS2, RS3, RS5, RT1 sans coupe partielle [Tableau 2], et MJ2, MS2 et RE2 avec coupe partielle [Tableau 3]).

Aucune des deux versions d'Artémis ne montre d'augmentation systématique du biais selon les périodes de simulation. Par contre, dans la version 2014 et pour les végétations potentielles MS2, RE1, RE2 et RS2, la période 4 présente des biais relatifs assez importants (plus de 10 %) dans les

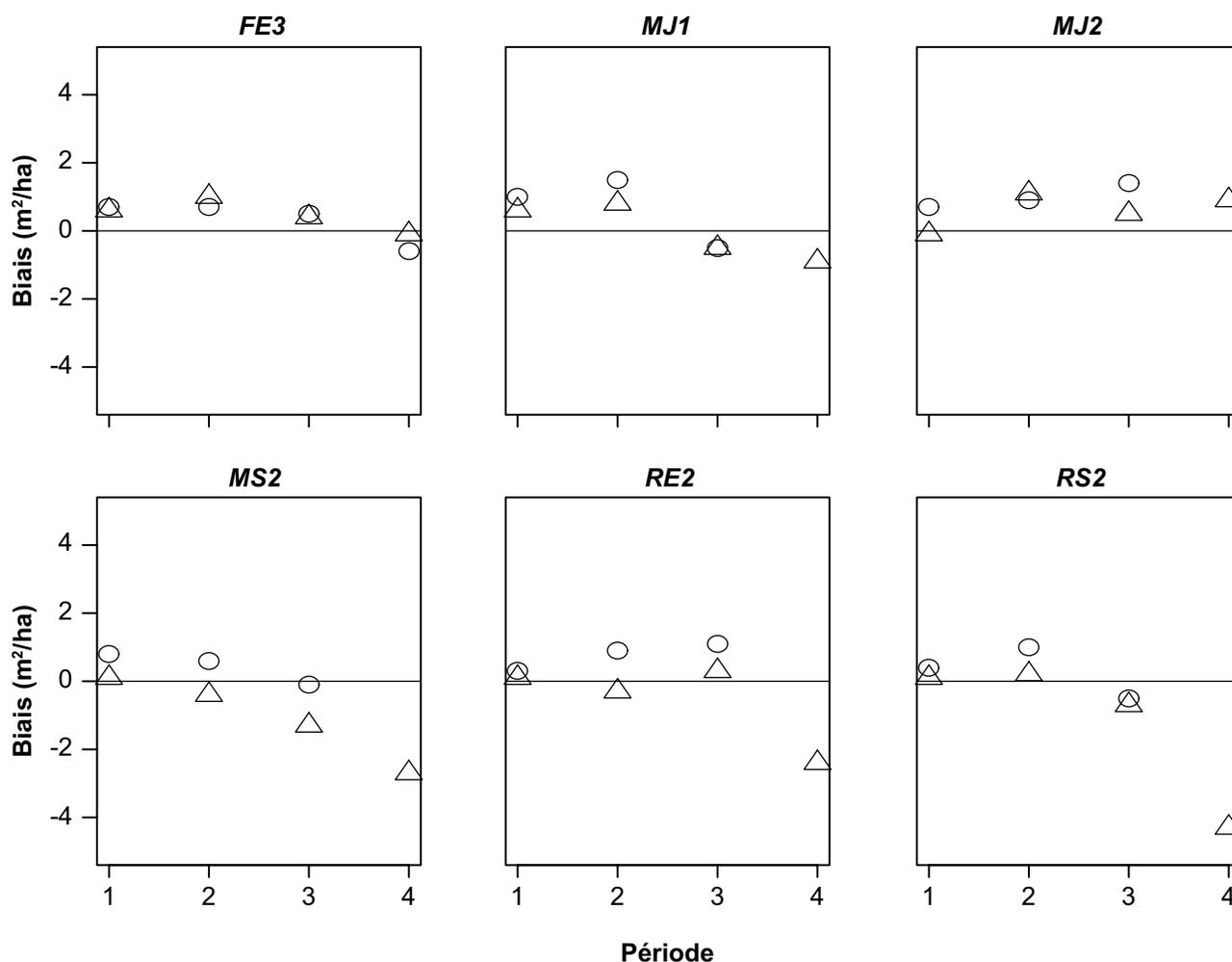


Figure 3. Biais par période de 10 ans pour les placettes sans coupe partielle dans les 6 principales végétations potentielles pour les modèles Artémis-2009 (cercles) et Artémis-2014 (triangles). Les codes des végétations potentielles sont définis au tableau 1.

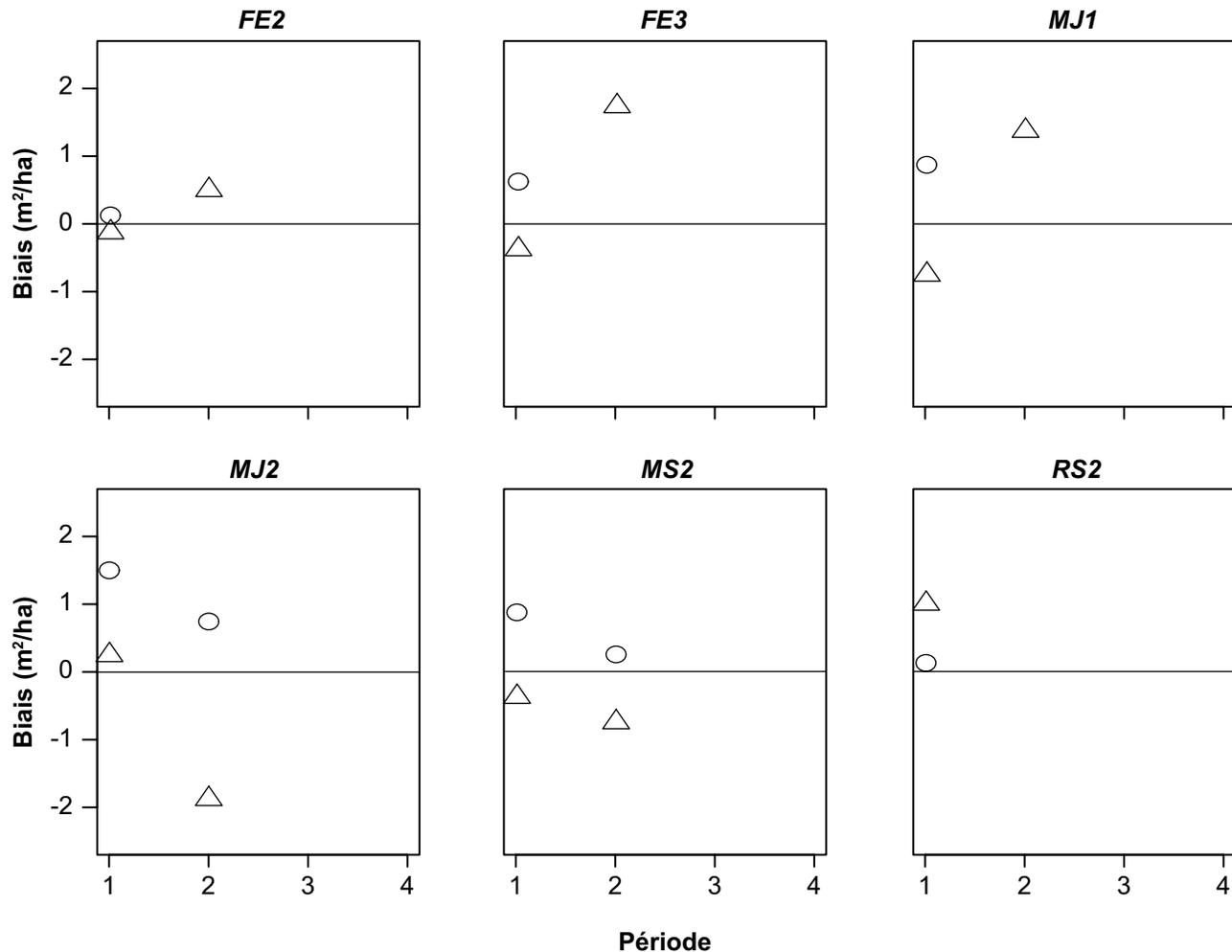


Figure 4. Biais par période de 10 ans pour les placettes avec coupe partielle dans les 6 principales végétations potentielles pour les modèles Artémis-2009 (cercles) et Artémis-2014 (triangles). Les codes des végétations potentielles sont définis au tableau 1.

peuplements sans coupe partielle, pour toutes les espèces confondues (Tableau 2). En ce qui concerne la précision des modèles sur l'ensemble des périodes d'observations, on remarque que les valeurs de REQM sont légèrement plus élevées et que le coefficient de détermination des prévisions de la surface terrière est généralement plus faible pour Artémis-2014 que pour Artémis-2009. Cependant, cette tendance n'est pas apparente lors d'une comparaison période par période. Les deux versions du modèle ont des biais comparables pour les trois espèces dominantes de chaque végétation potentielle, sauf lorsque l'une d'elles est le sapin baumier. Le biais dans la version 2014 est alors plus grand que dans la version 2009.

En général, les biais relatifs d'Artémis-2014 de l'accroissement en surface terrière (de moins de 5 % à plus de 100 %, Tableaux 4 et 5) sont supérieurs à

ceux de la surface terrière totale elle-même. En analysant Artémis-2014 par module, on remarque que la mortalité est surestimée dans les peuplements sans coupe partielle (Tableau 4) pour presque toutes les végétations potentielles, et ce, dès le premier intervalle de croissance. Les biais pour l'accroissement diamétral, quant à eux, semblent plus variables et ont tendance à s'accroître avec le temps, passant de positifs (sous-estimation) ou faiblement négatifs (surestimation) à plus fortement négatifs. Pour les peuplements sans coupe partielle, les biais dans le module du recrutement sont variables et généralement plus faibles que dans les deux autres modules (Tableau 4). Pour les peuplements ayant subi une coupe partielle, les biais attribuables au module de recrutement sont généralement plus importants (Tableau 5). En général, le recrutement est sous-estimé par Artémis-2014.

Tableau 2. Comparaison des biais et de la précision (REQM) des versions 2014 et 2009 d'Artémis pour les peuplements sans coupe partielle. Les valeurs relatives sont indiquées entre parenthèses. Les codes des végétations potentielles sont définis au tableau 1. Les espèces dominantes sont désignées par les codes suivants : BOJ : bouleau jaune; BOP : bouleau à papier; CHX : chênes; EPX : épinettes; ERR : érable rouge; ERS : érable à sucre; FRN : frêne noir; HEG : hêtre à grandes feuilles; MEL : mélèze laricin; OSV : ostryer de Virginie; PEU : peupliers; PRU : pruche occidentale; SAB : sapin baumier; THO : thuya occidental.

Code de végétation potentielle	Version d'Artémis	Période	Coefficient de détermination (R ²)	n	REQM	Biais de la surface terrière (m ² /ha)	Biais de la surface terrière pour les espèces dominantes (m ² /ha)				
							ERS	HEG	ERR		
FE2	2014	Toutes	0,721	520	4,4 (18,2 %)	0,1 (0,6 %)	0,4 (3,1 %)	-0,2 (-6,1 %)	0,0 (1,1 %)		
		1		278	3,1 (13,5 %)	0,5 (2,1 %)	0,4 (3,6 %)	-0,1 (-2,7 %)	0,1 (2,6 %)		
		2		141	5,0 (19,7 %)	0,6 (2,5 %)	0,4 (3,7 %)	0,0 (-1,2 %)	0,2 (6,6 %)		
		3		73	6,2 (24,9 %)	-0,7 (-2,9 %)	0,3 (2,3 %)	-0,4 (-13,6 %)	-0,1 (-3,2 %)		
	2009	Toutes	0,743	443	4,2 (17,7 %)	0,9 (3,9 %)	0,6 (5,6 %)	-0,2 (-7,0 %)	0,2 (7,7 %)		
		1		256	3,2 (14,0 %)	0,8 (3,3 %)	0,4 (4,1 %)	-0,1 (-3,4 %)	0,1 (4,8 %)		
		2		131	5,1 (20,0 %)	1,1 (4,5 %)	0,6 (5,1 %)	-0,1 (-3,8 %)	0,2 (8,4 %)		
		3		50	6,1 (23,8 %)	1,5 (5,7 %)	1,5 (12,8 %)	-0,8 (-35,4 %)	0,4 (18,9 %)		
								ERS	BOJ	ERR	
		Toutes		1833	5,2 (21,9 %)	0,7 (2,8 %)	0,6 (4,9 %)	0,0 (1,5 %)	0,1 (6,0 %)		
2014	1	894	3,8 (16,6 %)	0,6 (2,8 %)	0,4 (3,8 %)	0,1 (2,1 %)	0,1 (4,2 %)				
	2	514	5,7 (23,6 %)	1,0 (4,0 %)	0,8 (7,1 %)	0,1 (2,5 %)	0,2 (9,3 %)				
	3	331	6,9 (27,5 %)	0,4 (1,8 %)	0,5 (4,4 %)	0,0 (0,8 %)	0,1 (2,6 %)				
	4	94	6,8 (26,3 %)	-0,1 (-0,2 %)	0,6 (4,6 %)	-0,2 (-6,1 %)	0,3 (15,5 %)				
2009	Toutes	0,558	1618	5,1 (21,9 %)	0,6 (2,7 %)	0,3 (3,0 %)	0,1 (2,0 %)	0,1 (6,9 %)			
	1		823	4,0 (17,5 %)	0,7 (3,0 %)	0,3 (3,1 %)	0,1 (2,5 %)	0,1 (5,6 %)			
	2		495	5,6 (23,5 %)	0,7 (3,1 %)	0,5 (4,1 %)	0,1 (1,8 %)	0,2 (9,5 %)			
	3		267	6,8 (27,1 %)	0,5 (1,9 %)	0,1 (1,1 %)	0,0 (1,5 %)	0,1 (4,1 %)			
	4		33	7,5 (29,5 %)	-0,6 (-2,2 %)	0,1 (0,5 %)	-0,1 (-2,5 %)	0,3 (21,1 %)			
FE5	2014	Toutes	0,706	133	3,9 (15,9 %)	0,5 (1,9 %)	0,4 (3,2 %)	0,0 (1,2 %)	-0,1 (-9,4 %)		
		1		65	3,0 (14,6 %)	0,2 (0,6 %)	0,2 (1,8 %)	0,0 (-2,5 %)	0,0 (-2,5 %)		
		2		38	3,6 (14,2 %)	0,7 (2,9 %)	0,7 (5,1 %)	-0,1 (-5,4 %)	-0,1 (-5,6 %)		
	2009	Toutes	0,716	126	4,1 (16,8 %)	1,1 (4,5 %)	0,6 (4,5 %)	0,1 (2,9 %)	0,0 (-3,7 %)		
		1		63	3,0 (13,5 %)	0,6 (2,5 %)	0,3 (2,9 %)	0,0 (1,2 %)	0,0 (-0,7 %)		
		2		38	3,8 (15,1 %)	1,4 (5,6 %)	0,7 (5,8 %)	0,0 (2,1 %)	0,0 (-0,7 %)		
FE6	2014	Toutes	0,638	254	4,3 (17,7 %)	0,0 (0,0 %)	-0,4 (-5,4 %)	0,4 (7,2 %)	0,3 (10,6 %)		
		1		123	2,6 (11,4 %)	-0,1 (-0,6 %)	-0,3 (-4,3 %)	0,3 (5,7 %)	0,1 (4,0 %)		
		2		67	5,1 (19,2 %)	1,3 (5,1 %)	-0,3 (-3,7 %)	0,7 (13 %)	0,6 (19,5 %)		
		3		59	6 (22,8 %)	-1,0 (-3,8 %)	-0,7 (-7,7 %)	0,2 (3,3 %)	0,3 (10,8 %)		
	2009	Toutes	0,652	241	4,0 (16,6 %)	0,6 (2,6 %)	-0,2 (-2,3 %)	0,5 (8,8 %)	0,3 (13,9 %)		
		1		118	2,6 (11,8 %)	0,3 (1,4 %)	-0,2 (-2,8 %)	0,3 (7,1 %)	0,1 (4,5 %)		
		2		64	4,4 (16,8 %)	1,5 (5,7 %)	-0,1 (-1,6 %)	0,8 (13,4 %)	0,7 (22,6 %)		
		3		58	5,7 (21,6 %)	0,3 (1,0 %)	-0,2 (-2,3 %)	0,3 (5,7 %)	0,5 (15,1 %)		
								CHX	ERS	ERR	

Tableau 2. (suite)

Code de végétation potentielle	Version d'Artémis	Période	Coefficient de détermination (R ²)	n	REQM	Biais de la surface terrière (m ² /ha)	Biais de la surface terrière pour les espèces dominantes (m ² /ha)			
							FRN	SAB	BOJ	
MF1	2014	Toutes	0,771	123	6,0 (30,2 %)	-0,6 (-3,2 %)	-0,1 (-1,2 %)	-0,4 (-15,2 %)	0,1 (6,3 %)	
		1		61	4,4 (23,0)	-0,3 (-1,5 %)	0,0 (0,5 %)	-0,2 (-6,2 %)	0,0 (1,5 %)	
		2		32	6,0 (30,8 %)	-0,3 (-1,7 %)	-0,4 (-8,5 %)	-0,6 (-25,0 %)	0,1 (6,4 %)	
	2009	Toutes	0,608	108	6,5 (33,8 %)	-0,1 (-0,6 %)	0,0 (-0,8 %)	-0,3 (-10,6 %)	0,2 (8,8 %)	
		1		56	4,6 (23,2 %)	0,5 (2,3 %)	0,2 (3,5 %)	0,0 (-1,6 %)	0,1 (4,0 %)	
		2		30	6,8 (35,9 %)	0,1 (0,5 %)	-0,3 (-6,9 %)	-0,6 (-24,1 %)	0,4 (15,3 %)	
MJ1	2014	Toutes	0,560	1052	5,6 (24,2 %)	0,4 (1,6 %)	0,1 (2,0 %)	-0,4 (-8,2 %)	0,2 (5,8 %)	
		1		461	4,2 (19,2 %)	0,6 (3,0 %)	0,1 (2,0 %)	-0,1 (-2,7 %)	0,1 (5,4 %)	
		2		310	5,5 (23,0 %)	0,8 (3,4 %)	0,2 (3,8 %)	-0,4 (-8,9 %)	0,3 (8,0 %)	
		3		211	7,4 (30,7 %)	-0,5 (-1,9 %)	0,1 (1,1 %)	-0,6 (-12,9 %)	0,1 (2,3 %)	
	2009	Toutes	0,635	863	5,2 (23,1 %)	1,0 (4,3 %)	0,1 (2,5 %)	0,1 (2,9 %)	0,1 (2,5 %)	
		1		439	4,1 (18,9 %)	1,0 (4,7 %)	0,2 (2,8 %)	0,2 (3,5 %)	0,2 (2,8 %)	
		2		293	5,8 (24,3 %)	1,5 (6,4 %)	0,3 (4,7 %)	0,3 (5,7 %)	0,3 (4,7 %)	
		3		131	6,9 (30,2 %)	-0,5 (-2,0 %)	-0,2 (-2,2 %)	-0,3 (-9,4 %)	-0,2 (-2,2 %)	
	MJ2	2014	Toutes	0,605	1714	5,6 (27,1 %)	0,4 (2,0 %)	-0,5 (-14,0 %)	0,2 (5,3 %)	0,2 (6,9 %)
			1		770	4,0 (20,5 %)	-0,1 (-0,5 %)	-0,6 (-15,3 %)	0,0 (0,9 %)	0,1 (3,1 %)
			2		468	5,7 (27,0 %)	1,1 (5,3 %)	-0,5 (-15,0 %)	0,5 (11,0 %)	0,4 (10,4 %)
			3		444	7,3 (32,2 %)	0,5 (2,4 %)	-0,4 (-11,2 %)	0,2 (4,3 %)	0,3 (8,1 %)
2009		Toutes	0,564	1555	5,9 (29,3 %)	1,0 (4,8 %)	-0,2 (-4,6 %)	0,2 (6,1 %)	0,2 (5,6 %)	
		1		708	4,3 (22,5 %)	0,7 (3,6 %)	-0,2 (-5,0 %)	0,1 (1,9 %)	0,1 (3,4 %)	
		2		450	6,2 (29,8 %)	0,9 (4,5 %)	-0,4 (-13,9 %)	0,4 (8,2 %)	0,3 (7,6 %)	
		3		378	7,7 (35,0 %)	1,4 (6,4 %)	0,1 (3,2 %)	0,4 (8,4 %)	0,3 (6,8 %)	
MS1	2014	Toutes	0,459	746	7,1 (34,2 %)	0,2 (1,1 %)	-0,7 (-10,4 %)	0,6 (14,3 %)	0,1 (7,1 %)	
		1		392	5,2 (25,3 %)	0,9 (4,7 %)	0,4 (5,8 %)	0,3 (8,2 %)	0,0 (4,1 %)	
		2		201	7,9 (39,3 %)	-0,2 (-0,8 %)	-1,6 (-29,6 %)	1,0 (22,2 %)	0,1 (11,1 %)	
	2009	Toutes	0,439	655	7,1 (35,5 %)	1,2 (5,7 %)	-0,3 (-5,0 %)	0,7 (18,1 %)	0,3 (9,6 %)	
		1		359	5,5 (27,6 %)	1,5 (7,7 %)	0,6 (8,2 %)	0,3 (9,7 %)	0,2 (6,4 %)	
		2		181	7,9 (40,5 %)	0,7 (3,6 %)	-1,3 (-23,5 %)	1,0 (23,5 %)	0,4 (14,7 %)	
MS2	2014	Toutes	0,485	3155	7,3 (37,7 %)	-0,4 (-2,1 %)	-0,8 (-11,5 %)	0,5 (9,2 %)	-0,2 (-4,6 %)	
		1		1531	5,8 (30,6 %)	0,1 (0,5 %)	-0,2 (-2,6 %)	0,2 (5,1 %)	-0,1 (-3,2 %)	
		2		918	7,6 (38,7 %)	-0,4 (-2,5 %)	-1,1 (-18,7 %)	0,7 (12,5 %)	-0,2 (-4,6 %)	
		3		573	9,2 (45,3 %)	-1,3 (-6,2 %)	-1,6 (-23,0 %)	0,7 (12,7 %)	-0,2 (-6,5 %)	
	2009	Toutes	0,516	2863	7,3 (38,6 %)	0,6 (3,2 %)	-0,3 (-4 %)	0,5 (11,1 %)	0,0 (1,4 %)	
		1		1652	5,8 (30,7 %)	0,8 (4,0 %)	0,3 (4,0 %)	0,1 (3,4 %)	0,0 (0,9 %)	
		2		798	8,3 (43,7 %)	0,6 (3,2 %)	-1 (-18,0 %)	1,0 (17,6 %)	0,1 (1,9 %)	
		3		410	10,1 (52,9 %)	-0,1 (-0,4 %)	-1,4 (-20,2 %)	1,1 (21,4 %)	0,1 (2,1 %)	

Tableau 2. (suite)

Code de végétation potentielle	Version d'Artémis	Période	Coefficient de détermination (R ²)	n	REQM	Biais de la surface terrière (m ² /ha)	Biais de la surface terrière pour les espèces dominantes (m ² /ha)			
							SAB	PEU	BOP	
MS6	2014	Toutes	0,51	316	6,9 (34,5 %)	0,4 (2,2 %)	-0,4 (-5,9 %)	0,2 (6,2 %)	0,3 (9,2 %)	
		1		196	5,6 (28,8 %)	0,3 (1,7 %)	0,0 (0,6 %)	0,2 (6,0 %)	0,0 (1,5 %)	
		2		77	8,6 (40,2 %)	1,5 (7,1 %)	-0,3 (-4,3 %)	0,4 (13,1 %)	0,8 (20,6 %)	
		3		42	9,0 (42,6 %)	-0,8 (-3,8 %)	-2,6 (-44,5 %)	-0,1 (-1,7 %)	0,7 (16,1 %)	
	2009	Toutes	0,504	292	6,9 (34,8 %)	1,0 (5,2 %)	0,1 (1,3 %)	0,1 (3,6 %)	0,3 (7,3 %)	
		1		178	5,1 (27,1 %)	1,1 (5,8 %)	0,5 (8,2 %)	0,2 (5,7 %)	0,1 (1,8 %)	
		2		72	9,3 (44,3 %)	1,8 (8,4 %)	0,0 (0,6 %)	0,3 (8,2 %)	0,6 (16,8 %)	
		3		42	8,5 (39,1 %)	-0,5 (-2,3 %)	-1,7 (-26,3 %)	-0,4 (-13,7 %)	0,4 (10,0 %)	
RB1	2014	Toutes	0,718	64	5,8 (27,7 %)	-0,7 (-3,5 %)	-0,1 (-1,3 %)	-0,3 (-10,4 %)		
				42	4,9 (24,0 %)	0,2 (1,1 %)	0,3 (2,5 %)	-0,2 (-7,0 %)		
	2009	Toutes	0,649	58	7,1 (40,1 %)	0,5 (2,8 %)	0,5 (4,8 %)	-0,4 (-22 %)		
				36	4,1 (25,2 %)	0,6 (3,8 %)	0,2 (2,6 %)	-0,1 (-6,7 %)		
	RC3	2014	Toutes	0,779	176	6,8 (26,2 %)	0,8 (2,9 %)	0,5 (3,6 %)	-0,1 (-3,4 %)	0,2 (6,1 %)
					92	4,6 (17,7 %)	1,4 (5,3 %)	0,7 (4,4 %)	0,2 (6,1 %)	0,1 (4,0 %)
2009		Toutes	0,819	148	6,4 (26,1 %)	0,9 (3,6 %)	0,4 (2,5 %)	0,1 (4,3 %)	0,1 (4,0 %)	
				84	4,2 (16,5 %)	1,6 (6,2 %)	0,6 (4,1 %)	0,4 (12,7 %)	0,2 (5,3 %)	
					39	7,5 (32,2 %)	0,1 (0,4 %)	-0,2 (-1,7 %)	-0,1 (-4,0 %)	-0,1 (-2,7 %)
RE1	2014	Toutes	0,73	612	2,9 (30,0 %)	0,0 (0,2 %)	-0,2 (-2,4 %)	0,2 (6,3 %)	0,0 (-1,6 %)	
				284	1,7 (18,0 %)	0,2 (2,3 %)	0,0 (0,3 %)	0,2 (6,0 %)	0,0 (2,5 %)	
				208	3,2 (33,2 %)	-0,1 (-0,7 %)	-0,2 (-2,6 %)	0,1 (6,6 %)	0,0 (-19,2 %)	
				89	3,9 (40,2 %)	0,3 (2,9 %)	-0,1 (-1,1 %)	0,3 (9,7 %)	0,0 (22,6 %)	
					31	4,8 (49,7 %)	-2 (-20,5 %)	-1,7 (-21,1 %)	-0,2 (-20,9 %)	0,0 (-3,1 %)
	2009	Toutes	0,783	486	2,3 (25,7 %)	0,0 (0,3 %)	-0,1 (-2,3 %)	0,2 (5,8 %)	0,0 (-7,1 %)	
				283	1,7 (19,0 %)	0,1 (1,3 %)	-0,1 (-1,1 %)	0,2 (5,5 %)	0,0 (5,5 %)	
				146	2,9 (31,0 %)	0,0 (0,1 %)	-0,2 (-2,6 %)	0,2 (9,6 %)	0,0 (-19,1 %)	
				57	3,3 (38,9 %)	-0,4 (-5,0 %)	-0,4 (-8,1 %)	0,0 (-0,6 %)	0,0 (-17,6 %)	
RE2	2014	Toutes	0,69	2791	5,4 (31,4 %)	-0,2 (-0,9 %)	-0,3 (-2,2 %)	0,1 (2,6 %)	0,0 (-4,0 %)	
				1260	3,4 (20,8 %)	0,1 (0,5 %)	-0,1 (-1,2 %)	0,2 (6,2 %)	0,0 (-3,2 %)	
				955	5,8 (33,0 %)	-0,3 (-1,4 %)	-0,3 (-2,0 %)	0,0 (0,2 %)	0,0 (-5,8 %)	
				407	7,2 (39,6 %)	0,3 (1,4 %)	0,1 (1,0 %)	0,0 (-1,6 %)	0,0 (-2,6 %)	
					169	8,7 (50,1 %)	-2,4 (-13,6 %)	-2,3 (-16,8 %)	-0,2 (-8,8 %)	0,0 (-4,9 %)
	2009	Toutes	0,726	2111	4,9 (29,5 %)	0,6 (3,7 %)	0,2 (1,7 %)	0,2 (8,2 %)	0,0 (2,8 %)	
				1194	3,4 (20,9 %)	0,3 (2,1 %)	0,0 (-0,2 %)	0,3 (8,1 %)	0,0 (2,3 %)	
				672	5,9 (35,1 %)	0,9 (5,4 %)	0,4 (3,2 %)	0,2 (8,5 %)	0,1 (8,4 %)	
				244	7,3 (43,0 %)	1,1 (6,6 %)	0,7 (5,6 %)	0,1 (8,1 %)	-0,1 (-9,0 %)	

Tableau 2. (suite et fin)

Code de végétation potentielle	Version d'Artémis	Période	Coefficient de détermination (R ²)	n	REQM	Biais de la surface terrière (m ² /ha)	Biais de la surface terrière pour les espèces dominantes (m ² /ha)		
							EPX	SAB	ERR
RS5	2014	Toutes	0,713	141	6,7 (27,3 %)	-0,2 (-0,8 %)	0,1 (1,0 %)	-0,1 (-0,8 %)	-0,3 (-9,8 %)
		1		71	5,3 (22,6 %)	-0,2 (-0,8 %)	-0,1 (-1,8 %)	0,0 (-0,1 %)	-0,3 (-10,7 %)
		2		47	6,4 (26,0 %)	-0,6 (-2,5 %)	-0,4 (-3,8 %)	-0,1 (-1,1 %)	0,2 (7,7 %)
	2009	Toutes	0,639	95	6,0 (26,4 %)	0,9 (4,0 %)	0,2 (2,4 %)	0,5 (8,0 %)	0,0 (2,2 %)
		1		51	4,8 (22,9 %)	0,9 (4,4 %)	-0,1 (-1,8 %)	0,4 (7,7 %)	0,0 (-1,9 %)
		2		35	6,5 (26,6 %)	0,8 (3,1 %)	0,5 (5,0 %)	0,4 (6,6 %)	0,2 (9,3 %)
RT1	2014	Toutes	0,794	133	5,1 (15,3 %)	-0,1 (-0,2 %)	-0,5 (-3,1 %)	0,4 (7,7 %)	-0,3 (-17,7 %)
		1		65	3,8 (12,6 %)	-0,9 (-2,9 %)	-1,1 (-8,2 %)	0,1 (3,0 %)	-0,2 (-8,9 %)
		2		33	5,7 (16,2 %)	0,2 (0,5 %)	-0,6 (-3,5 %)	0,7 (13,5 %)	-0,4 (-21,3 %)
	2009	Toutes	0,777	114	5,9 (18,0 %)	1,1 (3,4 %)	-0,1 (-0,8 %)	0,5 (9,9 %)	0,0 (-0,2 %)
		1		58	4,2 (14,0 %)	-0,4 (-1,4 %)	-0,7 (-5,5 %)	0,2 (4,4 %)	0,0 (-0,2 %)
		2		30	5,8 (16,5 %)	1,6 (4,4 %)	0,2 (0,9 %)	0,9 (15,1 %)	-0,1 (-8,0 %)

Tableau 3. Comparaison des biais et de la précision (REQM) des versions 2014 et 2009 d'Artémis pour les peuplements avec coupe partielle. Les valeurs relatives sont indiquées entre parenthèses. Les codes des végétations potentielles sont définis au tableau 1, et ceux des espèces dominantes sont définis au tableau 2.

Code de végétation potentielle	Version d'Artémis	Période	Coefficient de détermination (R ²)	n	REQM	Biais de la surface terrière (m ² /ha)	Biais de la surface terrière pour les espèces dominantes (m ² /ha)		
							ERS	HEG	ERR
FE2	2014	Toutes	0,653	135	5,1 (25,6 %)	0,0 (-0,1 %)	-0,3 (-3,2 %)	0,1 (4,8 %)	-0,1 (-6,9 %)
		1		89	4,0 (21,2 %)	-0,1 (-0,6 %)	-0,3 (-3,7 %)	0,2 (6,7 %)	-0,2 (-14,0 %)
		2		36	6,1 (26,5 %)	0,4 (1,7 %)	0,5 (3,9 %)	0,1 (2,6 %)	-0,1 (-10,4 %)
	2009	Toutes	0,795	74	4,6 (25,6 %)	0,6 (3,6 %)	0,0 (0,2 %)	0,0 (0,3 %)	-0,2 (-10,5 %)
		1		53	4,1 (23,7 %)	0,1 (0,7 %)	-0,1 (-1,2 %)	0,1 (4,2 %)	-0,2 (-11,8 %)
FE3	2014	Toutes	0,711	333	4,7 (24,6 %)	0,2 (1,0 %)	0,2 (2,1 %)	0,0 (0,3 %)	-0,1 (-9,5 %)
		1		229	3,6 (20,6 %)	-0,3 (-1,8 %)	-0,1 (-1,5 %)	0,0 (-2,5 %)	0,0 (-0,9 %)
		2		80	6,4 (29,9 %)	1,4 (5,8 %)	1,0 (9,0 %)	0,2 (9,4 %)	-0,2 (-10,9 %)
	2009	Toutes	0,76	238	4,5 (24,6 %)	1,3 (6,9 %)	0,5 (4,8 %)	0,1 (5,4 %)	0,0 (1,3 %)
		1		171	3,3 (19,6 %)	0,5 (2,7 %)	0,1 (0,9 %)	0,1 (3,5 %)	0,0 (-0,1 %)
		2		54	6,7 (31,6 %)	3,3 (15,7 %)	1,8 (15,5 %)	0,3 (16,6 %)	0,1 (6,5 %)
MJ1	2014	Toutes	0,690	221	4,8 (28,9 %)	0,0 (-0,1 %)	0,3 (7,1 %)	0,8 (21,0 %)	-0,5 (-16,0 %)
		1		144	4,1 (27,4 %)	-0,6 (-3,8 %)	0,2 (4,5 %)	0,6 (20,0 %)	-0,5 (-21,6 %)
		2		60	5,7 (29,2 %)	1,1 (4,3 %)	0,5 (11,6 %)	1,4 (27,2 %)	-0,3 (-8,3 %)
	2009	Toutes	0,731	122	4,2 (28,5 %)	0,8 (5,3 %)	0,4 (9,6 %)	1,0 (35,0 %)	-0,4 (-17,0 %)
		1		97	3,7 (26,0 %)	0,7 (5,1 %)	0,3 (8,0 %)	0,9 (33,5 %)	-0,3 (-12,1 %)

Tableau 3. (suite et fin)

Code de végétation potentielle	Version d'Artémis	Période	Coefficient de détermination (R ²)	n	REQM	Biais de la surface terrière (m ² /ha)	Biais de la surface terrière pour les espèces dominantes (m ² /ha)		
							SAB	BOP	BOJ
MJ2	2014	Toutes	0,663	200	4,6 (29,8 %)	-0,2 (-1,4 %)	0,0 (1,2 %)	-0,4 (-21,4 %)	0,0 (0,4 %)
		1		143	3,9 (26,3 %)	0,2 (1,2 %)	0,4 (13,4 %)	-0,3 (-15,1 %)	0,0 (0,6 %)
		2		46	6,2 (38,3 %)	-1,5 (-9,5 %)	-0,7 (-21,3 %)	-0,7 (-31,7 %)	0,0 (-1,7 %)
	2009	Toutes	0,644	175	4,7 (31,3 %)	1,2 (8,3 %)	0,6 (23,2 %)	-0,3 (-14,3 %)	0,0 (1,4 %)
		1		125	4,2 (28,8 %)	1,2 (8,5 %)	0,8 (29,5 %)	-0,3 (-9,6 %)	0,0 (0,9 %)
		2		39	5,9 (37,4 %)	0,6 (3,9 %)	0,2 (7,5 %)	-0,2 (-21,8 %)	0,1 (2,2 %)
MS1	2014	Toutes	0,626	104	5,6 (35,2 %)	0,7 (4,3 %)	0,5 (9,9 %)	-0,4 (-33,0 %)	0,1 (3,8 %)
		1		70	4,4 (30,7 %)	0,2 (1,2 %)	0,5 (11,2 %)	-0,4 (-36,8 %)	-0,1 (-1,6 %)
		2		79	5,3 (32,4 %)	1,5 (9,2 %)	1,4 (26,9 %)	-0,6 (-38,3 %)	0,1 (2,3 %)
	2009	Toutes	0,701	55	4,2 (28,6 %)	0,6 (4,0 %)	0,8 (17,9 %)	-0,4 (-32,4 %)	0,0 (-0,6 %)
		1		282	5,9 (44,1 %)	-0,6 (-4,2 %)	0,1 (1,0 %)	-0,7 (-27,0 %)	-0,2 (-12,9 %)
		2		197	4,5 (37,7 %)	-0,3 (-2,6 %)	0,1 (2,7 %)	-0,6 (-24,4 %)	-0,1 (-6,6 %)
MS2	2014	Toutes	0,603	66	7,8 (47,1 %)	-0,6 (-3,4 %)	0,1 (1,2 %)	-0,8 (-23,8 %)	-0,5 (-32,6 %)
		1		189	4,6 (41,2 %)	0,7 (6,2 %)	1,0 (21,6 %)	-0,4 (-16,9 %)	0,1 (5,6 %)
		2		135	3,9 (36,2 %)	0,7 (6,0 %)	0,9 (21,4 %)	-0,4 (-15,5 %)	0,0 (3,3 %)
	2009	Toutes	0,758	46	5,3 (47,7 %)	0,2 (1,8 %)	0,9 (16,0 %)	-0,4 (-21,1 %)	0,1 (4,0 %)
		1		61	4,2 (40,3 %)	-1,0 (-9,2 %)	-0,3 (-30,3 %)	0,3 (9,4 %)	0,4 (46,3 %)
		2		45	4,1 (36,9 %)	-0,4 (-3,2 %)	-1,3 (-29,5 %)	0,6 (16,2 %)	0,4 (46,8 %)
RE2	2009	Toutes	0,842	39	3,7 (44,2 %)	0,7 (8,0 %)	-0,6 (-20,1 %)	1,0 (30,2 %)	0,4 (60,0 %)
	RS2	2014	0,662	119	4,6 (53,9 %)	1,2 (11,6 %)	0,8 (22,0 %)	1,2 (36,6 %)	-0,3 (-26,5 %)
1				77	3,4 (45,5 %)	0,8 (8,0 %)	0,6 (16,4 %)	0,9 (32,0 %)	-0,2 (-15,2 %)
2				96	4,0 (56,9 %)	0,4 (5,3 %)	0,1 (2,4 %)	0,6 (23,8 %)	-0,3 (-27,4 %)
2009		0,720	67	3,5 (52,9 %)	0,1 (1,6 %)	-0,1 (-2,6 %)	0,6 (23,5 %)	-0,2 (-23,2 %)	
			1	282	5,9 (44,1 %)	-0,6 (-4,2 %)	0,1 (1,0 %)	-0,7 (-27,0 %)	-0,2 (-12,9 %)
			2	197	4,5 (37,7 %)	-0,3 (-2,6 %)	0,1 (2,7 %)	-0,6 (-24,4 %)	-0,1 (-6,6 %)
RE2	2014	Toutes	0,785	61	4,2 (40,3 %)	-1,0 (-9,2 %)	-0,3 (-30,3 %)	0,3 (9,4 %)	0,4 (46,3 %)
		1		45	4,1 (36,9 %)	-0,4 (-3,2 %)	-1,3 (-29,5 %)	0,6 (16,2 %)	0,4 (46,8 %)
		2		39	3,7 (44,2 %)	0,7 (8,0 %)	-0,6 (-20,1 %)	1,0 (30,2 %)	0,4 (60,0 %)
	2009	Toutes	0,842	39	3,7 (44,2 %)	0,7 (8,0 %)	-0,6 (-20,1 %)	1,0 (30,2 %)	0,4 (60,0 %)
		1		119	4,6 (53,9 %)	1,2 (11,6 %)	0,8 (22,0 %)	1,2 (36,6 %)	-0,3 (-26,5 %)
		2		77	3,4 (45,5 %)	0,8 (8,0 %)	0,6 (16,4 %)	0,9 (32,0 %)	-0,2 (-15,2 %)
2009	Toutes	0,720	96	4,0 (56,9 %)	0,4 (5,3 %)	0,1 (2,4 %)	0,6 (23,8 %)	-0,3 (-27,4 %)	
	1		67	3,5 (52,9 %)	0,1 (1,6 %)	-0,1 (-2,6 %)	0,6 (23,5 %)	-0,2 (-23,2 %)	
	2		67	3,5 (52,9 %)	0,1 (1,6 %)	-0,1 (-2,6 %)	0,6 (23,5 %)	-0,2 (-23,2 %)	

Tableau 4. Biais de l'accroissement en surface terrière totale par période et par module d'Artémis-2014 pour les peuplements sans coupe partielle. Les valeurs relatives sont indiquées entre parenthèses. Les codes des végétations potentielles sont définis au tableau 1.

Code de végétation potentielle	Période	n	Accroissement en surface terrière, par période (m ² /ha)	Biais de l'accroissement en surface terrière (m ² /ha)	Biais de l'accroissement en surface terrière, par module (m ² /ha)		
					Accroissement diamétral	Mortalité	Recrutement
FE2	Toutes	520	2,4	0,1 (2,1 %)	-0,1 (-0,3 %)	-0,2 (-0,9 %)	-0,1 (-0,3 %)
	1	278	2,8	0,5 (17,1 %)	0,2 (0,9 %)	-0,4 (-1,6 %)	-0,1 (-0,4 %)
	2	141	2,7	0,3 (10,8 %)	0,1 (0,5 %)	-0,2 (-0,8 %)	0,0 (-0,2 %)
	3	73	1,3	-1,1 (-87,4 %)	-0,5 (-2,1 %)	0,6 (2,2 %)	-0,1 (-0,3 %)
FE3	Toutes	1833	1,9	0,3 (13,8 %)	0,2 (0,8 %)	-0,1 (-0,4 %)	0,0 (-0,1 %)
	1	894	2,1	0,5 (26,0 %)	0,4 (1,5 %)	-0,2 (-1 %)	0,0 (-0,2 %)
	2	514	1,9	0,3 (16,3 %)	0,7 (2,9 %)	0,3 (1,3 %)	-0,1 (-0,3 %)
	3	331	1,6	-0,2 (-9,5 %)	-0,6 (-2,3 %)	-0,4 (-1,5 %)	0,1 (0,2 %)
	4	94	1,3	-1,2 (-90,8 %)	-1,2 (-4,6 %)	-0,1 (-0,4 %)	0,0 (-0,1 %)

Tableau 4. (suite)

Code de végétation potentielle	Période	n	Accroissement en surface terrière, par période (m ² /ha)	Biais de l'accroissement en surface terrière (m ² /ha)	Biais de l'accroissement en surface terrière, par module (m ² /ha)		
					Accroissement diamétral	Mortalité	Recrutement
FE5	Toutes	133	2,2	0,1 (4,3 %)	-0,1 (-0,2 %)	-0,2 (-0,9 %)	-0,1 (-0,3 %)
	1	65	2,2	0,1 (3,7 %)	-0,2 (-0,7 %)	-0,2 (-0,7 %)	0,1 (0,4 %)
	2	38	2,8	0,6 (21,4 %)	0,5 (2,0 %)	-0,3 (-1,3 %)	-0,2 (-0,9 %)
FE6	Toutes	254	2,2	-0,1 (-5,0 %)	-0,1 (-0,5 %)	-0,1 (-0,5 %)	-0,1 (-0,5 %)
	1	123	1,8	-0,1 (-4,9 %)	-0,1 (-0,3 %)	0,0 (0,2 %)	0,0 (0,1 %)
	2	67	3,9	1,3 (32,4 %)	0,8 (3,2 %)	-0,7 (-2,8 %)	-0,3 (-1,1 %)
	3	59	1,4	-1,5 (-102,4 %)	-1,2 (-4,8 %)	-0,1 (-0,3 %)	-0,2 (-0,9 %)
MF1	Toutes	123	0,8	-0,1 (-17,3 %)	-0,3 (-1,7 %)	-0,5 (-2,4 %)	-0,3 (-1,4 %)
	1	61	0,0	0,0 (na)	-0,2 (-1,1 %)	0,1 (0,6 %)	-0,1 (-0,3 %)
	2	32	2,0	0,8 (39,1 %)	0,1 (0,7 %)	-0,9 (-4,7 %)	-0,2 (-1,2 %)
MJ1	Toutes	1052	2,5	0,2 (7,3 %)	0,0 (-0,1 %)	-0,2 (-0,9 %)	0,0 (0 %)
	1	461	2,6	0,6 (23,7 %)	0,3 (1,5 %)	-0,2 (-0,8 %)	0,1 (0,5 %)
	2	310	2,8	0,2 (7,5 %)	0,1 (0,3 %)	-0,2 (-0,7 %)	0,0 (-0,2 %)
	3	211	2,2	-0,5 (-20,7 %)	-0,5 (-2,0 %)	-0,1 (-0,5 %)	-0,1 (-0,3 %)
	4	70	2,2	-0,8 (-38,2 %)	-1,5 (-5,6 %)	-0,8 (-3,1 %)	-0,2 (-0,8 %)
MJ2	Toutes	1714	1,7	0,3 (19,5 %)	0,1 (0,4 %)	-0,3 (-1,6 %)	-0,1 (-0,4 %)
	1	770	0,5	-0,1 (-26,2 %)	0,2 (1,2 %)	0,3 (1,5 %)	-0,1 (-0,5 %)
	2	468	2,9	1,6 (55,6 %)	0,8 (3,8 %)	-1,2 (-5,8 %)	-0,4 (-2 %)
	3	444	2,3	-0,1 (-5,1 %)	-0,8 (-3,4 %)	-0,5 (-2,0 %)	0,2 (0,8 %)
	4	32	2,5	-0,8 (-32,8 %)	-2,4 (-10,4 %)	-0,4 (-1,8 %)	1,2 (5 %)
MS1	Toutes	746	2,5	0,3 (10,9 %)	-0,2 (-1 %)	-0,3 (-1,3 %)	0,2 (1,1 %)
	1	392	2,7	1,0 (36,3 %)	0,0 (-0,1 %)	-0,6 (-2,8 %)	0,4 (2,1 %)
	2	201	2,0	-0,7 (-37,0 %)	-0,1 (-0,4 %)	0,7 (3,4 %)	0,0 (0,1 %)
	3	137	2,8	-0,1 (-3,2 %)	-0,7 (-3,3 %)	-0,7 (-3,4 %)	-0,1 (-0,4 %)
MS2	Toutes	3155	1,6	-0,3 (-20,3 %)	-0,4 (-2,2 %)	-0,1 (-0,8 %)	0,0 (-0,2 %)
	1	1531	1,0	0,1 (9,5 %)	-0,1 (-0,4 %)	-0,3 (-1,6 %)	-0,1 (-0,7 %)
	2	918	1,6	-0,9 (-53,7 %)	-0,4 (-1,9 %)	0,3 (1,6 %)	-0,2 (-0,8 %)
	3	573	2,8	-0,3 (-10,5 %)	-1,1 (-5,3 %)	-0,4 (-1,9 %)	0,4 (1,9 %)
	4	133	2,4	-1,6 (-66,6 %)	-2,2 (-10,3 %)	-0,4 (-2,0 %)	0,2 (0,9 %)
MS6	Toutes	316	3,1	0,2 (5,4 %)	0,0 (0,0 %)	-0,1 (-0,5 %)	0,1 (0,3 %)
	1	196	3,2	0,4 (13,1 %)	-0,1 (-0,3 %)	-0,5 (-2,6 %)	0,0 (-0,1 %)
	2	77	3,6	0,5 (12,6 %)	0,5 (2,2 %)	0,4 (2,1 %)	0,4 (2,0 %)
	3	42	2,1	-1,4 (-68,5 %)	-0,6 (-2,6 %)	0,7 (3,3 %)	-0,2 (-1,2 %)
RB1	Toutes	64	6,2	-0,3 (-5,5 %)	-0,6 (-2,8 %)	-0,3 (-1,5 %)	-0,1 (-0,3 %)
	1	42	7,2	0,2 (3,4 %)	-0,4 (-1,7 %)	-0,5 (-2,7 %)	0,1 (0,3 %)
RC3	Toutes	176	4,3	0,7 (15,6 %)	0,2 (0,8 %)	-0,3 (-1,0 %)	0,2 (0,8 %)
	1	92	4,4	1,4 (31,1 %)	0,5 (1,9 %)	-0,7 (-2,7 %)	0,2 (0,7 %)
	2	47	3,5	-0,3 (-8,3 %)	0,3 (1,5 %)	0,6 (2,6 %)	0,0 (0,0 %)

Tableau 4. (suite et fin)

Code de végétation potentielle	Période	n	Accroissement en surface terrière, par période (m ² /ha)	Biais de l'accroissement en surface terrière (m ² /ha)	Biais de l'accroissement en surface terrière, par module (m ² /ha)		
					Accroissement diamétral	Mortalité	Recrutement
RE1		612	0,9	0,0 (-0,2 %)	0,0 (-0,1 %)	0,0 (-0,4 %)	0,0 (-0,3 %)
		284	1,0	0,2 (21,8 %)	0,1 (0,9 %)	-0,1 (-1,4 %)	0,0 (-0,1 %)
		208	1,1	-0,1 (-11,8 %)	0,0 (-0,3 %)	0,0 (0,5 %)	0,0 (-0,5 %)
		89	0,7	0,0 (-2,0 %)	-0,1 (-1,2 %)	0,0 (-0,4 %)	0,1 (0,6 %)
		31	0,0	0,0 (na)	-0,5 (-4,9 %)	0,2 (2,4 %)	-0,4 (-3,7 %)
RE2		2787	1,6	-0,1 (-6,3 %)	-0,2 (-0,9 %)	-0,1 (-0,4 %)	0,0 (-0,1 %)
		1257	1,2	0,0 (4,1 %)	0,0 (0,0 %)	-0,1 (-0,6 %)	-0,1 (-0,3 %)
		954	1,9	-0,3 (-16,1 %)	-0,2 (-1,1 %)	0,0 (0,3 %)	-0,1 (-0,4 %)
		407	2,4	0,2 (8,4 %)	-0,2 (-1,3 %)	-0,3 (-1,4 %)	0,2 (1,0 %)
		169	0,8	-0,8 (-95,0 %)	-0,9 (-5,2 %)	-0,1 (-0,7 %)	0,0 (0,0 %)
RE3		1133	0,5	0,2 (31,3 %)	0,0 (0,0 %)	-0,1 (-1,1 %)	0,0 (0,2 %)
		486	0,1	-0,1 (-60,1 %)	-0,1 (-0,5 %)	-0,1 (-0,6 %)	-0,1 (-0,5 %)
		411	0,8	0,3 (38,0 %)	0,1 (0,9 %)	-0,1 (-1,0 %)	0,1 (0,7 %)
		155	0,9	0,4 (47,1 %)	0,1 (0,9 %)	-0,2 (-1,7 %)	0,1 (0,9 %)
		81	0,4	0,1 (16,0 %)	-0,4 (-3,7 %)	-0,4 (-4,2 %)	0,0 (0,1 %)
RP1		254	2,6	0,0 (-0,2 %)	0,3 (1,1 %)	0,0 (0,0 %)	-0,3 (-1,2 %)
		121	1,7	0,0 (-2,3 %)	0 (-0,1 %)	0,0 (0,0 %)	0,0 (-0,1 %)
		66	5,1	1,2 (22,9 %)	1,5 (5,6 %)	-0,2 (-0,7 %)	-0,6 (-2,0 %)
		66	1,9	-1,1 (-59,1 %)	-0,3 (-1,1 %)	0,2 (0,7 %)	-0,6 (-2,1 %)
RS1		526	2,5	0,2 (9,8 %)	0,0 (-0,1 %)	-0,3 (-1,1 %)	0,0 (-0,1 %)
		250	1,7	0,1 (3,4 %)	0,2 (0,7 %)	0,1 (0,5 %)	0,0 (0,1 %)
		160	3,2	0,8 (24,0 %)	0,0 (-0,1 %)	-0,9 (-3,5 %)	-0,1 (-0,4 %)
		97	3,5	0,5 (13,7 %)	-0,1 (-0,2 %)	-0,3 (-1,2 %)	0,2 (0,7 %)
RS2		2824	0,9	-0,1 (-5,7 %)	-0,3 (-1,8 %)	-0,2 (-1 %)	0,1 (0,5 %)
		1298	0,5	0,1 (21,8 %)	-0,1 (-0,4 %)	-0,2 (-1,2 %)	0,0 (-0,2 %)
		879	1,5	0,1 (4,3 %)	-0,2 (-1,0 %)	-0,2 (-1,1 %)	0,1 (0,3 %)
		492	1,1	0,1 (-39,1 %)	-0,9 (-5,0 %)	0,1 (0,3 %)	0,6 (2,9 %)
		155	0,5	-0,9 (-177,1 %)	-1,4 (-7,8 %)	-0,4 (-2,4 %)	0,1 (0,5 %)
RS3		454	0,7	-0,1 (-8,1 %)	-0,4 (-2,8 %)	-0,4 (-2,9 %)	-0,1 (-0,4 %)
		196	0,0	0,0 (na)	-0,1 (-0,7 %)	-0,1 (-0,4 %)	-0,1 (-0,9 %)
		145	0,8	0,1 (16,6 %)	-0,3 (-2,3 %)	-0,5 (-3,6 %)	-0,3 (-2,3 %)
		91	1,8	0,2 (13,7 %)	-1,0 (-7,3 %)	-0,8 (-6,1 %)	0,4 (3,0 %)
RS5		141	3,9	-0,1 (-3,0 %)	-0,5 (-2,0 %)	-0,3 (-1,1 %)	0,1 (0,4 %)
		71	3,7	-0,2 (-5,3 %)	-0,4 (-1,6 %)	-0,3 (-1,2 %)	-0,1 (-0,4 %)
		47	3,9	-0,2 (-6,0 %)	-0,3 (-1,4 %)	0,2 (0,9 %)	0,3 (1,3 %)
RT1		133	2,9	-0,5 (-15,8 %)	-0,5 (-1,6 %)	-0,2 (-0,5 %)	-0,1 (-0,3 %)
		65	2,3	-0,9 (-40,1 %)	-0,6 (-1,9 %)	0,2 (0,6 %)	-0,1 (-0,4 %)
		33	4,6	0,6 (13,0 %)	-0,2 (-0,6 %)	-1,0 (-2,8 %)	-0,2 (-0,6 %)

Tableau 5. Biais de l'accroissement en surface terrière totale par période et par module d'Artémis-2014 pour les peuplements avec coupe partielle. Les valeurs relatives sont indiquées entre parenthèses. Les codes des végétations potentielles sont définis au tableau 1.

Code de végétation potentielle	Période	n	Accroissement en surface terrière, par période (m ² /ha)	Biais de l'accroissement en surface terrière (m ² /ha)	Biais de l'accroissement en surface terrière, par module (m ² /ha)		
					Accroissement diamétral	Mortalité	Recrutement
FE2	Toutes	135	4,6	0,2 (4,2 %)	-0,2 (-1 %)	-0,1 (-0,5 %)	0,3 (1,5 %)
	1	89	4,3	-0,1 (-3,1 %)	-0,2 (-1,1 %)	0,0 (0,0 %)	0,2 (1,1 %)
	2	36	6,2	1,3 (20,9 %)	-0,2 (-0,9 %)	-0,9 (-3,9 %)	0,6 (2,6 %)
FE3	Toutes	333	3,9	0,2 (4,6 %)	0,0 (0,0 %)	-0,1 (-0,5 %)	0,1 (0,5 %)
	1	229	3,1	-0,4 (-11,3 %)	-0,2 (-1,1 %)	0,1 (0,6 %)	-0,1 (-0,6 %)
	2	80	5,8	1,1 (19,2 %)	0,3 (1,4 %)	-0,6 (-2,8 %)	0,2 (0,9 %)
MJ1	Toutes	221	4,3	0,3 (6,3 %)	-0,3 (-1,8 %)	0,2 (1,2 %)	0,8 (4,8 %)
	1	144	3,1	-0,6 (-18,8 %)	-0,3 (-2,0 %)	0,5 (3,3 %)	0,3 (2,0 %)
	2	60	6,3	1,9 (29,9 %)	-0,3 (-1,5 %)	-0,4 (-2,1 %)	1,8 (9,3 %)
MJ2	Toutes	200	3,8	0,1 (3,0 %)	0,0 (0,0 %)	-0,1 (-0,6 %)	0,0 (0,0 %)
	1	143	3,3	0,1 (1,8 %)	0,0 (0,0 %)	0,0 (0,0 %)	0,1 (0,7 %)
	2	46	4,9	0,0 (0,6 %)	-0,1 (-0,6 %)	-0,6 (-3,7 %)	-0,5 (-3,1 %)
MS1	Toutes	104	5,2	0,7 (12,8 %)	0,0 (0,0 %)	0,0 (0,0 %)	0,6 (3,7 %)
	1	70	4,3	0,2 (3,8 %)	0,1 (0,7 %)	0,3 (2,1 %)	0,3 (2,1 %)
MS2	Toutes	282	4,7	0,0 (0,1 %)	-0,4 (-3,1 %)	-0,1 (-1,1 %)	0,3 (2,1 %)
	1	197	3,9	-0,3 (-7,8 %)	-0,2 (-1,7 %)	0,1 (0,6 %)	0,0 (-0,3 %)
	2	66	6,6	0,8 (12,2 %)	-0,6 (-3,4 %)	-0,4 (-2,7 %)	0,9 (5,6 %)
RE2	Toutes	61	3,5	-0,6 (-16,3 %)	0,1 (0,9 %)	-0,2 (-1,9 %)	-0,8 (-8,0 %)
	1	45	3,5	-0,4 (-10,1 %)	0,5 (4,3 %)	-0,2 (-1,9 %)	-1,0 (-9,4 %)
RS2	Toutes	119	4,0	1,4 (34,7 %)	0,2 (1,4 %)	0,1 (1,0 %)	1,3 (12,9 %)
	1	77	2,9	0,8 (26,0 %)	0,2 (2,4 %)	0,2 (2,4 %)	0,7 (8,3 %)

3. Discussion

Pour la majorité des végétations potentielles, les prévisions de la surface terrière par les modèles Artémis-2009 et Artémis-2014 présentent une précision et une exactitude relativement semblables. Ce résultat n'est pas étonnant, puisque les deux modèles partagent la même architecture et environ 75 % du jeu de données ayant servi à leur paramétrage. Cependant, l'ajout de données a permis d'évaluer Artémis-2014 avec une plus grande profondeur temporelle. Ce plus grand nombre de mesurages et de conditions de croissance échantillonnées devrait aussi rendre le modèle 2014 plus robuste, particulièrement pour les peuplements ayant subi une coupe partielle, pour lesquels l'ajout de données a été proportionnellement plus important. De plus, l'utilisation de moyennes climatiques plus récentes devrait rendre Artémis-2014 mieux adapté à produire des simulations dans le contexte climatique actuel.

Cependant, il faudra être prudent avec les simulations concernant les végétations potentielles sur lesquelles la surface terrière est surestimée, même faiblement, puisque les rendements prédits par le modèle risquent d'être légèrement surestimés à leur tour. Cette surestimation du modèle s'observe surtout dans les peuplements de résineux et est étroitement associée à une surestimation de la surface terrière en sapin baumier, possiblement à cause des effets de la TBE.

Les biais plus importants d'Artémis-2014 associés aux végétations potentielles MS2, RE1, RE2 et RS2 peuvent s'expliquer de plusieurs façons. Premièrement, notons le faible nombre d'intervalles de croissance associés à la végétation potentielle RE1. Deuxièmement, pour les végétations potentielles RE2 et RS2, les placettes-échantillons mesurées à la période 4, la plus biaisée, sont concentrées dans les domaines bioclimatiques de la

pessière à mousses et de la pessière à lichens et ne représentent pas bien l'aire de répartition de ces deux végétations potentielles. En effet, on retrouve 70 % des mesurages de la période 4 pour les végétations potentielles RE2 et RS2 dans ces deux domaines, alors qu'en réalité, ceux-ci ne représentent que 56 % des placettes-échantillons permanentes de la végétation potentielle RE2 et moins de 50 % de celles de la végétation potentielle RS2. Troisièmement, pour la végétation potentielle MS2, le biais plus important pourrait être attribuable à l'épidémie de TBE. En effet, on voit apparaître un biais particulièrement grand pour le sapin baumier à la période 2 de la simulation. Celle-ci compte une majorité (80 %) d'intervalles de croissance durant l'épidémie de TBE qui a sévi au Québec dans les années 1970 et 1980 (Gray *et al.* 2000). Cette hypothèse est soutenue par l'examen des biais par module, qui montre que le modèle sous-estime la mortalité et surestime l'accroissement diamétral pendant cette période (Tableau 4). La surestimation de l'accroissement diamétral se poursuit dans les périodes suivantes, mais pourrait découler en partie de cette sous-estimation de la mortalité à la période 2. Les placettes ayant subi plus de 4 années de défoliations sévères avaient été identifiées au préalable à l'aide des relevés aériens de la DPF, afin de tenir compte de l'effet de la TBE sur la mortalité, la croissance et le recrutement dans ces placettes. Malgré tout, une certaine imprécision est associée à la localisation des défoliations sévères, puisque celles-ci sont identifiées du haut des airs, lors de survols du territoire. De plus, plusieurs années de défoliations légères ont pu ralentir la croissance de certaines placettes et conduire à des surfaces terrières plus faibles que celles prédites par le modèle. Pour Artémis-2014, l'ajout de nouveaux intervalles de croissance dans une période avec une faible présence de la TBE a pu accentuer le biais qui était déjà perceptible dans la version 2009.

L'erreur quadratique moyenne a augmenté et la valeur du R^2 a diminué dans la version 2014 d'Artémis comparativement à la version 2009, pour l'ensemble des périodes de croissance. Ces différences peuvent être attribuées à l'augmentation de la proportion d'intervalles de croissance dans les périodes 2, 3 et 4. Étant donnée la méthode d'évaluation du modèle, la mesure de départ d'une période de simulation correspond au résultat de la simulation de la période précédente et non à la mesure réelle de la période, sauf pour la première période. Conséquemment, plus on s'éloigne de la période initiale, moins le lien entre les résultats de simulation et les valeurs mesurées est

garanti. Ainsi, plus la période de simulation s'éloigne de la période initiale, moins les résultats de simulations sont précis, et plus leur biais risque d'être important.

Naturellement, les biais relatifs de l'accroissement en surface terrière (Tableaux 4 et 5) sont plus grands que ceux de la surface terrière elle-même (Tableaux 2 et 3). En effet, lors de son calcul, le biais relatif est mis en relation avec la variable analysée. La valeur élevée des biais relatifs de l'accroissement en surface terrière s'explique par le fait que les valeurs d'accroissement en surface terrière sont environ 10 fois moindres que celles de la surface terrière totale, pour un biais absolu du même ordre de grandeur. Les biais de l'accroissement en surface terrière sont parfois grands lorsqu'on regarde une période précise, mais tendent à diminuer pour la moyenne des périodes d'observation, particulièrement pour les végétations potentielles feuillues.

L'examen des biais par module permet d'expliquer et de souligner les faiblesses du modèle. Ainsi, la surestimation systématique de la mortalité dans Artémis-2014 est sans doute un premier point à noter. Bien que cette surestimation soit assez faible (généralement inférieure à 1 % de la surface terrière en moyenne pour la période d'évaluation), elle a sans doute des conséquences sur le comportement à long terme du modèle. Ainsi, l'apparition ou l'augmentation d'un biais de la surface terrière dû à l'accroissement diamétral pourrait en partie s'expliquer par une surestimation initiale de la mortalité. Pour les peuplements ayant des plus petites surfaces terrières prédites aux premières périodes à cause d'une surestimation de la mortalité, l'accroissement diamétral estimé risque d'augmenter pour les périodes suivantes, par rapport à des peuplements dont la surface terrière initiale est plus grande et dont l'accroissement diamétral sera ensuite limité par une plus grande compétition. Sans surprise, pour les peuplements n'ayant subi aucune coupe partielle, les plus grands biais semblent être causés par le module de mortalité. D'emblée, on reconnaît que la mortalité est un phénomène difficile à capturer et complexe à modéliser (Weiskittel *et al.* 2011). Parmi les sources d'erreur pouvant influencer la performance du module de mortalité, notons l'identification des peuplements touchés par les épidémies d'insectes ou des maladies ainsi que la prise en compte d'événements climatiques d'amplitude hors de l'ordinaire comme des sécheresses prolongées en période de croissance (Adams *et al.* 2009). La performance du

module de mortalité pourrait être bonifiée par une cartographie plus précise des dommages causés par les insectes et maladies ainsi qu'une prise en compte du climat à l'échelle annuelle. À la dernière période d'observation, les végétations potentielles MS2, RE1, RE2, RS2 présentaient un fort biais à la fois pour la surface terrière totale et pour l'accroissement diamétral. Pour les végétations potentielles RE2 et RS2, la répartition des échantillons pour cette période pourrait expliquer ce biais. Pour la végétation potentielle MS2, une analyse du biais de l'accroissement diamétral a montré une forte corrélation ($p < 0,001$) entre cette variable et le changement en surface terrière du peuplement. Pour les peuplements dont la surface terrière diminuait, le modèle surestimait fortement l'accroissement diamétral. De plus, le biais de l'accroissement diamétral montrait une légère corrélation positive avec la surface terrière en sapin ($p = 0,02$). Il se pourrait alors qu'Artémis-2014 puisse difficilement représenter la sénescence des peuplements de sapin de cette végétation potentielle.

4. Conclusion

Le modèle de croissance Artémis-2014 s'inscrit dans la continuité d'Artémis-2009. L'ajout de plusieurs intervalles de croissance, notamment à la suite d'une coupe partielle, et la légère diminution du biais de la surface terrière permettent d'améliorer la robustesse du modèle ainsi que sa capacité à représenter l'évolution des peuplements forestiers du Québec. Dans les peuplements de résineux et ceux de résineux à feuillus intolérants, des biais négatifs significatifs sont obtenus pour certaines végétations potentielles (MS2, RE2, RS2) et pourraient influencer les simulations à long terme. L'utilisateur devra donc interpréter avec précaution les prévisions à long terme ou choisir un modèle plus robuste dans ces types de peuplements. À ce sujet, des travaux futurs compareront la performance des modèles Artémis et Natura (Pothier et Auger 2011) dans différentes situations de simulation. Ce travail permettra de dégager des lignes directrices pouvant orienter l'utilisateur selon ses besoins. Grâce au suivi continu du réseau des placettes-échantillons permanentes de la DIF, Artémis pourra être mis à jour périodiquement, ce qui améliorera ses capacités à bien représenter l'ensemble des conditions de croissance, spécialement sur les végétations potentielles peu échantillonnées.

Remerciements

Cette étude a été réalisée dans le cadre du projet interne n° 142332123 de la Direction de la recherche forestière du ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs. L'auteur tient à remercier Mme Isabelle Auger (DRF) pour ses conseils lors du paramétrage du modèle Artémis-2014 et la révision du document, les Drs Jean-Pierre Saucier et Nelson Thiffault (DRF), Mme Denise Tousignant (DRF) et deux évaluateurs anonymes pour la révision du document, ainsi que le Dr Mathieu Fortin (AgroParisTech/INRA) pour les paramètres du modèle Artémis-2009. Il remercie aussi Mmes Nathalie Langlois et Maripierre Jalbert (DRF) pour la mise en page et le graphisme du document.

Références

- Adams, H.D., M. Guardiola-Claramonte, G.A. Barron-Gafford, J.C. Villegas, D.D. Breshears, C.B. Zou, P.A. Troch et T.E. Huxman, 2009. *Temperature sensitivity of drought-induced tree mortality portends increased regional die-off under global change-type drought*. PNAS 106: 7063–7066.
- Akaike, H., 1973. *Information theory as an extension of the maximum likelihood principle*. Second international symposium on information theory. Tsahkadsor, Arménie (U.R.S.S.), 2 au 8 septembre 1971. Budapest : Akademiai Kiado. p. 267–281.
- Auger, I., M. Fortin, D. Pothier et J.P. Saucier, 2011. *Une nouvelle génération de modèles de prévision pour les forêts du Québec*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Direction de la recherche forestière. Avis de recherche forestière n° 32. 2 p. [<https://www.mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Auger-Isabelle/Avis32.pdf>]
- [BFC] Bureau du forestier en chef, 2013. *Manuel de détermination des possibilités forestières 2013–2018*. Gouvernement du Québec, Bureau du forestier en chef. 247 p. [<http://forestierenchef.gouv.qc.ca/documents/calcul-des-possibilites-forestieres/2013-2018/manuel-de-determination-des-possibilites-forestieres/>]
- Cauboue, M., W.L. Strong, L. Archambeault et R.A. Sims, 1996. *Terminologie de la classification écologique des terres au Canada*. Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts, Centre de foresterie des Laurentides. Rapport d'information LAU-X-114. 128 p.

- [DIF] Direction des inventaires forestiers, 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. [<https://www.mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/Reseaux-PEP.pdf>]
- Dixon, G.E., 2002. *Essential FVS : A user's guide to the forest vegetation simulator*. U.S.D.A. Forest Service. Forest Management Service Center, Fort Collins, CO (États-Unis). 246 p. [www.fs.fed.us/fmfc/ftp/fvs/docs/gtr/EssentialFVS.pdf]
- Efron, B. et G. Gong, 1983. *A leisurely look at the bootstrap, the jackknife and cross-validation*. *Am. Stat.* 37: 36–48.
- 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: 129–138.
- 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. 68 p. [<https://www.mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Fortin-Mathieu/Memoire156.pdf>]
- Fortin, M. et L. Langevin, 2012. *Stochastic or deterministic single-tree models: is there any difference in growth predictions?* *Ann. For. Sci.* 69: 271–282.
- Gray, D.R., J. Régnière et B. Boulet, 2000. *Analysis and use of historical patterns of spruce budworm defoliation to forecast outbreak patterns in Quebec*. *For. Ecol. Manage.* 127: 217–231.
- Jobidon, R., P. Bernier et al., 2004. *Rapport du comité scientifique chargé d'examiner le calcul de la possibilité forestière*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles, de la Faune et des Parcs, Direction de la recherche forestière. 109 p. [<ftp://ftp.mrn.gouv.qc.ca/Public/Bibliointer/Mono/2011/10/0794453.pdf>]
- Landsberg, J., 2003. *Modelling forest ecosystems: state of the art, challenges, and future directions*. *Can. J. For. Res.* 33(3): 385–397.
- 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. [www.mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Auger-Isabelle/Memoire163.pdf]
- Pothier, D. et D. Mailly, 2006. *Stand-level prediction of balsam fir mortality in relation to spruce budworm defoliation*. *Can. J. For. Res.* 36: 1631–1640.
- Régnière, J., R. Saint-Amant et A. Béchar, 2014. *BioSIM 10 - User's Manual*. Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts, Centre de foresterie des Laurentides. Rapport d'information LAU-X-137E. [<http://cfs.nrcan.gc.ca/publications?id=34818>]
- Stage, A.R., 2003. *How forest models are connected to reality: evaluation criteria for their use in decision support*. *Can. J. For. Res.* 33: 410–421.
- Weiskittel, A.R., D.W. Hann, J.A. Kershaw et J.K. Vanclay, 2011. *Forest growth and yield modeling*. John Wiley and sons Ltd., Oxford, Angleterre (Royaume-Uni). 415 p.

Annexe 1. Sommaire de la méthodologie employée pour paramétrer Artémis-2009 et Artémis-2014.

	Artémis-2009	Artémis-2014
Données	21 683 intervalles de croissance provenant de mesures de placettes-échantillons permanentes réparties à travers la forêt commerciale québécoise.	27 563 intervalles de croissance provenant de mesures de placettes-échantillons permanentes réparties à travers la forêt commerciale québécoise
Identification de la tordeuse des bourgeons de l'épinette	Grille Romer issue des survols aériens par la Direction de la protection des forêts.	Cartographie numérique issue des survols aériens par la Direction de la protection des forêts.
Données climatiques	Normales 1971–2000 issues du logiciel BioSIM.	Normales 1981–2010 issues du logiciel BioSIM.
Module de mortalité	Régression logistique avec distribution binaire.	Régression logistique avec distribution binaire.
Module d'accroissement	Régression linéaire mixte avec effets aléatoires de placette et d'intervalle, et structure de corrélation log-linéaire.	Régression linéaire mixte avec effets aléatoires de placette et d'intervalle, et structure de corrélation log-linéaire ou puissance.
Module recrutement	Modèle linéaire généralisé (glm) avec distributions binaire, bêta et gamma.	Modèle linéaire généralisé (glm) avec distributions binaire, bêta et gamma.

Annexe 2. Liste des variables explicatives utilisées par Artémis-2009 et Artémis-2014.

Variables	Artémis-2009	Artémis-2014
Altitude de la placette (m)	X	X
Présence d'une coupe partielle dans l'intervalle de croissance	X	X
Présence d'une coupe partielle dans l'intervalle précédent l'intervalle de croissance	X	X
Diamètre à hauteur de poitrine (en cm, mesuré à une hauteur de 1,3 m)	X	X
Variable binaire permettant de modifier l'effet de la variable « précipitations » pour les arbres d'essence SAB*	X	X
Groupe d'espèces auquel appartient l'arbre	X	X
Logarithme naturel de la durée de l'intervalle de croissance	X	X
Logarithme naturel de la durée séparant l'année de fin de l'intervalle de croissance et l'année 1995. Cette variable permet de différencier les érables à sucre et les bouleaux ayant subi un dépérissement dans les années 1980.	X	X
Diamètre moyen quadratique (cm)	X	X
Nombre d'arbres de plus de 9 cm de DHP dans la placette	X	X
Nombre d'arbres par groupe d'espèces dans la placette	X	X
Précipitations annuelles totales moyennes (normale sur 30 ans)	X	X
Surface terrière par essence (m ² /ha)	X	X
Somme de la surface terrière des arbres de la placette possédant un DHP plus grand que l'arbre en question (m ² /ha)	X	X
Proportion de la surface terrière attribuable à chacune des espèces	-	X
Surface terrière de la placette (m ² /ha)	X	X
Variable binaire pour les arbres des espèces SAB* et EPX**, indiquant soit la présence de défoliations sévères dues à la tordeuse des bourgeons de l'épinette pendant au moins 4 années consécutives, dans l'intervalle de croissance courant ou dans l'intervalle suivant.	X	X
Température annuelle moyenne de la placette (normale sur 30 ans)	X	X
Variable binaire indiquant qu'aucune tige de l'espèce n'est présente dans la placette.	-	X

* SAB : sapin baumier

** EPX : épinette noire, épinette blanche, épinette rouge, épinette de Norvège.



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

**Forêts, Faune
et Parcs**

Québec 

ISSN 0834-4833
ISBN : 978-2-550-75326-1
ISBN (PDF) : 978-2-550-75327-8
G.F.D.C. 521.62--015 (714)
L.C. SD 553
Dépôt légal 2016
Bibliothèque nationale du Québec
© 2016 Gouvernement du Québec