

Capacité des modèles SaMARE et Artémis à simuler l'évolution des peuplements après une coupe de jardinage pratiquée dans un contexte opérationnel

Martin-Michel Gauthier, François Guillemette¹, Hugues Power et Filip Havreljuk

Résumé

Nous avons évalué les biais et les erreurs des prévisions de 3 modèles de simulation forestière, SaMARE-2006, Artémis-2009 et Artémis-2014, pour la surface terrière marchande et l'accroissement annuel net en surface terrière des arbres. L'analyse a porté sur des placettes ayant été traitées ou non par une coupe de jardinage pratiquée dans un contexte opérationnel dans des forêts de feuillus du Québec. Les 3 modèles ont généralement bien simulé l'évolution de la surface terrière marchande pour une période de 10 ans après la coupe. Toutefois, les biais associés à l'accroissement net en surface terrière étaient parfois importants par rapport aux seuils de tolérance proposés ($0,05 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$, ou 5 % en valeur relative), particulièrement pour les placettes témoins. Ces biais importants s'expliquent en bonne partie par des difficultés à simuler le recrutement et la mortalité, particulièrement dans le cas des peuplements dominés par le bouleau jaune (*Betula alleghaniensis* Britt.) ou ceux ayant subi un chablis majeur en 2006. Dans l'ensemble, ces résultats indiquent que les modèles Artémis-2014 et SaMARE-2006 fournissent des prévisions plus plausibles qu'Artémis-2009, mais font aussi ressortir des pistes d'amélioration pour pallier les principales faiblesses de ces modèles.

Mots clés : Artémis, biais en modélisation, érablière, mortalité, recrutement, SaMARE

Abstract

*We evaluated the prediction bias and error of 3 forest growth models, SaMARE-2006, Artémis-2009, and Artémis-2014, for simulations of merchantable basal area and net basal area increment in northern hardwood forests of Quebec. The analysed data included untreated (control) plots and others treated by an operational selection cutting. Results show that all 3 models simulated merchantable basal area quite well for the first 10 years after cutting. However, for simulations of net basal area increment, biases were often high compared to proposed tolerance thresholds ($0.05 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$, or a relative value of 5%), particularly in untreated control plots. High prediction biases can be explained by difficulties in simulating tree ingrowth and mortality, especially in stands dominated by yellow birch (*Betula alleghaniensis* Britt.) or in those affected by a catastrophic windthrow event in 2006. Overall, Artémis-2014 and SaMARE-2006 performed relatively well, with lower prediction biases than Artémis-2009. Results also highlight areas of improvement for all 3 models.*

Keywords: forest modelling, modelling biais, mortality, tree ingrowth, sugar maple stands

¹ Correspondance : francois.guillemette@mffp.gouv.qc.ca



1. Introduction

Les modèles de simulation sont utilisés en foresterie afin de prédire l'évolution des forêts à l'échelle de l'arbre ou du peuplement. Étant donné l'immensité du territoire forestier du Québec, le temps et les coûts importants associés au suivi à long terme des peuplements, la modélisation est un outil essentiel qui compte plusieurs avantages. Entre autres, elle facilite la prise de décision lors du calcul des possibilités forestières et de la planification opérationnelle des activités d'aménagement (p. ex. : *Spatial Woodstock*, Remsoft 2008; *Forest Vegetation Simulator*, Dixon 2002). La modélisation permet aussi d'améliorer les connaissances sur la croissance et le rendement des peuplements et de tester l'effet de nouveaux traitements sylvicoles (p. ex. SORTIE BC, Coates et al. 2003). Récemment, les modèles SaMARE (version 2006, Fortin et al. 2009a), Artémis-2009 (Fortin et Langevin 2010) et Artémis-2014 (Power 2016) ont été élaborés afin de simuler l'évolution des peuplements forestiers du Québec. Ces modèles permettent, entre autres, de simuler les effets des traitements sylvicoles sur les arbres d'un peuplement forestier. Les 3 modèles génèrent des prévisions à l'échelle de l'arbre, mais Artémis est considéré comme un modèle de prévision à l'échelle stratégique. Il est généralement utilisé à des fins de planification à une échelle assez large (p. ex. celle du paysage ou de l'unité d'aménagement). SaMARE est un modèle de prévision à l'échelle opérationnelle dont l'utilisation est généralement réservée à une échelle un peu plus fine, comme celle d'un peuplement dans lequel on souhaite évaluer les effets de différentes modalités de coupes partielles. De plus, SaMARE a été étalonné spécifiquement pour les érablières.

Ces percées récentes dans le domaine de la modélisation sont particulièrement intéressantes pour la forêt de feuillus, puisque le produit de chaque arbre est très variable et grandement influencé par la qualité, le diamètre et l'essence (Fortin et al. 2009b). De plus, les peuplements de feuillus ont des réactions très variables à la coupe de jardinage (Bédard et Majcen 2001). Malgré l'amélioration des possibilités de modélisation en forêt de feuillus, les modèles SaMARE et Artémis n'ont jamais été comparés directement afin d'évaluer leurs différences pour modéliser le développement de ces peuplements de feuillus. La Direction de la recherche forestière a acquis des données à long terme sur les effets réels de la coupe de jardinage pratiquée dans un contexte opérationnel en forêt de feuillus (Guillemette et al. 2013). Ce jeu indépendant de données, qui comprend

des placettes traitées et témoins, offre une bonne occasion de comparer SaMARE et les deux versions d'Artémis entre eux et d'évaluer le modèle SaMARE dans certains types de peuplements pour lesquels il n'a pas été étalonné, notamment les bétulaies jaunes et les bétulaies jaunes résineuses.

Les objectifs principaux de cette étude sont donc les suivants : 1) évaluer les biais et erreurs des prévisions pour la surface terrière marchande et l'accroissement net des 3 modèles dans des placettes traitées ou non avec une coupe de jardinage, et 2) évaluer l'évolution prédite des placettes traitées de ces mêmes variables sur 1 ou 2 rotations (20 ou 40 ans) à l'aide de SaMARE et d'Artémis. Pour chacun de ces objectifs, nous avons comparé les placettes traitées et témoins à 2 échelles : celle du groupe de peuplements (p. ex. : érablières de l'ouest de la province, bétulaies jaunes) et celle de la province. Un objectif complémentaire de cette étude était de juger du réalisme des prévisions des 3 modèles.

2. Matériel et méthodes

2.1 Base de données

Les données utilisées proviennent des 10 premières années de mesurage des effets réels de la coupe de jardinage opérationnelle en forêt de feuillus au Québec (Guillemette et al. 2013). Le dispositif comprend 943 placettes circulaires de 400 m² : 683 placettes traitées (TR) selon la pratique des coupes de jardinage au cours de la période 1995–1999, et 260 placettes témoins (TE), sans intervention. Les arbres ont été mesurés avant la coupe, après la coupe, ainsi que 5 et 10 ans après la coupe. Une analyse séparée de la surface terrière seulement a été faite à partir de 100 placettes (71 TR, 29 TE) remesurées sur une période de 18 ou 19 ans. Dans les placettes traitées, de 25 à 35 % de la surface terrière marchande a été récoltée, dans l'ensemble des classes de diamètre des arbres, de façon à augmenter légèrement la proportion des arbres de qualité. Les variables mesurées dans chaque placette et utilisées pour la simulation des 3 modèles sont : l'essence, le diamètre à hauteur de poitrine (DHP, mesuré à une hauteur de 1,3 m), l'état (p. ex. : vivant, mort, recrue) et le numéro de l'arbre.

Pour mieux détecter la présence de différences selon la composition des peuplements et leur situation géographique, nous avons regroupé les placettes *a posteriori* comme dans Guillemette et al. (2013), selon 3 critères : 1) la composition en essences, 2)

la région écologique et 3) les perturbations récentes. Les érablières (Er), dominées par l'érable à sucre (*Acer saccharum* Marsh.), ont été rassemblées dans 7 groupes (Tableaux 1 et 2). Deux groupes supplémentaires ont été créés pour les peuplements dominés par le bouleau jaune (*Betula alleghaniensis* Britt.), soit en peuplement de feuillus (Bj) ou mixte (BjR). Les détails des territoires d'étude et de toutes les mesures effectuées se trouvent dans Guillemette et al. (2013). Les placettes mesurées après 18 ou 19 ans provenaient principalement des érablières de l'ouest de la province, soit les groupes Er2a3aR07, Er3aR08, Er3b et Er4bc.

2.2 Modèles de simulation

SaMARE (version 2006) est un modèle stochastique de croissance à l'échelle de l'arbre et indépendant des distances entre les arbres, pour les érablières au Québec (Fortin et al. 2009a). Il simule d'abord la probabilité de mortalité de l'arbre; si l'arbre survit, il simule ensuite son accroissement diamétral et son changement de classe de vigueur. De plus, il simule le recrutement de nouveaux arbres dans le peuplement à partir de 9,1 cm au DHP. Plusieurs variables influencent la mortalité, l'accroissement et le recrutement du modèle (Fortin et al. 2009a). À l'échelle de l'arbre, les variables explicatives sont le DHP (cm), le groupe d'espèces (8 classes), la classe de vigueur (2 classes) et la classe de produits (2 classes). À l'échelle de la placette, les variables explicatives sont la surface terrière, toutes espèces confondues ($\text{m}^2\cdot\text{ha}^{-1}$), la densité, toutes espèces confondues ($\text{arbres}\cdot\text{ha}^{-1}$), la surface terrière d'un groupe d'espèces donné ($\text{m}^2\cdot\text{ha}^{-1}$), l'occurrence

d'une coupe de jardinage (oui/non), la température annuelle moyenne pour la période 1971–2000 ($^{\circ}\text{C}$), les précipitations annuelles moyennes pour la période 1971–2000 (mm) et la latitude ($^{\circ}\text{N}$). Les données climatiques proviennent du modèle BioSIM (Régnière et Saint-Amant 2008).

Fortin et al. (2009a) ont recommandé de regrouper les placettes d'un même peuplement afin d'obtenir une superficie échantillonnée d'au moins 800 m^2 , de façon à diminuer les biais pour le recrutement et la mortalité dans SaMARE. Toutefois, une analyse préliminaire (Voir annexe) a indiqué qu'un biais pouvait s'introduire avec le regroupement des placettes en grappes et entraîner une surestimation par rapport à la mesure observée. Par conséquent, nous avons retenu la méthode de simulation à l'échelle des placettes individuelles dans SaMARE pour cette étude.

Artémis-2009 est un modèle de croissance à l'échelle de l'arbre, indépendant des distances entre les arbres, et possédant des paramètres spécifiques pour les 25 végétations potentielles les plus courantes du Québec (Fortin et Langevin 2010, 2012). Ce modèle simule la probabilité de mortalité, l'accroissement diamétral et le recrutement de nouvelles tiges à l'aide de variables à l'échelle de l'arbre et du peuplement. À l'échelle de l'arbre, les variables explicatives sont : le groupe d'espèces (catégories variables selon la végétation potentielle), le DHP (cm) et la surface terrière des arbres dont le DHP est plus grand que le sujet ($\text{m}^2\cdot\text{ha}^{-1}$). À l'échelle de la placette, les variables explicatives sont : l'occurrence d'une coupe partielle dans l'intervalle actuel ou précédent (oui/non),

Tableau 1. Description des groupes de peuplements utilisés dans cette étude.

Groupe	Description
Er2a3aR07	Érablières des régions écologiques 2a (Collines de la basse Gatineau) et 3a (Collines de l'Outaouais et du Témiscamingue, mais situées en Outaouais seulement)
Er3aR08	Érablières de la région écologique 3a, mais situées au Témiscamingue seulement
Er3b	Érablières de la région écologique 3b (Collines du lac Nominique)
Er3c	Érablières de la région écologique 3c (Hautes collines du bas Saint-Maurice)
Er3d	Érablières de la région écologique 3d (Coteaux des basses Appalaches)
Er4bc	Érablières des régions écologiques 4b (Coteaux du réservoir Cabonga) et 4c (Collines du moyen Saint-Maurice)
Er4fgh	Érablières des régions écologiques 4f (Collines des moyennes Appalaches), 4g (Côte de la baie des Chaleurs) et 4h (Côte gaspésienne)
Bj	Bétulaies jaunes
BjR	Bétulaies jaunes résineuses

Tableau 2. Nombre de placettes, surface terrière marchande après 10 ans et accroissement annuel net décennal en surface terrière, pour les mesures observées ou simulées par les 3 modèles, par groupe et par traitement. Le groupe « province » contient aussi des prucheraies mélangées (14 placettes traitées et 3 placettes témoins) qui ne sont pas contenues dans les autres groupes présentés.

Traitement*	Groupe	Nombre de placettes	Surface terrière marchande (m ² .ha ⁻¹)			Accroissement annuel net (m ² .ha ⁻¹ .an ⁻¹)				
			Valeur observée	SaMARE	Artémis-2009	Artémis-2014	Valeur observée	SaMARE	Artémis-2009	Artémis-2014
TR	Er 2a3a R07	78	21,2	20,9	20,8	20,8	0,19	0,16	0,16	0,15
	Er 3a R08	149	18,8	20,0	19,7	19,7	0,09	0,20	0,17	0,18
	Er3b	88	21,0	21,0	20,9	21,1	0,19	0,18	0,18	0,19
	Er3c	80	21,4	21,9	21,6	22,0	0,21	0,26	0,25	0,27
	Er3d	25	25,2	24,5	24,6	24,8	0,33	0,26	0,28	0,29
	Er4bc	56	19,7	19,7	19,1	19,4	0,24	0,23	0,18	0,21
	Er4fgh	29	23,4	23,2	22,3	23,0	0,41	0,40	0,32	0,38
	Bj	82	19,8	18,8	18,8	18,7	0,22	0,12	0,12	0,11
TE	BjR	82	22,7	20,9	21,6	21,2	0,21	0,03	0,11	0,07
	Province	683	21,1	20,8	20,7	20,8	0,20	0,18	0,17	0,17
	Er 2a3a R07	24	30,4	28,6	29,4	29,7	0,10	-0,09	0,01	0,03
	Er 3a R08	42	24,4	25,9	26,2	26,9	-0,20	-0,05	0,01	0,05
	Er3b	34	29,2	28,7	29,6	29,9	-0,10	-0,15	-0,04	-0,03
	Er3c	33	29,9	30,4	30,7	31,5	-0,03	0,02	0,06	0,12
	Er3d	8	35,0	31,3	34,1	35,3	0,04	-0,34	-0,04	0,06
	Er4bc	23	29,3	27,6	27,5	28,4	0,21	0,03	0,04	0,12
TE	Er4fgh	24	34,5	31,6	31,8	32,7	0,35	0,05	0,09	0,16
	Bj	36	27,0	25,9	25,4	26,3	0,23	0,12	0,08	0,16
	BjR	33	28,2	24,4	26,4	27,1	0,14	-0,25	-0,04	0,03
	Province	260	29,0	27,7	28,4	29,1	0,07	-0,07	0,01	0,07

* TR : Placettes traitées; TE : placettes témoins.

la durée de l'intervalle (années), l'occurrence de défoliations sévères causées par la tordeuse des bourgeons de l'épinette (*Choristoneura fumiferana* Clem., oui/non), le diamètre moyen quadratique des arbres marchands de la placette (DHPq, cm), la densité des arbres marchands (arbres·ha⁻¹), la densité des arbres marchands du groupe d'espèces (arbres·ha⁻¹), la surface terrière marchande (m²·ha⁻¹), la température annuelle moyenne de la période 1971–2000 (°C) et les précipitations annuelles moyennes de la période 1971–2000 (mm). Ce modèle est utilisé depuis 2010 par le Bureau du forestier en chef afin d'effectuer le calcul des possibilités forestières des forêts du Québec.

La version 2014 d'Artémis partage la même architecture que la version 2009, mais possède son propre jeu de paramètres (Power 2016). La complétion du quatrième inventaire écoforestier du Québec méridional a permis d'augmenter de 25 % le nombre d'intervalles de croissance (périodes séparant 2 mesures consécutives) ayant servi à paramétrer Artémis-2014, par rapport à la version 2009.

Les simulations dans SaMARE et Artémis ont été effectuées en mode stochastique avec 250 réalisations de croissance pour chaque placette. Les 3 modèles sont disponibles sous la plateforme générique CAPSIS¹ (Dufour-Kowalski et al. 2012), utilisée par plusieurs modèles pour simuler la croissance et la dynamique des peuplements forestiers. L'interface graphique est conviviale et facile à utiliser.

2.3 Biais et erreurs

Comme l'ont proposé Fortin et Langevin (2010) et Fortin et al. (2009a), nous avons comparé les modèles sur la base du biais moyen (équation [1]) et de la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (REQM, équation [2]) :

$$\text{biais} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i) \quad [1]$$

$$\text{REQM} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad [2]$$

où y_i la valeur observée pour la placette i , $\hat{y}_i$ est la prévision pour la placette i et n est le nombre de placettes dans chaque groupe de placettes. Le biais relatif (%) a aussi été calculé en divisant le résultat de

l'équation [1] par la moyenne des valeurs observées à la même échelle que le biais. Un seuil de tolérance de 1,0 m²·ha⁻¹ pour le biais pour la surface terrière (5 % en valeur relative) est généralement utilisé afin d'évaluer les modèles (Fortin et Langevin 2010, Fortin et al. 2009a), ce qui correspond à un seuil de 0,05 m²·ha⁻¹·an⁻¹ sur une période de 20 ans pour l'accroissement annuel net en surface terrière marchande (AAN) (Guillemette et al. 2012). Un biais positif représente une sous-estimation par rapport à la mesure réelle, tandis qu'un biais négatif représente une surestimation. L'intervalle utilisé pour la REQM est généralement de 2 à 5 m²·ha⁻¹ (Fortin et Langevin 2010). Une REQM relative (%) a aussi été calculée en divisant le résultat de l'équation [2] par la moyenne des valeurs observées à la même échelle que le biais.

Afin d'expliquer les résultats de l'AAN, nous avons aussi calculé les biais et erreurs de ses autres composantes, c'est-à-dire l'accroissement des survivants (AAS), celui des recrues (AAR), l'accroissement annuel brut (AAB) et la mortalité annuelle périodique (MAP) (équations [3] et [4]).

$$AAB = AAS + AAR \quad [3]$$

$$AAN = AAB - MAP \quad [4]$$

Contrairement à Artémis, qui simule des périodes décennales, le modèle SaMARE simule des périodes quinquennales. Nous avons donc calculé l'AAN décennal de SaMARE directement à partir de la surface terrière marchande (ST pour les arbres dont le DHP > 9,0 cm) à l'aide de l'équation [5] :

$$(ST_{10\text{ans}} - ST_{\text{après coupe}})/10 \quad [5]$$

Puisque les autres composantes de l'AAN ne pouvaient pas être dérivées de cette façon dans SaMARE, nous les avons calculées pour la deuxième période quinquennale (5–10 ans) afin d'estimer le biais de l'AAN décennal. Nous avons préféré la période 5–10 ans à la période 0–5 ans pour 2 raisons : (1) elle correspond au moment où l'effet des traitements sylvicoles commence à être visible (p. ex. : par une augmentation de l'accroissement des survivants); (2) les biais et erreurs augmentent avec le temps, ce qui permet de mieux évaluer les composantes de l'AAN.

Afin d'approfondir la discussion des résultats pour l'AAR et la MAP, nous avons calculé des coefficients de corrélation de Pearson pour chaque combinaison de groupe de peuplements et de traitements. Les caractéristiques des peuplements utilisées dans les modules de recrutement et de mortalité ont été

¹ <http://capsis.cirad.fr/capsis/home>

corrélées avec la différence entre la valeur réelle d'une placette et la valeur simulée pour celle-ci par le modèle. Pour les placettes témoins, les caractéristiques du peuplement étaient la densité, la surface terrière marchande et le DHPq des arbres de la placette. Pour les placettes traitées, la surface terrière résiduelle et le prélèvement (%) ont été ajoutés. Nous avons aussi calculé des corrélations avec 2 variables climatiques utilisées dans les 3 modèles, soit la différence entre la température moyenne annuelle (T_{moy}) de la période décennale et la moyenne 30 ans (1971–2000) et la différence entre les précipitations totales annuelles (P_{tot}) de la période décennale et la moyenne 30 ans.

Finalement, afin de juger du réalisme des prévisions des 3 modèles, nous avons analysé à plus long terme la surface terrière marchande des placettes traitées par jardinage ainsi que la distribution diamétrale des arbres pour les horizons de 10 et de 40 ans.

3. Résultats

3.1 Biais et erreurs

3.1.1 Surface terrière marchande

Dans les placettes traitées, les biais des 3 modèles pour la surface terrière marchande après 10 années de croissance étaient généralement inférieurs aux seuils de tolérance fixés ($1,0 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$ en valeur absolue ou 5 % en valeur relative, figures 1a et 1b). Seuls les groupes Er3aR08 et BjR dépassaient ce seuil. Par ailleurs, pour les 3 modèles, les biais étaient plus grands dans les Bj et les BjR que dans la plupart des érablières. Les valeurs de REQM variaient de 2,9 à $5,4 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$ pour la période décennale et étaient les plus élevées pour les groupes Er3aR08, Bj et BjR (Figure 1e). À l'échelle de la province, les biais des 3 modèles étaient faibles, alors que les valeurs de REQM se situaient plutôt dans la moyenne.

Dans les placettes témoins, les valeurs des biais (Figure 1b) et des REQM (Figure 1f) étaient un peu plus élevées que dans les placettes traitées (Figure 1a et e). Avec SaMARE, 80 % des groupes avaient des biais supérieurs au seuil de tolérance de $1,0 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$ (Figure 1b), et 60 % des groupes avaient des biais relatifs supérieurs au seuil de 5 % (Figure 1d). Avec Artémis-2009, ces proportions étaient de 50 % des groupes dans les 2 cas, alors qu'avec Artémis-2014, 40 % des groupes dépassaient le seuil en valeur absolue (Figure 1b), et 30 % d'entre eux dépassaient

le seuil en valeur relative (Figure 1d). Malgré tout, les biais varient généralement de 1 à $2 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$ (de 5 à 10 % en valeur relative), ce qui est relativement près des seuils de tolérance.

Dans les 100 placettes remesurées sur près de 20 ans, les biais pour la surface terrière des 3 modèles étaient généralement inférieurs à $1,0 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$ (Figure 2a) en valeur absolue ou à 5 % en valeur relative (Figure 2b), surtout pour les placettes traitées. Artémis-2009 présentait le biais le plus grand pour les placettes traitées (Figure 2a, b). Seul le modèle SaMARE présentait des biais supérieurs aux seuils de tolérance pour les placettes témoins (Figure 2a, b), ce qui explique peut-être pourquoi la surface terrière marchande simulée avec SaMARE diminuait le plus dans le temps (Figure 2d).

3.1.2 Accroissement annuel net en surface terrière

Dans les placettes traitées, les biais et REQM relatifs pour l'AAN (Figure 3c et g) étaient généralement beaucoup plus grands que ceux pour la surface terrière (Figure 1c et g). Avec SaMARE, seulement la moitié des groupes avaient un biais inférieur à $0,05 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ (Figure 3a), et seuls les groupes Er3b, Er4bc et Er4fgh avaient un biais relatif de moins de 5 % (Figure 3c). Avec le modèle Artémis-2009, 40 % des groupes de placettes traitées avaient un biais inférieur à $0,05 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ (Figure 3a) et 10 % avaient un biais relatif inférieur au seuil de 5 % (Figure 3c). Avec Artémis-2014, 50 % des groupes de placettes traitées avaient un biais inférieur à $0,05 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ (Figure 3a) et 10 % avaient un biais relatif de moins de 5 % (Figure 3c). À l'instar des biais pour la surface terrière, les biais pour l'AAN dans les placettes traitées étaient plus grands dans les groupes Bj et BjR que dans la plupart des érablières, et ce, pour les 3 modèles (Figure 3a, c). Les valeurs de REQM variaient de 0,3 à $0,5 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ pour la période décennale (Figure 3e), c'est-à-dire jusqu'à 500 % en valeur relative (Figure 3g).

Dans les placettes témoins, les valeurs des biais et des REQM pour l'AAN étaient beaucoup plus grands (Figure 3b, d, f et h) que dans les placettes traitées (Figure 3a, c, e et g), et ce, pour les 3 modèles. Les valeurs des biais et REQM relatifs pour l'AAN étaient particulièrement élevées pour les placettes témoins des érablières 3d (Figure 3d et h). À l'échelle provinciale, les valeurs des biais et des REQM pour l'AAN des 3 modèles étaient assez similaires pour les placettes traitées (Figure 3a, c, e et g). Pour les

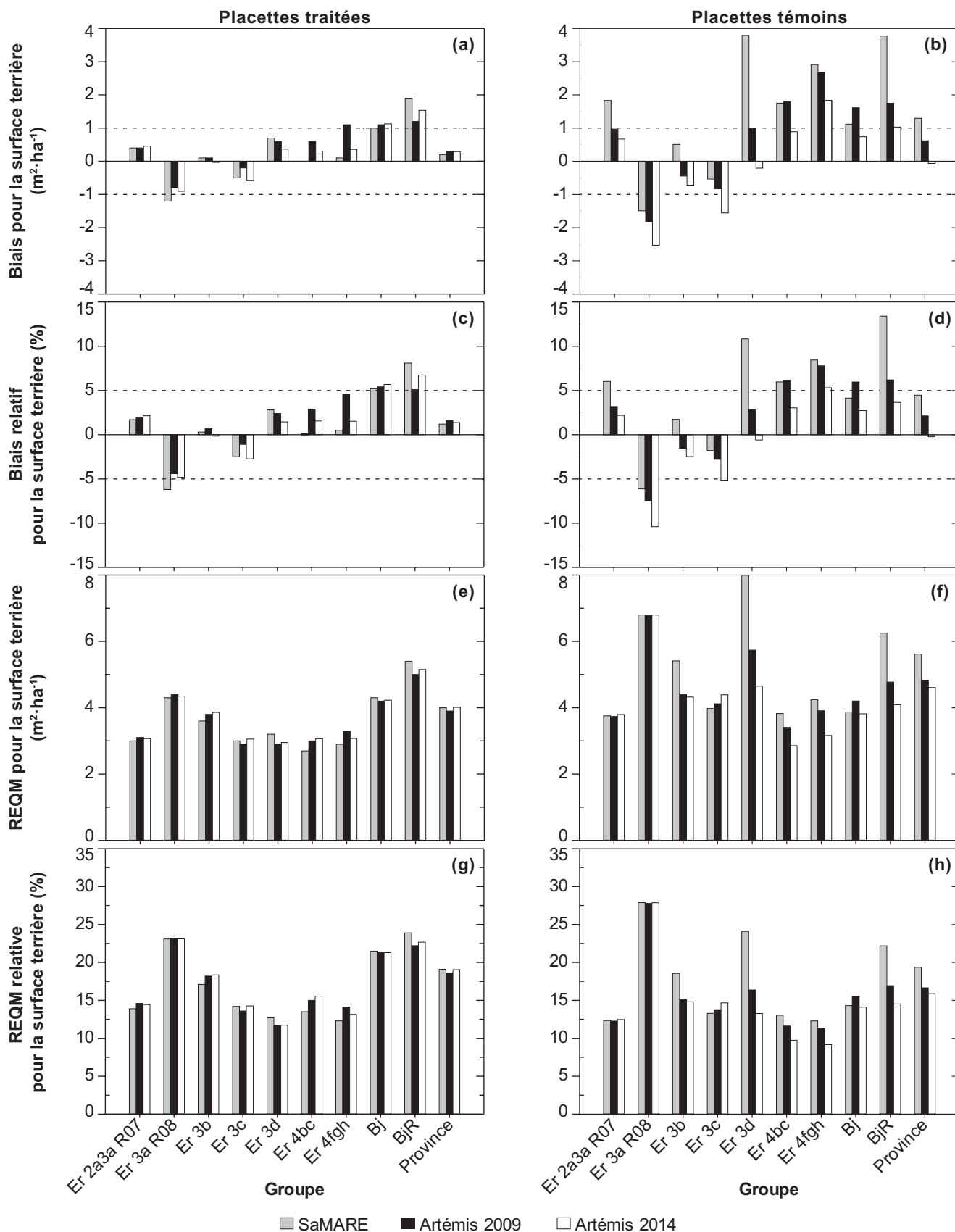


Figure 1. Biais (a, b), biais relatif (c, d), et racine de l'erreur quadratique moyenne (REQM) en valeur absolue (e, f) et relative (g, h) des modèles SaMARE, Artémis-2009 et Artémis-2014 pour la surface terrière marchande ($\text{m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$) dans les placettes traitées (à gauche) et les placettes témoins (à droite) d'une coupe de jardinage effectuée dans un contexte opérationnel. Les résultats sont présentés par groupe de peuplements et pour l'ensemble des placettes de la province, après un suivi de 10 ans. Les lignes pointillées horizontales représentent les seuils de tolérance des biais ($1,0 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$ en valeur absolue et 5 % en valeur relative).

placettes témoins, cependant, le biais d'Artémis-2009 ($0,05 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$) et, plus encore, celui d'Artémis-2014 ($-0,01 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$), étaient plus faibles que celui de SaMARE ($0,13 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$, figure 3b).

L'analyse des biais des prévisions d'Artémis-2009 à 10 ans par composante de l'AAN (Tableau 3) montre que les principaux biais provenaient d'une sous-estimation du recrutement, autant dans les placettes traitées que témoins (moyenne générale : $0,01 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ ou 20 %), puis d'une surestimation de la mortalité annuelle périodique dans les placettes témoins (moyenne de $-0,03 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ ou 8 %), sauf dans le groupe Er3aR08, associé au chablis de 2006. D'abord, le recrutement dans les placettes traitées a été sous-estimé de plus de 5 % dans 6 des 9 groupes, particulièrement ceux où le recrutement

était important : Bj, BjR, Er2a3aR07 et Er3aR08. Pour les groupes Bj et BjR, le recrutement provenait essentiellement du sapin baumier (*Abies balsamea* [L.] Mill.) dans les placettes ayant une végétation potentielle MJ1 (bétulaie jaune à sapin et érable à sucre) ou MJ2 (bétulaie jaune à sapin); la sous-estimation du recrutement est corrélée à des fortes valeurs de T_{moy} ($p < 0,001$ et $r = 0,44$ dans le groupe BjR; données non présentées) et à des faibles valeurs de P_{tot} ($p < 0,001$ et $r = -0,37$ dans le groupe BjR). Les autres caractéristiques des peuplements n'ont pas semblé avoir une influence importante sur le biais du recrutement dans les placettes traitées. Ensuite, la sous-estimation du recrutement dans les placettes témoins est corrélée à des fortes valeurs de T_{moy} dans certains groupes tels que Bj ($p = 0,04$, $r = 0,34$) et Er4bc ($p = 0,07$, $r = 0,38$). Finalement,

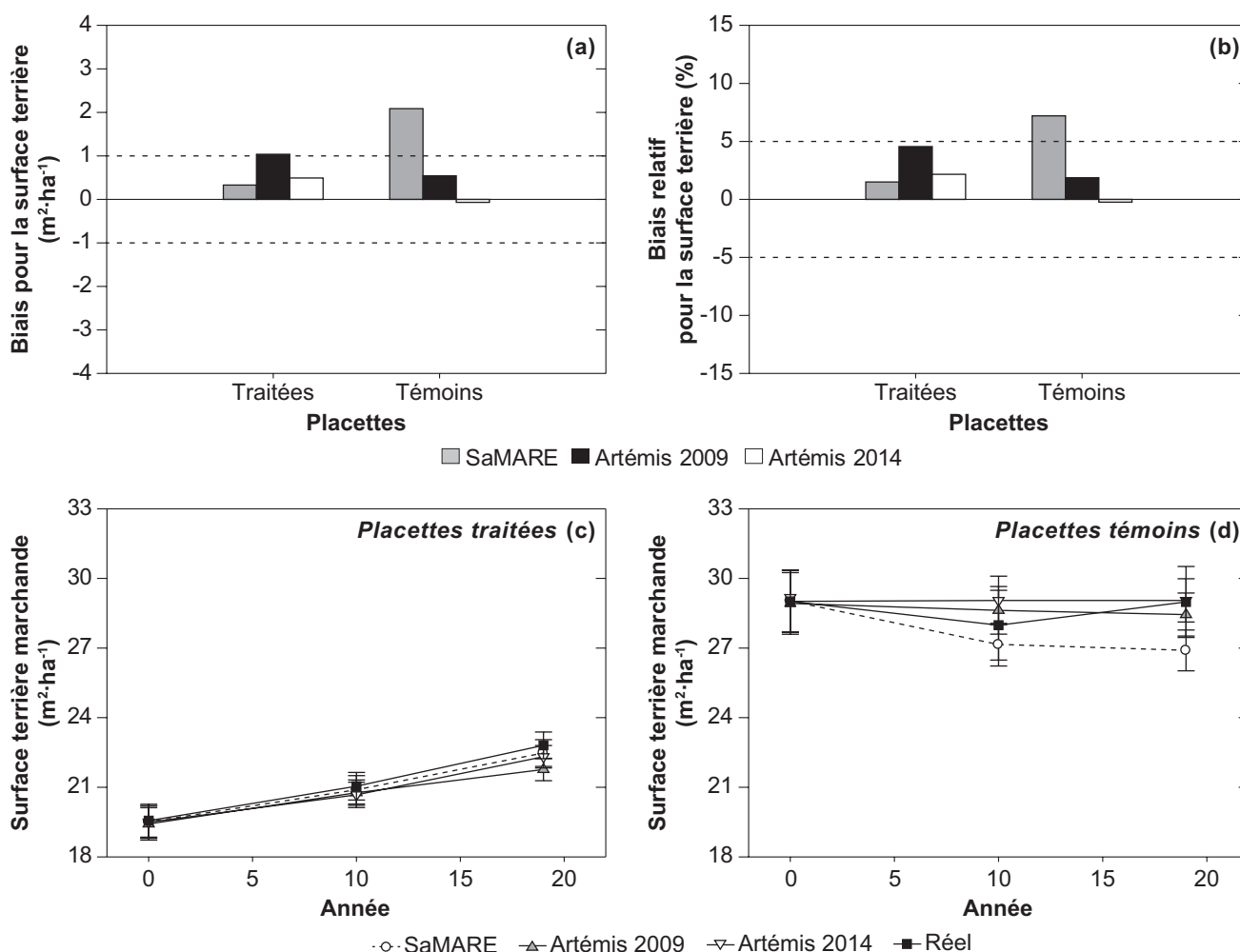


Figure 2. Biais (a), biais relatif (b) et évolution de la surface terrière marchande (moyenne $\pm$ erreur type) de 71 placettes traitées (c) et de 29 placettes témoins (d) mesurées sur une période de 18 ou de 19 ans et simulées avec les modèles SaMARE, Artémis-2009 et Artémis-2014. Les lignes pointillées horizontales représentent les seuils de tolérance des biais ($1,0 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$ en valeur absolue et 5 % en valeur relative).

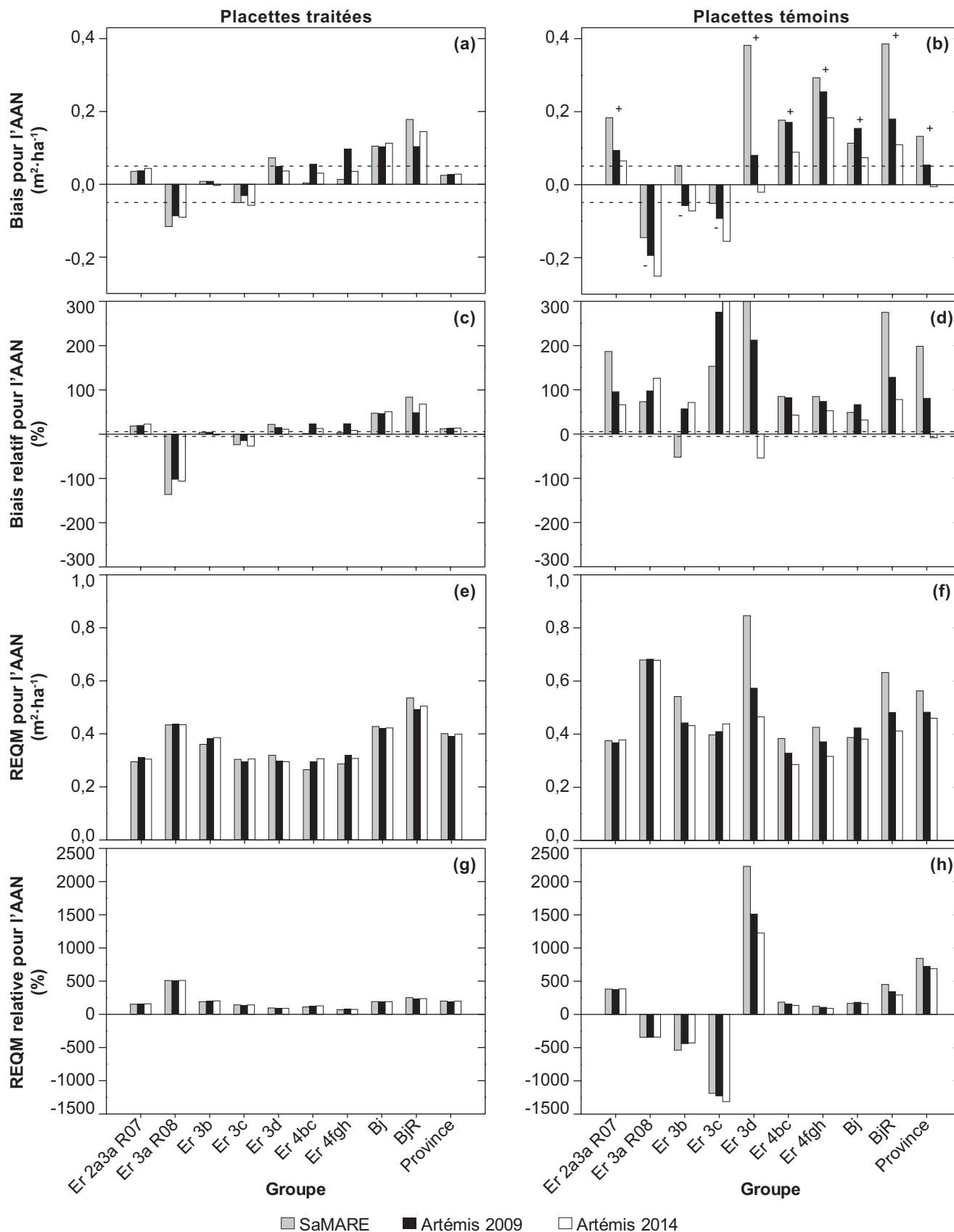


Figure 3. Biais (a, b), biais relatif (c, d), et racine de l'erreur quadratique moyenne (REQM) en valeur absolue (e, f) et relative (g, h) des modèles SaMARE, Artémis-2009 et Artémis-2014 pour l'accroissement annuel net en surface terrière marchande (AAN, $\text{m}^2 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$) à 10 ans, dans les placettes traitées (à gauche) et témoins (à droite) d'une coupe de jardinage effectuée dans un contexte opérationnel. Les résultats sont présentés par groupe de peuplements et pour l'ensemble des placettes de la province. Le signe de la valeur réelle de l'AAN (+ ou -) pour chaque groupe est indiqué à la partie (b). Les lignes pointillées horizontales représentent les seuils de tolérance des biais ($0,05 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ en valeur absolue et 5 % en valeur relative).

la mortalité a été surestimée de plus de 5 % dans les placettes témoins de la plupart des groupes, en particulier les groupes Bj, BjR, Er2a3aR07, Er4bc et Er4fgh. Artémis-2009 semblait prédire une mortalité trop précoce des gros arbres ($DHP \geq 40$ cm) pour le bouleau à papier (*Betula papyrifera* Marsh.) dans les placettes ayant une végétation potentielle MJ2, de même que pour le hêtre à grandes feuilles (*Fagus grandifolia* Ehrh) et l'érable rouge (*Acerrubrum* L.) dans les placettes ayant une végétation potentielle FE3 (érablière à bouleau jaune). De plus, pour les groupes BjR, Er2a3aR07 et Er4bc, la différence entre les prévisions et la valeur réelle augmentait à mesure que la surface terrière de la placette s'éloignait de la moyenne du groupe ($p < 0,10$; $r = 0,34, 0,37$ et $-0,36$, respectivement).

L'analyse des biais d'Artémis-2014 par composante de l'AAN a permis de déterminer que les principaux biais provenaient aussi des modules de recrutement et de mortalité annuelle périodique. Le recrutement était surestimé d'au moins 30 % dans les placettes traitées et témoins des groupes Er3b, Er3c, Er3d et Er4fgh (biais variant de $-0,01$ à $-0,03$ $m^2 \cdot ha^{-1} \cdot an^{-1}$, tableau 3). Toutefois, contrairement à ceux de la version 2009, les biais d'Artémis-2014 pour le recrutement étaient corrélés aux caractéristiques du peuplement plutôt qu'à celles du climat. Pour les groupes Er2a3aR07, Er3b et 3c, la différence entre la valeur simulée et la valeur réelle s'accroissait à mesure que le DHPq s'éloignait de la moyenne du groupe ($p < 0,08$; $r =$ de $0,21$ à $0,42$, données non présentées). Des corrélations similaires ont été décelées avec la surface terrière marchande dans les placettes témoins des groupes Bj et Er3c ($p < 0,05$; $r = -0,34$ et $0,35$, respectivement). Quant à la mortalité, elle a été surestimée pour la plupart des combinaisons de groupes (9) et de traitements (2), notamment dans les groupes Bj, BjR, Er2a3aR07 et Er4fgh (Tableau 3). Contrairement à la version 2009, Artémis-2014 prédit une faible probabilité de mortalité pour certains gros arbres, notamment pour le bouleau à papier dans les placettes ayant une végétation potentielle MJ2 et pour l'érable rouge dans les placettes ayant une végétation potentielle FE3 (données non présentées). Cependant, la probabilité de mortalité du hêtre à grandes feuilles dans les végétations potentielles FE3 demeure forte, ce qui pourrait expliquer les biais d'Artémis-2014 pour la mortalité.

L'analyse des biais de SaMARE à 10 ans par composante de l'AAN (Tableau 3) montre que les principaux biais provenaient d'une sous-estimation

générale du recrutement dans les placettes traitées et témoins (TR : moyenne provinciale de $0,03$ $m^2 \cdot ha^{-1} \cdot an^{-1}$ et valeur relative >5 % pour la majorité des groupes; TE : moyenne provinciale de $0,02$ $m^2 \cdot ha^{-1} \cdot an^{-1}$ et valeur relative >5 % pour la majorité des groupes) et d'une surestimation de la mortalité annuelle périodique (TR : moyenne provinciale de $-0,02$ $m^2 \cdot ha^{-1} \cdot an^{-1}$ et valeur relative < -5 % pour 4 groupes sur 9; TE : moyenne provinciale de $-0,12$ $m^2 \cdot ha^{-1} \cdot an^{-1}$ et valeur relative < -5 % pour la majorité des groupes). Les plus grands biais étaient dans les placettes des groupes Bj et BjR, où le recrutement était sous-estimé de $0,06$ $m^2 \cdot ha^{-1} \cdot an^{-1}$ et la mortalité surestimée de $0,17$ $m^2 \cdot ha^{-1} \cdot an^{-1}$ (moyennes des placettes TE et TR pour ces 2 groupes). Les biais du recrutement de SaMARE étaient en partie corrélés au climat, plus précisément, à une hausse de T_{moy} dans les groupes Bj (TE et TR, $p < 0,05$, $r = 0,24$ et $0,34$; données non présentées), BjR (TR : $p < 0,0001$, $r = 0,46$) et Er4fgh (TE : $p = 0,04$, $r = 0,42$), ainsi qu'à une variation de P_{tot} dans les groupes Bj et BjR ($p < 0,05$, r de $-0,36$ à $0,24$). Les caractéristiques des peuplements semblent être associées aux biais du recrutement de SaMARE dans les placettes traitées des groupes Er2a3aR07 (DHPq, $p = 0,006$, $r = 0,31$) et Er3d ($p = 0,04$, $r = 0,41$). Les biais pour la mortalité dans les placettes traitées étaient associés au DHPq et à la surface terrière résiduelle dans les groupes Er2a3aR07, 3d et 4bc ($p < 0,05$, r de $-0,44$ à $0,28$).

3.2 Évolution des placettes traitées sur 20 et 40 ans

3.2.1 Surface terrière marchande

Sur un horizon d'une rotation de coupe de jardinage (soit 20 ans), nous avons décelé peu de différences entre les modèles quant à la surface terrière marchande moyenne simulée à l'échelle provinciale dans les placettes traitées (Figure 4a) et dans l'ensemble des autres groupes (Figure 4b, où le groupe des érablières 3b est montré à titre d'exemple représentatif). Le groupe Er4bc fait exception (Figure 4c), car les modèles SaMARE et Artémis-2014 y prédisent une surface terrière nettement plus grande que ne le fait le modèle Artémis-2009. La tendance décelée à l'échelle provinciale et dans la plupart des autres groupes (Figure 4a, b) est semblable à celle observée dans le groupe de placettes traitées mesurées à 18 et 19 ans (Figure 2c).

Lorsqu'on étend l'horizon à 2 rotations (soit 40 ans), Artémis-2009 prévoit une surface terrière nettement plus faible que ne le font Artémis-2014 ou SaMARE,

Tableau 3. Accroissement annuel périodique des recrues et mortalité annuelle périodique selon le groupe de peuplements pour les 10 premières années après un traitement de coupe par jardinage : valeur observée et biais absolus et relatifs (%) pour les 3 modèles de simulation.

Traitement* Groupe		Accroissement annuel périodique des recrues (AAR, m ² .ha ⁻¹ .an ⁻¹)								Mortalité annuelle périodique (MAP, m ² .ha ⁻¹ .an ⁻¹)							
		Valeur observée	Biais SaMARE†		Biais Artémis-2009		Biais Artémis-2014		Valeur observée	Biais SaMARE†		Biais Artémis-2009		Biais Artémis-2014			
			absolu	%	absolu	%	absolu	%		absolu	%	absolu	%	absolu	%		
TR	Er2a3aR07	0,08	0,03	38	0,02	22	0,00	-5	0,24	-0,04	-17	0,01	3	-0,02	-10		
	Er3aR08	0,09	0,04	39	0,02	23	0,00	2	0,35	0,09	26	0,11	31	0,08	23		
	Er3b	0,06	0,01	13	0,00	5	-0,02	-36	0,29	0,02	6	0,04	14	0,02	8		
	Er3c	0,06	0,00	3	-0,00	-1	-0,02	-42	0,23	0,02	10	0,02	8	0,01	4		
	Er3d	0,05	0,01	13	0,01	11	-0,02	-38	0,16	-0,05	-32	-0,05	-29	-0,05	-32		
	Er4bc	0,08	0,02	21	0,01	10	-0,01	-15	0,18	-0,01	-5	-0,01	-5	-0,03	-16		
	Er4fgh	0,07	0,02	24	-0,00	-1	-0,03	-41	0,13	0,00	1	-0,05	-40	-0,04	-32		
	Bj	0,11	0,05	48	0,03	27	0,01	13	0,22	-0,08	-38	-0,02	-8	-0,06	-30		
	BjR	0,09	0,05	58	0,02	25	0,00	0	0,28	-0,14	-52	-0,03	-9	-0,10	-36		
Province	0,08	0,03	35	0,01	18	-0,01	-8	0,26	-0,02	-7	0,02	6	-0,02	-6			
TE	Er2a3aR07	0,05	0,02	46	0,01	25	0,00	3	0,33	-0,17	-53	-0,07	-20	-0,05	-15		
	Er3aR08	0,06	0,03	43	0,02	32	0,01	16	0,59	0,11	19	0,19	32	0,23	38		
	Er3b	0,03	0,00	1	-0,01	-17	-0,02	-61	0,48	-0,05	-11	0,04	9	0,05	11		
	Er3c	0,03	-0,00	-2	-0,01	-23	-0,02	-84	0,43	0,02	4	0,03	6	0,07	16		
	Er3d	0,03	0,00	2	-0,00	-5	-0,01	-32	0,50	-0,26	-52	-0,06	-12	0,06	11		
	Er4bc	0,06	0,03	47	0,02	34	0,01	12	0,24	-0,12	-48	-0,10	-40	-0,05	-22		
	Er4fgh	0,02	0,00	7	-0,01	-55	-0,03	-103	0,17	-0,24	-145	-0,23	-138	-0,19	-113		
	Bj	0,09	0,06	62	0,03	34	0,01	8	0,23	-0,11	-50	-0,09	-40	-0,06	-28		
	BjR	0,09	0,07	74	0,04	44	0,01	8	0,40	-0,33	-82	-0,09	-23	-0,07	-17		
Province	0,06	0,02	45	0,01	22	-0,00	-7	0,38	-0,12	-31	-0,03	-8	0,00	1			

* TR : Placettes traitées; TE : placettes témoins.

† Deuxième période quinquennale utilisée pour SaMARE.

dont le comportement se ressemble beaucoup à l'échelle provinciale (Figure 4a). Comparativement aux prévisions d'Artémis-2014, la surface terrière prédite par Artémis-2009 est plus petite pour tous les groupes de DHP, avec des écarts plus importants pour les plus petits arbres (Figure 5b). D'autre part, par rapport aux 2 autres modèles, SaMARE prédit une surface terrière plus faible pour la classe de DHP 10–18 cm, et plus grande pour les classes de DHP plus grands (Figure 5b). Le groupe Er3b (Figure 4b) illustre un cas plus typique retrouvé dans la plupart des groupes, soit des prévisions similaires avec SaMARE et Artémis-2014, puis des valeurs prédites un peu plus faibles avec Artémis-2009 (écart à 40 ans de 1,1 et 1,7 $\text{m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$, respectivement). Par contraste, le groupe Er4bc (Figure 4c) représente un cas de divergence extrême entre Artémis-2009 et les 2 autres modèles (écart à 40 ans de 2,4 et de 3,2 $\text{m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$ pour Artémis-2014 et SaMARE, respectivement). Cette divergence peut s'expliquer en partie par une plus faible surface terrière prédite par Artémis-2009 pour les classes de DHP > 18 cm (Figure 5f). Dans tous les cas, la variabilité des surfaces terrières prédites par les 3 modèles en fonction des classes de DHP était plus grande à 40 ans que pendant la première période décennale (Figure 5). Dans les 2 groupes et pour toutes les classes de DHP sauf la classe de 10–18 cm, l'écart de la surface terrière prédite à 40 ans était plus petit entre les valeurs prédites par SaMARE et Artémis-2014 qu'entre celles prédites par SaMARE et Artémis-2009 (Figures 5b, d, f).

3.2.2 Accroissement annuel net en surface terrière marchande

Trois grandes tendances ont été décelées au sujet de l'évolution de l'AAN sur des périodes de 20 et de 40 ans. La première concerne les érablières du centre et de l'ouest de la province (groupes Er2a3aR07, Er3aR08, Er3b, Er3c) : à partir de la deuxième période décennale, les modèles SaMARE et Artémis-2014 prédisent un AAN plus grand que celui prédit par Artémis-2009 (Figure 6a), et cet écart se maintient jusqu'à 40 ans. La deuxième tendance a été décelée dans les groupes généralement situés plus au nord (groupes Bj, BjR et Er4bc) : à 20 ans, l'écart s'est accentué entre SaMARE et Artémis-2014, et encore plus avec Artémis-2009 (Figure 6b), pour ne diminuer que légèrement sur le reste de la période de 40 ans. La troisième tendance décrit les érablières du sud et de l'est de la province (groupes Er3d et Er4fgh) : les différences entre les 3 modèles apparaissent dès la première période décennale, s'atténuent vers 40 ans entre SaMARE et Artémis-2009, mais se maintiennent entre Artémis-2014 et Artémis-2009 (Figure 6c). À l'échelle provinciale (Figure 6d), les résultats de SaMARE et d'Artémis-2009 suivent une tendance semblable à celle dans les érablières du centre et de l'ouest (Figure 6a). Par contraste, ceux d'Artémis-2014 ressemblent davantage à ceux des groupes plus nordiques (Figure 6b).

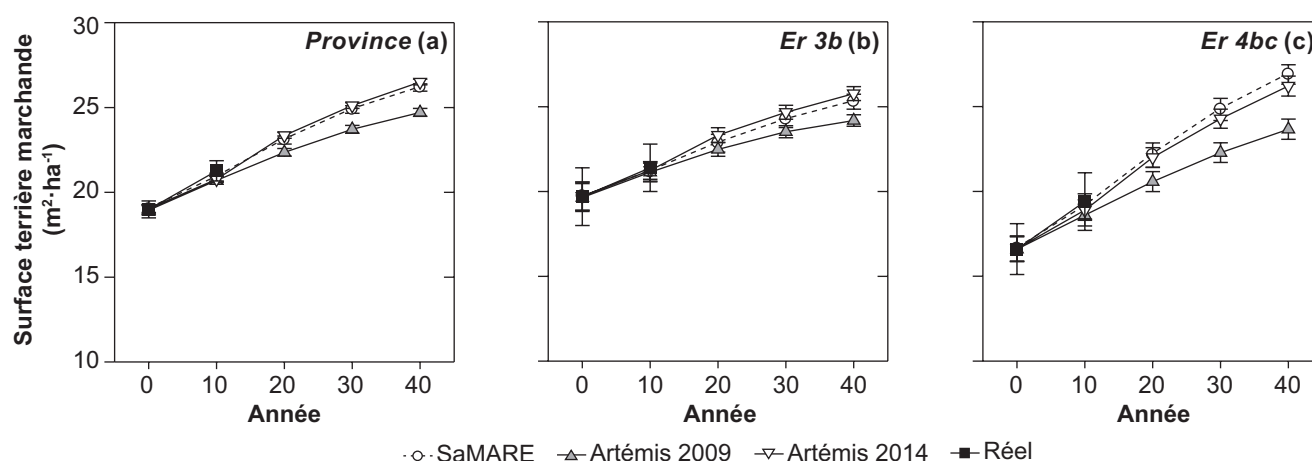


Figure 4. Évolution simulée (0–40 ans) par les modèles SaMARE, Artémis-2009, Artémis-2014, et valeurs réelles observées (0–10 ans) pour la surface terrière marchande à l'échelle provinciale (a), dans le groupe Er3b (b) et dans le groupe Er4bc (c), pour des placettes traitées selon une coupe de jardinage effectuée dans un contexte opérationnel. L'évolution présentée en (b) est représentative de tous les groupes sauf Er4bc. Les barres d'erreur représentent l'erreur type des prévisions.

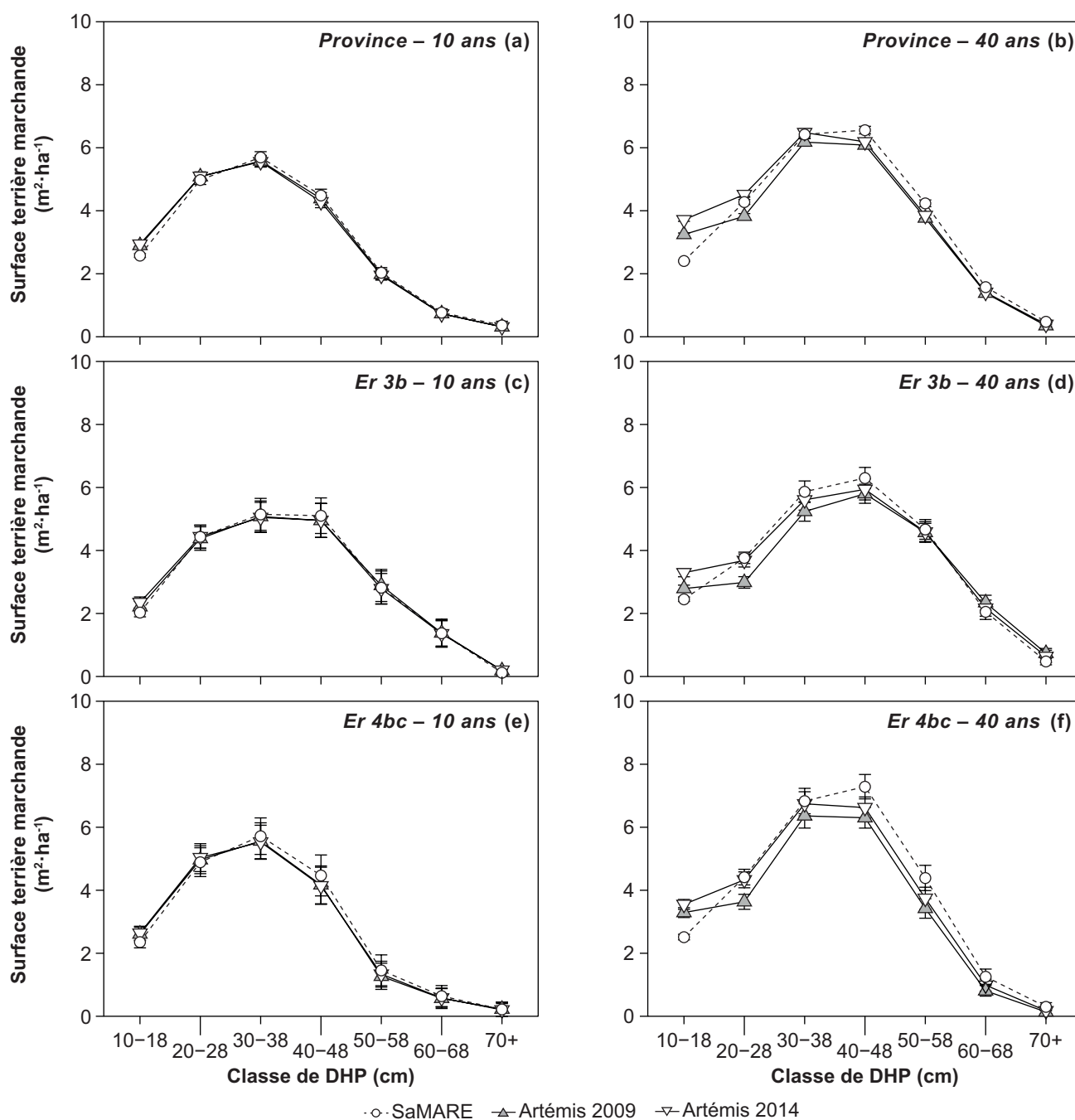


Figure 5. Distribution de la surface terre marchande simulée par les modèles SaMARE, Artemis-2009 et Artemis-2014 sur un horizon de 10 ans (à gauche) et de 40 ans (à droite), pour les placettes traitées selon une coupe de jardinage effectuée dans un contexte opérationnel à l'échelle provinciale (a, b), dans les groupes Er3b (c, d) et Er4bc (e, f), en fonction des classes de DHP. Les barres d'erreur représentent l'erreur type des prévisions.

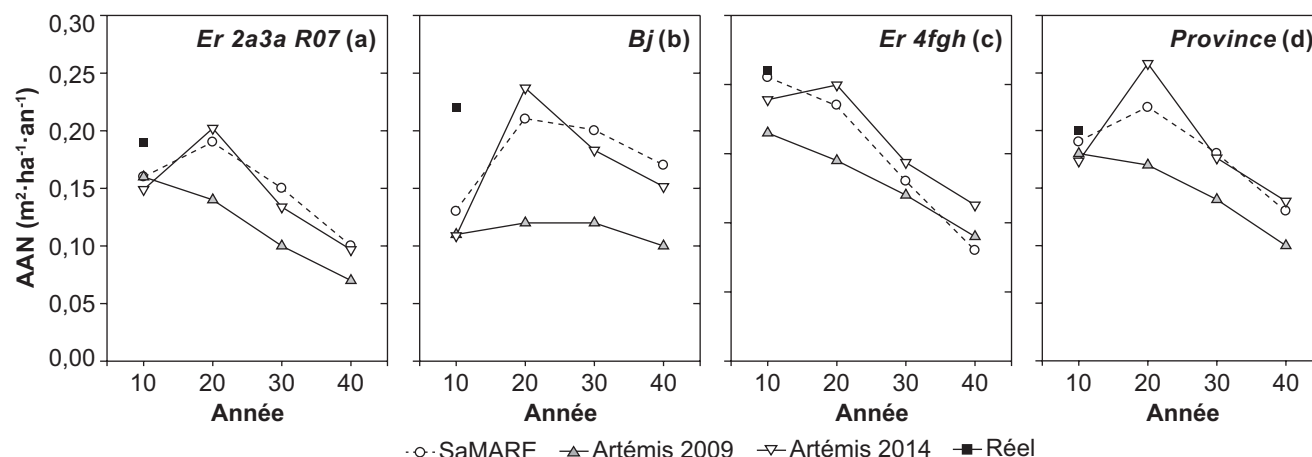


Figure 6. Évolution de l'accroissement annuel net en surface terrière marchande (AAN, $\text{m}^2 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$) dans les placettes traitées dans le groupe Er2a3aR07 (a), représentatif des groupes Er3aR08, Er3b et Er3c; dans le groupe Bj (b), représentatif des groupes BjR et Er4bc; dans le groupe Er4fgh (c), représentatif du groupe Er3d; ainsi qu'à l'échelle provinciale (d). L'évolution est présentée selon le modèle de simulation SaMARE (0–40 ans), Artémis-2009 (0–40 ans), Artémis-2014 (0–40 ans) et selon la valeur réelle observée (0–10 ans).

4. Discussion

4.1 Première période décennale

Les faibles biais des simulations de l'évolution de la surface terrière marchande des placettes traitées, peu importe le modèle, constituent le fait saillant des résultats pour les 10 premières années après la coupe (Figure 1). Ces résultats démontrent que SaMARE et les 2 versions d'Artémis peuvent bien simuler l'évolution de la surface terrière dans tous les groupes de peuplements. À quelques occasions, les biais de surface terrière marchande étaient un peu plus grands en raison des perturbations naturelles (p. ex. le chablis de 2006 pour le groupe Er3aR08) ou parce qu'un modèle n'avait pas été étalonné pour certains types de peuplements (p. ex. SaMARE dans les BjR).

Dans les placettes témoins, les biais et erreurs des modèles SaMARE et Artémis-2009 étaient un peu plus grands que ceux d'Artémis-2014, probablement à cause du nombre plus faible de placettes utilisées pour l'évaluation par rapport aux placettes traitées. En ce sens, on sait que l'estimation d'un biais est plutôt imprécise avec une taille d'échantillon inférieure à 30 placettes (Fortin et Langevin 2010), ce qui a été le cas des placettes témoins dans 4 groupes (Er2a3aR07, Er3d, Er4bc, Er4fgh; tableau 1). De même, pour les groupes Er3b, Er3c, Bj et BjR, l'échantillon des placettes témoins comptait juste un peu plus de 30 placettes (Tableau 1). Par ailleurs, si les erreurs sont grandes (REQM de 10 à 30 %,

figure 1g, h), c'est aussi à cause de la petite taille des placettes (0,04 ha). En ce sens, il faut aussi rappeler que le modèle SaMARE a été étalonné avec des placettes de 0,5 ha, alors que la présente évaluation a été faite avec des placettes de 0,04 ha. Lors d'une simulation à l'échelle de 0,04 ha, SaMARE utilise un postulat de distribution uniforme du recrutement dans l'espace. Ce changement d'échelle a peut-être plus d'incidence sur les prévisions de SaMARE lorsque la surface terrière de la placette est grande ($\pm 30 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$ et plus). Passé ce seuil, l'intervalle d'étalonnage de SaMARE n'est pas respecté, et l'utilisation du modèle correspond alors à une extrapolation.

À l'échelle provinciale, il n'est pas surprenant d'obtenir de bons résultats de prévision de la surface terrière 10 ans après une coupe ou après une mesure en peuplement témoin pour les 3 modèles. En effet, la précision est améliorée par le grand nombre de placettes. De plus, les biais relatifs pour la surface terrière sont toujours plus petits que ceux pour l'accroissement parce que le dénominateur de la surface terrière (la valeur moyenne observée) est grand comparativement à celui de l'accroissement.

L'analyse des biais pour l'AAN et ses composantes permet de mieux évaluer la capacité des modèles à capter les changements dans les placettes. Les biais pour ces variables se sont avérés plus grands que ceux pour la surface terrière. L'effet du chablis de juillet 2006 au Témiscamingue est bien visible dans les surestimations de l'AAN par les 3 modèles et pour les 2 traitements du groupe Er3aR08 (Figure 3). De

plus, les biais les plus importants étaient reliés aux modules de recrutement et de mortalité propres à chaque modèle (Tableau 3).

Dans le cas d'Artémis, la version 2009 sous-estimait le recrutement, particulièrement dans les cas impliquant le sapin (ex. végétations potentielles MJ1 et MJ2). Dans les placettes traitées, cette sous-estimation pourrait être attribuable à l'absence d'un effet de coupe dans les modules de recrutement des végétations potentielles FE3, MJ1 et MJ2, probablement reliée au faible nombre de placettes traitées ayant servi à cet étalonnage (Fortin et Langevin 2010). Il est peu plausible que les différences de conditions climatiques, corrélées au recrutement en sapin baumier dans Artémis-2009, aient eu une influence importante sur les biais de ce modèle. En effet, la version 2014 corrige ce biais dans les groupes Bj et BjR, mais surestime le recrutement dans les érablières du centre et de l'est de la province. La correction associée au sapin provient de la disponibilité de nouvelles données récoltées lors d'une période entre 2 épidémies de tordeuse des bourgeons de l'épinette. Les biais d'Artémis-2014 pour le recrutement semblent être reliés à certaines placettes qui ont des valeurs de DHPq (groupes Er2a3aR07, Er3b et 3c) ou de surface terrière résiduelle (groupes Bj et Er3c) plus faibles ou plus fortes que la moyenne de leur groupe.

Concernant SaMARE, la sous-estimation du recrutement dans les groupes Bj, BjR et Er4fgh pourrait s'expliquer en partie par la rareté ou l'absence de données d'étalonnage, par les variations climatiques de température et de précipitations annuelles dans les zones géographiques associées à certains groupes (Bj, BjR, Er4fgh) ainsi que par les caractéristiques de peuplements dans les groupes Er2a3aR07 et Er3d. L'utilisation d'études plus approfondies sur le lien entre les gaules et le recrutement (Gauthier *et al.* 2015) ainsi qu'une mise à jour de SaMARE avec de nouvelles données provenant de ces groupes pourraient améliorer le modèle.

La mortalité a été surestimée par les 3 modèles. Les biais étaient les plus grands dans les groupes Bj et BjR, de même que dans les placettes témoins du groupe Er4fgh. Les peuplements des groupes Bj et BjR sont davantage soumis à des épisodes de perturbations comme les épidémies de tordeuse des bourgeons de l'épinette et les chablis (Raymond *et al.* 2013). Par conséquent, leurs pertes par mortalité pourraient varier davantage selon les périodes, ce

qui rendrait difficile leur modélisation. Pour le groupe Er4fgh, seul SaMARE est parvenu à bien prédire la mortalité dans les placettes traitées. Ces érablières peuvent atteindre une surface terrière beaucoup plus grande qu'ailleurs en province avant de subir d'importantes pertes par mortalité. Généralement, leur plus faible représentation dans l'échantillon ne permet pas de leur attribuer des effets spécifiques lors de la modélisation. Dans les groupes Er2a3aR07, Er3d et Er4bc, les corrélations semblent montrer que les biais pour la mortalité pourraient être reliés à des placettes qui ont un DHPq ou une surface terrière résiduelle qui s'éloigne de la moyenne de leur groupe.

4.2 Évolution à plus long terme

L'évolution prédite de la surface terrière dans les placettes traitées commence à montrer des différences selon le modèle (Artémis-2009 vs les 2 autres modèles) entre 10 et 20 ans. Les différences s'amplifient avec le temps (Figure 4), et sont plus grandes dans le groupe Er4bc que dans les autres érablières. Cette distinction peut s'expliquer en partie par la sous-estimation du recrutement (10 %), combinée à une surestimation de la mortalité (5 %) par le modèle Artémis-2009 pour le groupe Er4bc. À long terme, ce groupe tend à avoir une plus faible surface terrière, principalement dans les classes de plus gros diamètres (Figure 5f). Des variations dans la structure diamétrale qui pourraient être associées au recrutement et à la mortalité ont aussi été observées entre les prévisions de SaMARE et d'Artémis-2014 (Figure 5), même si celles pour la surface terrière totale étaient similaires. Ainsi, SaMARE prédit moins d'arbres qu'Artémis-2014 dans les classes de petits DHP, et plus d'arbres de classes de gros DHP. La sous-estimation de la surface terrière avec le modèle SaMARE pour les placettes témoins pourrait s'expliquer par les différences de taille entre les placettes ayant servi à l'étalonnage du modèle et celles utilisées pour son évaluation.

L'emplacement géographique influence l'évolution à long terme de l'AAN simulé dans les placettes traitées, puisque les tendances différentes s'observent dans l'ouest et le centre (Figure 6a), le nord (Figure 6b), et le sud et l'est de la province (Figure 6c). On remarque une concordance des prévisions des modèles SaMARE et Artémis-2014, qui présentent des AAN généralement plus grands qu'Artémis-2009. Puisque tous les modèles tendent à sous-estimer l'AAN par rapport aux valeurs observées sur 10 ans (Figure 6), les prévisions de SaMARE et d'Artémis-2014

semblent plus plausibles que celles d'Artémis-2009, particulièrement dans les placettes traitées. Cet argument est aussi appuyé par les premières observations effectuées sur près de 20 ans (Figure 2a, c). Les différences entre ces 2 modèles et Artémis-2009 pourraient s'expliquer par le grand nombre de placettes traitées ayant servi à paramétrer SaMARE, de même que l'ajout de placettes du quatrième inventaire forestier du Québec méridional dans l'ajustement d'Artémis-2014, notamment d'autres placettes avec traitements sylvicoles.

5. Conclusion

La comparaison des 3 modèles sur 40 ans d'évolution et avec un jeu indépendant de données sur 10 à 20 ans a démontré que la version 2014 d'Artémis montre beaucoup moins d'écarts à long terme avec SaMARE que la version 2009. Non seulement les prévisions de la nouvelle version d'Artémis sont-elles plus proches de celles de SaMARE, mais elles sont aussi plus près des observations réelles dans des peuplements jardinés dans un contexte opérationnel de 1995 à 1999. Ainsi, l'utilisation d'Artémis-2014 semble tout aussi appropriée que celle de SaMARE pour simuler la surface terrière marchande des peuplements à l'étude, particulièrement ceux traités avec une coupe de jardinage.

Néanmoins, les résultats relèvent certaines faiblesses de ces modèles, notamment dans la simulation du recrutement et de la mortalité de certains groupes de peuplements, surtout ceux dominés par le bouleau jaune (groupes Bj et BjR). L'amélioration d'Artémis et de SaMARE pourrait passer par l'intégration des données de la présente étude lors de leur prochaine calibration, de manière à élargir non seulement le nombre d'observations provenant de placettes traitées, mais également l'applicabilité de SaMARE.

Remerciements

Nous désirons remercier le personnel des diverses directions régionales et unités de gestion du ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs du Québec qui ont participé à la cueillette des données sur le terrain. Nous sommes reconnaissants à MM. Zoran Majcen, Steve Bédard, Sébastien Meunier, Pierrot Boulay, Pierre Laurent et Jocelyn Hamel pour leur rôle dans la gestion du projet et la vérification des données. Nous tenons à remercier les trois évaluateurs (deux évaluateurs anonymes et Mathieu Fortin, AgroParisTech/INRA) ainsi que

l'éditrice associée (Josianne DeBlois) pour leurs commentaires constructifs qui ont amélioré la qualité du document. Nous remercions aussi Catherine Larouche pour la révision du document, Denise Tousignant pour l'édition ainsi que Nathalie Langlois et Maripierre Jalbert pour la mise en page et le graphisme. Nous sommes reconnaissants envers Étienne Boulay pour les analyses de simulations avec SaMARE. Ces travaux ont été financés dans le cadre du projet interne n° 142332053 de la Direction de la recherche forestière.

Références bibliographiques

- Bédard, S. et Z. Majcen, 2001. *Ten-year response of sugar maple–yellow birch–beech stands to selection cutting in Québec*. North. J. Appl. For. 18: 119–126.
- Coates, D.K., C.D. Canham, M. Beaudet, D.L. Sachs et C. Messier, 2003. *Use of a spatially explicit individual-tree model (SORTIE/BC) to explore implication of patchiness in structural complex forests*. For. Ecol. Manage. 186: 297–310.
- 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). Internal report. 226 p. (Version révisée du 25 février 2015).
- Dufour-Kowalski, S., B. Courbaud, P. Dreyfus, C. Meredieu et F. de Coligny, 2012. *Capsis: an open software framework and community for forest growth modelling*. Ann. For. Sci. 69: 221–233.
- 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. [<http://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.

- Fortin, M., S. Bédard et J. DeBlois, 2009a. *SaMARE : un modèle par tiges individuelles destiné à la prévision de la croissance des érablières de structure inéquienne du Québec méridional*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Direction de la recherche forestière. Mémoire de recherche forestière n° 155. 62 p. [<http://mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Fortin-Mathieu/Memoire155.pdf>]
- Fortin, M., F. Guillemette et S. Bédard, 2009b. *Predicting volumes by log grades in standing sugar maple (Acer saccharum Marsh.) and yellow birch (Betula alleghaniensis Britton) trees in southern Québec, Canada*. Can. J. For. Res. 39: 1928–1938.
- Gauthier, M.-M., F. Guillemette et S. Bédard, 2015. *On the relationship between saplings and ingrowth in northern hardwood stands*. For. Ecol. Manage. 358: 261–271.
- Guillemette, F., M.-C. Lambert et S. Bédard, 2012. *Sampling design and precision of basal area growth and stand structure in uneven-aged northern hardwoods*. For. Chron. 88: 30–39.
- Guillemette, F., M.-M. Gauthier, M.-C. Lambert et S. Bédard, 2013. *Effets réels décennaux de coupes de jardinage pratiquées de 1995 à 1999 dans un contexte opérationnel*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles, Direction de la recherche forestière, Mémoire de recherche forestière n° 168. 52 p. [<http://mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Guillemette-Francois/Memoire168.pdf>]
- Power, H., 2016. *Comparaison des biais et de la précision des estimations des modèles Artémis-2009 et Artémis-2014 pour la surface terrière totale des peuplements forestiers, avec et sans coupe partielle, sur une période de 40 ans*. Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de la recherche forestière. Note de recherche forestière n° 143. 22 p. [<http://www.mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Power-Hugues/Note143.pdf>]
- Raymond, P., F. Guillemette et C. Larouche, 2013. « Chapitre 6 – Les grands types de couvert et les groupements d'essences principales ». Dans : Ministère des Ressources naturelles (éd.). *Le guide sylvicole du Québec, Tome 2 – Les concepts et l'application de la sylviculture*, ouvrage collectif sous la supervision de C. Larouche, F. Guillemette, P. Raymond et J.-P. Saucier. Les Publications du Québec. Québec, QC. p. 94–119.
- Régnière, J. et R. Saint-Amant, 2008. *BioSIM 9 – Manuel de l'utilisateur*. Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts, Centre de foresterie des Laurentides. Québec, QC. Rapport d'information LAU-X-134F. 82 p. [<http://cfs.nrcan.gc.ca/publications?id=28769>]
- Remsoft, 2008. *Spatial Woodstock 2008.12 user guide*. Remsoft inc. Fredericton, NB.

Annexe

Évaluation du groupement de départ dans SaMARE

Afin de déterminer si un biais pouvait s'introduire en regroupant les placettes, nous avons évalué l'effet de simuler dans SaMARE les placettes traitées à l'échelle individuelle (400 m²) ou regroupées en grappes d'au moins 3 placettes. Pour ce faire, nous avons compilé leur évolution moyenne en surface terrière marchande et en AAN pour la période 0–10 ans selon les résultats de simulation de chaque placette ou de chaque grappe. Les résultats à l'échelle provinciale ont démontré que le regroupement des placettes en grappes surestimait la surface terrière marchande

par rapport à la mesure observée à partir de 5 ans après coupe (Figure A1a). Cette surestimation était plus prononcée que la sous-estimation de la surface terrière marchande à l'échelle des placettes. Les 2 méthodes de simulation offraient des résultats comparables à la mesure d'AAN observée pour les 2 premières périodes quinquennales (Figure A1b). Par conséquent, nous avons retenu la méthode de simulation à l'échelle des placettes individuelles dans SaMARE pour évaluer les objectifs de l'étude.

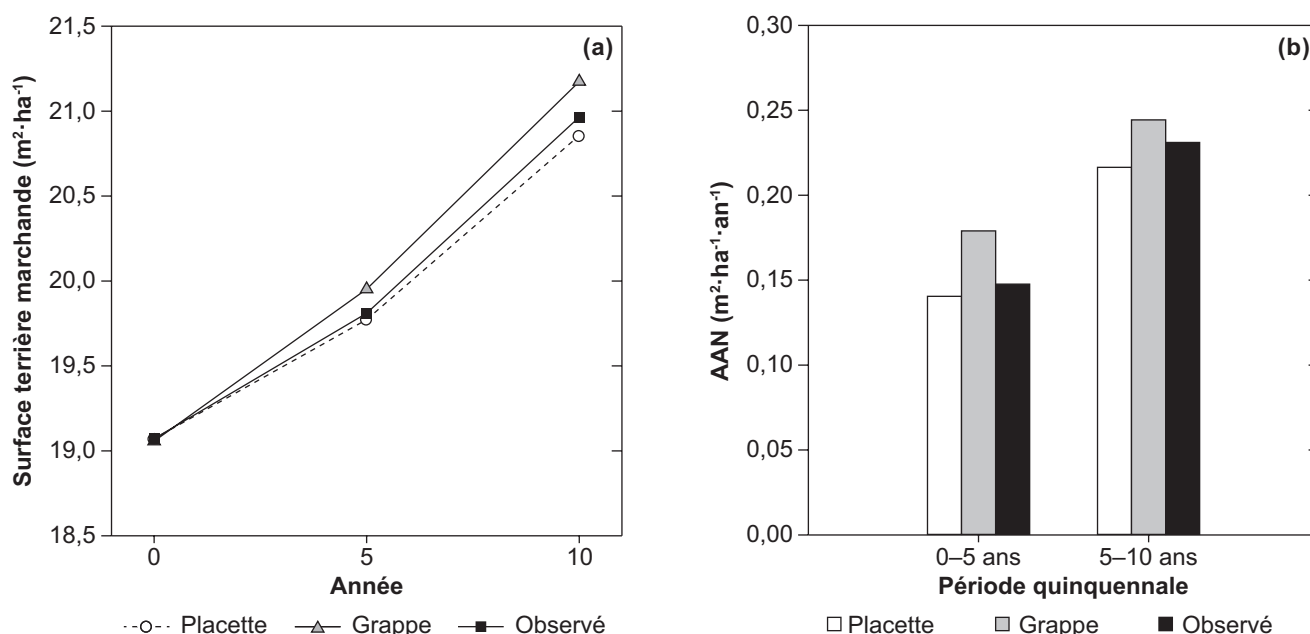


Figure A1. Évolution de la surface terrière marchande (a) et de l'accroissement annuel net en surface terrière marchande (AAN, m²·ha⁻¹·an⁻¹, b) à l'échelle de la province selon 3 méthodes : 1) simulation des placettes individuelles (placette); 2) simulation des grappes d'au moins 3 placettes (grappe); 3) mesure réelle observée pour la période 0–10 ans (observé). En tout, 146 grappes avaient au moins 3 placettes traitées et ont servi au calcul des moyennes pour chaque méthode.



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 : 978-2-550-76769-5
ISBN (pdf) : 978-2-550-76770-1
G.F.D.C. 521.62--015 (714)
L.C. SD 553
Dépôt légal 2016
Bibliothèque nationale du Québec
© 2016 Gouvernement du Québec