



Natura-2014 : Mise à jour et évaluation du modèle de croissance forestière à l'échelle du peuplement

Isabelle Auger

Résumé

Les modèles de croissance sont utilisés pour prévoir les changements temporels des caractéristiques d'un peuplement forestier et lors de la planification de l'aménagement forestier. Natura est un modèle de croissance forestière à l'échelle du peuplement développé en 2009 par la Direction de la recherche forestière du ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs du Québec (MFFP). Il est conçu pour une utilisation à une échelle de décision stratégique et est utilisé au Québec, notamment par le Bureau du forestier en chef, dans le calcul des possibilités forestières pour simuler l'évolution des bétulaies blanches, des peupleraies, des mélézaies, des pessières, des pinèdes grises et des sapinières sur les végétations potentielles résineuses et mixtes à dominance résineuse. Le modèle a été étalonné à nouveau en 2014, en ajoutant de nouvelles données provenant du réseau de placettes-échantillons permanentes du MFFP et en modifiant la structure des équations. Les versions 2009 et 2014 de Natura produisent généralement des prévisions dont le biais et l'exactitude sont comparables pour la densité des tiges, la surface terrière marchande et le volume marchand pour l'ensemble des essences des peuplements. Les biais sur les prévisions de la surface terrière des groupes d'essences principaux sont également semblables entre les deux versions. Certaines lacunes persistantes de la version 2009 du modèle sont évoquées, en particulier le biais des prévisions de la surface terrière du sapin baumier (*Abies balsamea* [L.] Mill.), bien que celui-ci soit souvent moindre qu'avec la version 2009. Avec l'ajout de près de 4000 périodes de croissance majoritairement dans les années 2000, la version 2014 de Natura est considérée plus représentative des conditions de croissance actuelles. Elle gagne à être utilisée dans le prochain calcul des possibilités forestières.

Mots-clés : modèle de croissance, possibilité forestière, tordeuse des bourgeons de l'épinette, biais, production ligneuse.

Abstract

Growth models are used to predict changes of forest stand characteristics over time and to plan forest management activities. Natura is a stand-level forest growth simulator developed in 2009 by the Direction de la recherche forestière of Quebec's ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP). Designed for strategic decision-making, this model is now used throughout the province, especially by the Bureau du forestier en chef, to calculate annual allowable cuts and to simulate the evolution of stands dominated by white birch (*Betula papyrifera* Marsh.), poplars (*Populus* sp.), larches (*Larix* sp.), spruces (*Picea* sp.), jack pine (*Pinus banksiana* Lamb.) or balsam fir (*Abies balsamea* [L.] Mill.) on potential vegetations defined by softwoods or softwood-dominated mixedwoods. The model was recalibrated in 2014 after modifying equation structure and incorporating new data from the MFFP's network of permanent sampling plots. Predictions of Natura-2009 and Natura-2014 regarding stem density, merchantable basal area and merchantable volume generally have comparable bias and accuracy when all tree species in the stands are considered. When main species groups are considered, basal area predictions of Natura-2009 and Natura-2014 also have similar biases. Some of the 2009 version's shortcomings persist in the 2014 version. For instance, prediction bias for balsam fir basal area remains high, although it is often less than with the 2009 version. Given the addition of almost 4000 growth periods occurring mostly in the 2000s, Natura-2014 is considered more representative of current growth conditions. Its use is recommended for future allowable cut calculations.

Keywords: growth model, allowable cut, spruce budworm, bias, wood production

Correspondance : isabelle.auger@mffp.gouv.qc.ca



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

1. Introduction

Les modèles de croissance sont utilisés pour prévoir les changements temporels des caractéristiques d'un peuplement forestier lors de la planification de l'aménagement forestier. Ils peuvent être classés selon l'échelle de leurs prévisions (par exemple, celle de l'arbre ou du peuplement). Les modèles à l'échelle du peuplement estiment directement l'évolution des caractéristiques dendrométriques de celui-ci, sans utiliser d'information à l'échelle de l'arbre. Ils fournissent des informations telles que la densité des tiges, la surface terrière et le volume d'un peuplement. Natura est un modèle de croissance forestière à l'échelle du peuplement qui fait varier directement la hauteur dominante, la densité des tiges marchandes, la surface terrière marchande et le volume marchand brut de peuplements de 7 m et plus de hauteur du territoire forestier québécois (Pothier et Auger 2011). Il s'applique autant aux peuplements purs que mélangés ainsi qu'aux peuplements de structure équiennne ou inéquiennne, puisqu'aucun filtre n'a été imposé sur ces critères lors de la sélection des données. Une première version de ce modèle (Natura-2009) a été étalonnée à partir des données du réseau des placettes-échantillons permanentes (PEP) de la Direction des inventaires forestiers du ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs du Québec (MFFP); elle est conçue pour une utilisation à une échelle de décision stratégique. Il est notamment utilisé au Québec par le Bureau du forestier en chef (BFEC) dans le calcul des possibilités forestières pour simuler l'évolution des bétulaies blanches, des peupleraies, des mélézaies, des pessières, des pinèdes grises et des sapinières sur les végétations potentielles résineuses et mixtes à dominance résineuse (Poulin 2013a).

Généralement, un modèle demeurera en utilisation jusqu'à ce que l'expérience, les données ou l'analyse exigent son amélioration, sa mise à jour ou son remplacement (Weiskittel *et al.* 2011). Les modèles empiriques tels que Natura doivent leur robustesse au grand nombre de placettes d'inventaire sur lesquelles ils sont basés (Weiskittel *et al.* 2011). De plus, l'utilisation du modèle sur une longue période de simulation, comme dans le calcul des possibilités forestières (150 ans), requiert une évaluation des prévisions sur un horizon de temps le plus long possible. La disponibilité de nouvelles mesures du réseau des PEP depuis la première version du modèle permet d'incorporer des mesures plus récentes reflétant les conditions climatiques actuelles ainsi que

les changements dans le régime de perturbations partielles subies par la forêt. La représentativité du jeu de données s'en trouve améliorée. Ces nouvelles mesures permettent aussi d'avoir un plus long suivi d'une même placette et d'évaluer le modèle sur un horizon temporel plus long.

Une amélioration potentielle du modèle Natura concerne les prévisions du diamètre moyen quadratique et du volume moyen par tige dans la placette. Dans Natura, ces variables sont déduites à partir des variables réponses du modèle, qui sont elles-mêmes estimées à partir d'équations. Le diamètre moyen quadratique et le volume moyen par tige ne sont donc pas estimés directement à partir d'un processus d'étalonnage statistique. Ainsi, le biais et la précision des prévisions de ces deux variables ne sont contrôlés qu'indirectement par le modèle. Puisque ces variables sont aussi utilisées par le BFEC dans le calcul des possibilités forestières (Poulin 2013a), il est important d'essayer d'en améliorer le biais et la précision en modifiant la structure des systèmes d'équations de Natura.

En 2014, avec le début des travaux d'estimation des possibilités forestières pour la période 2018-2023, les conditions étaient donc réunies pour une révision du modèle Natura. L'objectif de cette étude est de mettre à jour le modèle de croissance forestière Natura et de comparer les prévisions obtenues avec la version mise à jour (Natura-2014) à celles obtenues avec la version précédente.

2. Matériel et méthodes

2.1 Données

Les données utilisées pour étalonner Natura proviennent du réseau des PEP suivies par la Direction des inventaires forestiers du MFFP depuis les années 1970. Ces placettes, mesurées en moyenne tous les 10 ans, couvrent l'ensemble du territoire de la forêt commerciale du Québec (MFFP 2014). Puisque Natura est un modèle dynamique qui modélise le changement des caractéristiques du peuplement entre 2 mesures, au moins 2 observations d'une même placette étaient nécessaires pour créer des périodes de croissance. Les placettes retenues pour Natura-2014 devaient répondre aux mêmes critères de sélection des peuplements que ceux établis par Pothier et Auger (2011) pour Natura-2009. Entre autres, les placettes devaient contenir au moins un arbre dont l'âge et la hauteur étaient mesurés.

Nous n'avons pas utilisé les 282 placettes dont le type écologique n'était pas connu ni les 204 autres faisant partie du réseau de la Forêt Montmorency de l'Université Laval, étant donné leur surreprésentation sur un territoire relativement restreint. Ainsi, 8674 placettes ont été utilisées, pour un total de 17 336 périodes de croissance (Figure 1, tableaux 1 et 2). La hauteur totale de chacun des arbres a été estimée avec la relation hauteur-diamètre d'Auger (2016) et leur volume marchand brut, avec le tarif de cubage de Fortin *et al.* (2007).

2.2 Âge moyen et hauteur dominante

Pour Natura-2014, nous avons calculé l'âge moyen et la hauteur dominante de chacune des placettes conformément aux méthodes décrites dans les sections 1.3.1 et 1.3.2 de Pothier et Auger (2011). Nous avons déterminé la hauteur dominante en calculant la moyenne des hauteurs des 4 plus gros arbres de la placette, celles-ci estimées avec l'équation [1], inspirée de Pothier et Auger (2011) :

$$H_{ijk} = 1,3 + \left[\frac{D_{ijk}}{\left(\frac{\bar{D}_{cd,ij}}{\bar{H}_{cd,ij} - 1,3} \right) + \alpha_1 (D_{ijk} - \bar{D}_{cd,ij})} \right] + u_{ik} + \varepsilon_{ijk} \quad [1]$$

où

H_{ijk} : hauteur totale (m) de l'arbre étude k de la placette i au mesurage j ,

D_{ijk} : diamètre à hauteur de poitrine (DHP, cm) de l'arbre étude k de la placette i au mesurage j ,

$\bar{D}_{cd,ij}$: DHP moyen (cm) des arbres études codominants et dominants de la placette i au mesurage j ,

$\bar{H}_{cd,ij}$: hauteur moyenne (m) des arbres études codominants et dominants de la placette i au mesurage j ,

u_{ik} : effet aléatoire d'arbre ($u_{ik} \sim N(0, \sigma_u^2)$), et

ε_{ijk} : erreur résiduelle ($\varepsilon_{ijk} \sim N(0, \sigma^2)$).

Tableau 1. Distribution des placettes-échantillons permanentes retenues selon la version de Natura et le nombre de périodes de croissance (proportion entre parenthèses).

Nombre de périodes de croissance	Nombre de placettes			
	Natura-2009		Natura-2014	
1	3 813	(49 %)	3 233	(37 %)
2	2 670	(34 %)	2 483	(29 %)
3	1 250	(16 %)	2 696	(31 %)
4	84	(1 %)	261	(3 %)
5	1	(0 %)	1	(0 %)
Total	7 229*	(100 %)	8 674	(100 %)

* Le nombre total de placettes pour Natura-2009 présenté ici est inférieur à celui retrouvé dans Pothier et Auger (2011), car les placettes renumérotées après une coupe partielle ne comptent pas comme des nouvelles placettes.

Tableau 2. Distribution des périodes de croissance des placettes-échantillons permanentes retenues selon la version de Natura et la décennie de mesure de la fin de la période (proportion entre parenthèses).

Décennie	Nombre de périodes de croissance			
	Natura-2009		Natura-2014	
1970–1979	2 153	(16 %)	1 985	(11 %)
1980–1989	3 297	(25 %)	3 791	(22 %)
1990–1999	4 189	(32 %)	5 177	(30 %)
2000–2009	3 605	(27 %)	4 514	(26 %)
2010–2012	0	(0 %)	1 869	(11 %)
Total	13 244	(100 %)	17 336	(100 %)

La valeur du paramètre α_1 est 0,033744 (erreur type = 0,000090), estimée avec la procédure NLMIXED de SAS/STAT® 13.1 (SAS Institute Inc. 2013a ; erreur résiduelle $\sigma = 0,78$ m ; écart-type de l'effet aléatoire $\sigma_u = 1,57$ m).

2.3 Tordeuse des bourgeons de l'épinette

Afin de tenir compte des effets des épidémies de tordeuse des bourgeons de l'épinette (TBE, *Choristoneura fumiferana* Clemens) sur la croissance des peuplements, nous avons calculé, pour chaque intervalle de mesure, un indice de réduction de croissance potentielle attribuable à la TBE suivant Pothier *et al.* (2005). Cet indice a ensuite été utilisé comme variable explicative dans le modèle de croissance.

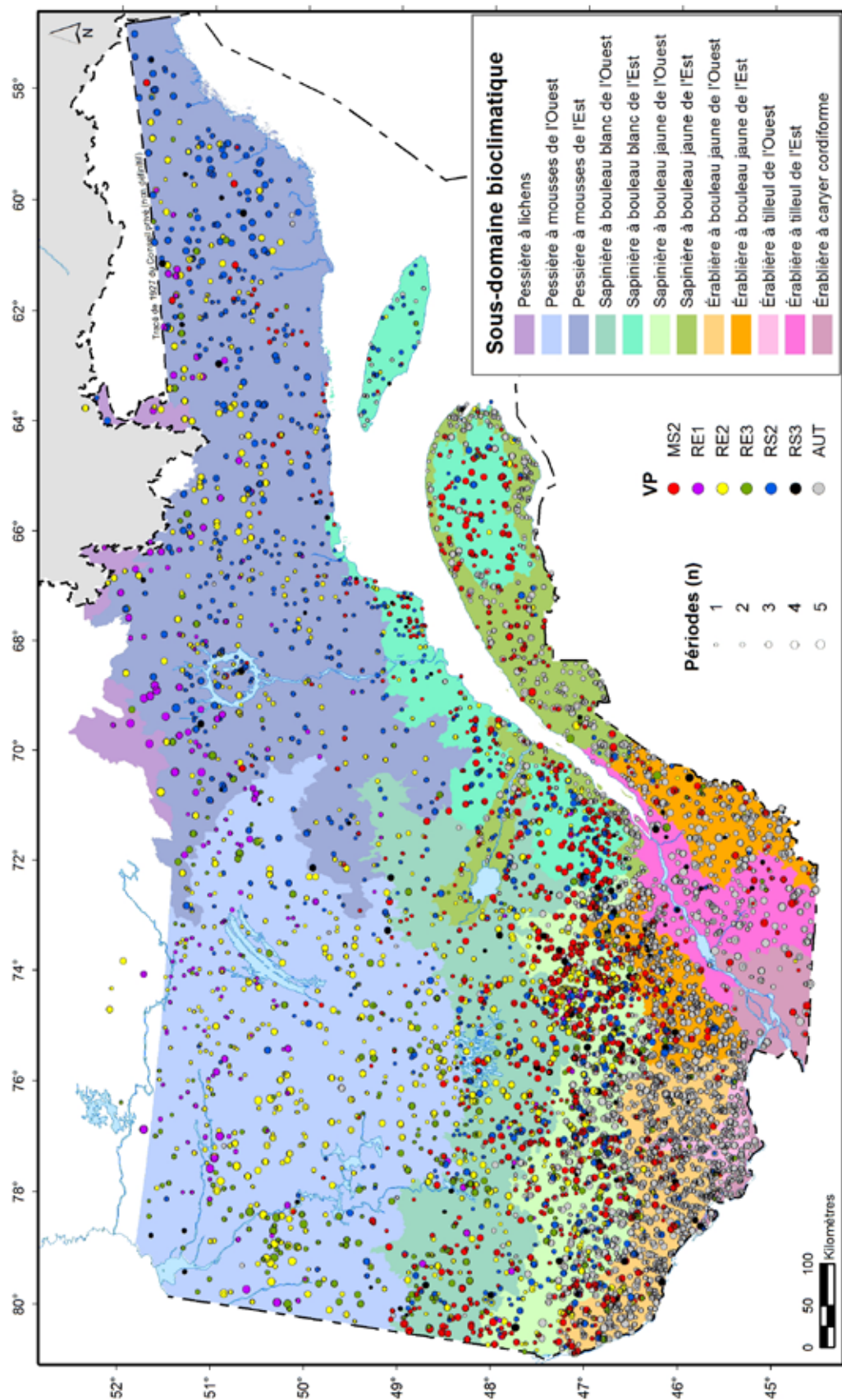


Figure 1. Répartition des placettes-échantillons permanentes utilisées pour étalonner Natura-2014 selon la végétation potentielle (VP, couleur du symbole) et le nombre de périodes de croissance (grosleur du symbole). La végétation potentielle AUT regroupe toutes les autres.

L'indice est calculé à partir des relevés aériens de défoliation par la TBE effectués annuellement par la Direction de la protection des forêts (DPF). Ces relevés permettent d'évaluer l'intensité et l'étendue des dégâts résultant d'épidémies d'insectes (MRNF 2012). La défoliation annuelle est évaluée selon 3 classes : défoliation légère (1 à 35 %); défoliation modérée (de 36 à 70 %); défoliation grave (de 71 à 100 %). Le transfert des contours de défoliation en polygones numériques, rendus disponibles par la DPF sur le site *Données ouvertes du Gouvernement du Québec* (<http://www.donnees.gouv.qc.ca>), a permis de définir l'historique de défoliation de chaque placette (de 1967 à 2012). Le nombre d'années de défoliation modérée à grave ainsi que la présence de défoliation légère et de défoliation modérée à grave dans les 4 dernières années de la période de croissance ont servi à calculer l'indice de réduction de croissance potentielle attribuable à la TBE (indice basé sur la croissance radiale) pour chaque période de croissance des placettes.

2.4 Variables de station

Les variables de station testées dans Natura-2014 sont les mêmes que celles dans Natura-2009, auxquelles nous avons ajouté 2 variables indicatrices : présence d'une perturbation naturelle légère dans la période précédente et présence d'une coupe partielle dans la période précédente. Rappelons que les variables associées au système de classification écologique étaient le sous-domaine bioclimatique, la végétation potentielle et le milieu physique (4^e caractère du type écologique) (Saucier *et al.* 1998). Nous avons regroupé au préalable certaines végétations potentielles afin d'avoir au moins 50 placettes ou 130 périodes de croissance dans chaque groupe. Ainsi, les végétations potentielles MS4 et ME1 ont été regroupées avec MS2; RS4 et RS5 avec RS2; RE4 avec RE2; FE4 avec FE3; FE1 avec FE2; FO1 avec MF1; FC1 et FE5 avec FE6; RB1 et RB2 avec RB5. Nous avons ensuite utilisé ces regroupements pour étalonner et évaluer le modèle de croissance. Le tableau 3 présente la distribution des PEP et des périodes de croissance selon le sous-domaine bioclimatique et la végétation potentielle. La température annuelle moyenne et les précipitations totales annuelles ont été estimées à l'aide du logiciel BioSIM (Régnière *et al.* 2014) sur la base des relevés climatiques de 1981 à 2010.

2.5 Modèle de croissance

Le modèle de croissance Natura-2014 contient le même ensemble d'équations que Natura-2009, c'est-à-dire 5 groupes d'équations utilisant des variables dendrométriques et de station qui estiment le changement temporel de la densité des tiges marchandes, de la surface terrière marchande, du volume marchand brut, de la hauteur dominante et de l'indice de régularité de Shannon de la structure diamétrale d'un peuplement sur une période de 10 ans. Le tableau 4 présente un résumé des variables explicatives utilisées dans les différentes équations de Natura-2014.

Dans la version 2014 comme dans la version 2009, nous avons modélisé le changement temporel de la densité des tiges marchandes, de la surface terrière marchande et du volume marchand brut pour cinq groupes d'essences : les feuillus intolérants (FI), les feuillus tolérants (FT), les résineux intolérants (RI), les résineux tolérants (RT) ainsi qu'un cinquième groupe composé uniquement du sapin baumier (SAB, *Abies balsamea* [L.] Mill.). Le sapin est traité séparément en raison de sa sensibilité à la TBE. Une liste des essences de chacun des groupes est présentée à l'annexe 1.

2.5.1 Changement temporel de la hauteur dominante

L'équation pour modéliser le changement temporel de la hauteur dominante de Natura-2014 est la même que celle de Natura-2009 (Pothier et Auger 2011), développée par Ouzennou *et al.* (2008). Nous avons étalonné l'équation [2] séparément pour chaque sous-domaine bioclimatique avec la procédure NLMIXED de SAS/STAT® 13.1 (SAS Institute Inc. 2013a) :

$$HD_{2,ij} = 1 + (HD_{1,ij} - 1) \times \left[\frac{1 - \exp(-\beta_1 (Age_{1,ij} + \Delta t_{ij}))}{1 - \exp(-\beta_1 Age_{1,ij})} \right]^{\beta_2} + \delta_i + \varepsilon_{ij} \quad [2]$$

$$\beta_2 = b_1 \beta_1,$$

$$\beta_1 = b_2 f_{\tilde{h}_{max}} f_{\Delta t} f_{IS},$$

$$f_{\tilde{h}_{max}} = 1 + c_{\tilde{h}_{max}} \left(\left(\tilde{h}_{max,1,ij} - \tilde{h}_{max} \right) / \tilde{h}_{max} \right),$$

$$f_{\Delta t} = 1 + c_{\Delta t} \left(\left(\Delta t_{ij} - \overline{\Delta t} \right) / \overline{\Delta t} \right),$$

$$f_{IS} = 1 + c_{IS} \left(\left(IS_{1,ij} - \overline{IS} \right) / \overline{IS} \right),$$

$$\tilde{h}_{max,1,ij} = 1 + \left[\frac{HD_{1,ij} - 1}{\left(1 - \exp(-b_2 Age_{1,ij}) \right)^{b_2 b_1}} \right]$$

où

$HD_{1,ij}$: hauteur dominante (m) de la placette i au début de la période j ,

$HD_{2,ij}$: hauteur dominante (m) de la placette i à la fin de la période j ,

$Age_{1,ij}$: âge moyen des arbres codominants et dominants (années) de la placette i au début de la période j ,

$IS_{1,ij}$: indice de régularité de Shannon de la placette i au début de la période j ,

Δt_{ij} : nombre d'années dans la période j de la placette i ,

$\tilde{h}_{max,1,ij}$: hauteur dominante asymptotique évaluée au début de la période j de la placette i ,

b_1 , b_2 , $c_{\tilde{h}_{max}}$, c_{IS} et $c_{\Delta t}$: coefficients de régression,

$\overline{\tilde{h}_{max}}$: moyenne des $\tilde{h}_{max,1,ij}$,

$\overline{\Delta t}$: moyenne des Δt_{ij} ,

$\overline{IS}$: moyenne des $IS_{1,ij}$,

δ_i : effet aléatoire de la placette i ,
 $\delta_i \sim N(0, \sigma_p^2)$, et

ε_{ij} : erreur résiduelle, $\varepsilon_{ij} \sim N(0, \sigma^2)$.

Les paramètres de l'équation [2] ont été estimés de manière itérative, suivant la méthode développée par Ouzennou *et al.* (2008). Les valeurs estimées des paramètres sont disponibles sur demande auprès de l'auteure, sous la forme d'un chiffrier Excel.

2.5.2 Changement temporel de l'indice de régularité de Shannon

Nous avons calculé l'indice de régularité de Shannon de la structure diamétrale du peuplement conformément à la section 1.3.4 de Pothier et Auger (2011) avec $S = 19$ classes de DHP de 2 cm. Pour la version 2014 de Natura, nous avons modélisé le changement temporel de l'indice avec une équation linéaire (Pothier et Auger 2011), pour chaque sous-domaine bioclimatique, avec la procédure MIXED de SAS/STAT® 13.1 (SAS Institute Inc. 2013a) :

$$IS_{2,ij} = \alpha_0 + \alpha_1 IS_{1,ij} + \alpha_2 Age_{1,ij} + \alpha_3 \Delta t_{ij} + \varepsilon_{ij} \quad [3]$$

où

$IS_{1,ij}$: indice de régularité de Shannon de la placette i au début de la période j .

$IS_{2,ij}$: indice de régularité de Shannon de la placette i à la fin de la période j .

$Age_{1,ij}$: âge moyen des arbres codominants et dominants de la placette i au début de la période j (années).

Δt_{ij} : nombre d'années dans la période j de la placette i .

α_0 , α_1 , α_2 et α_3 : paramètres à estimer, et

ε_{ij} : erreur résiduelle, $\varepsilon_{ij} \sim N(0, \sigma^2)$.

Les valeurs estimées des paramètres de l'équation [3] sont disponibles sur demande auprès de l'auteure, sous la forme d'un chiffrier Excel. Comme pour la version 2009 de Natura, l'effet aléatoire de placette et la corrélation temporelle entre les périodes d'une même placette n'étaient pas significatifs.

2.5.3 Changement temporel de la densité des tiges, de la surface terrière marchande et du volume marchand brut

Nous avons retenu la forme des équations utilisées dans Natura-2009 pour modéliser le changement temporel de la densité des tiges marchandes, de la surface terrière marchande et du volume marchand brut. Nous avons toutefois modifié les systèmes d'équations afin d'obtenir de meilleures prévisions du diamètre moyen quadratique et du volume moyen par tige d'une placette, tous deux calculés à partir de la densité des tiges, de la surface terrière et du volume. Dans Natura-2009, un système d'équations regroupait les cinq équations d'une même variable réponse (une équation par groupe d'essences), ce qui a généré trois systèmes d'équations indépendants à étalonner (un par type de variable réponse). Dans Natura-2014, le groupe d'essences était la base du système d'équations, lequel regroupait les équations des trois variables réponses (nombre de tiges, surface terrière et volume), ce qui a généré cinq systèmes d'équations à étalonner, soit un par groupe d'essences. Cette forme de système a permis

Tableau 3. Distribution des placettes-échantillons permanentes retenues et des périodes de croissance selon la version de Natura, la végétation potentielle et le sous-domaine bioclimatique.

Code	Végétation potentielle	Nombre de placettes			Nombre de périodes de croissance			Sous-domaine bioclimatique			Nombre de placettes			Nombre de périodes de croissance		
		Natura 2009		Natura 2014	Natura 2009		Natura 2014	Code			Natura 2009		Natura 2014	Natura 2009		Natura 2014
		2009	2014	2014	2009	2014	2014	2009	2014		2009	2014	2014	2009	2014	2014
FC1	Chênaie rouge	22	21	46	47	1		Érablière à caryer cordiforme			115	138	233	266		
FE1	Érablière à caryer cordiforme	12	15	23	28	2est		Érablière à tilleul de l'Est			168	258	376	524		
FE2	Érablière à tilleul	203	241	432	513	2ouest		Érablière à tilleul de l'Ouest			234	238	449	457		
FE3	Érablière à bouleau jaune	594	764	1 392	1 701	3est		Érablière à bouleau jaune de l'Est			635	868	1 253	1 831		
FE4	Érablière à bouleau jaune et à hêtre	18	13	30	25	3ouest		Érablière à bouleau jaune de l'Ouest			896	1 092	2 140	2 451		
FE5	Érablière à ostryer	49	55	111	123	4est		Sapinière à bouleau jaune de l'Est			500	664	873	1 102		
FE6	Érablière à chêne rouge	102	106	230	243	4ouest		Sapinière à bouleau jaune de l'Ouest			1 303	1 523	2 610	3 405		
FO1	Ormaie à frêne noir	21	21	43	44	5est		Sapinière à bouleau blanc de l'Est			678	703	1 046	1 170		
ME1	Pessière noire à peuplier faux-tremble	2	6	3	8	5ouest		Sapinière à bouleau blanc de l'Ouest			637	900	1 042	1 735		
MF1	Frénnaie noire à sapin	41	46	84	103	6est		Pessière à mousses de l'Est			1 251	1 274	1 973	2 521		
MJ1	Bétulaie jaune à sapin et érable à sucre	337	471	747	1 040	6ouest		Pessière à mousses de l'Ouest			780	996	1 188	1 820		
MJ2	Bétulaie jaune à sapin	536	712	1 220	1 537	7est		Pessière à lichens			19	20	32	54		
MS1	Sapinière à bouleau jaune	242	335	469	635			Non déterminé			13	0	29	0		
MS2	Sapinière à bouleau blanc	1 163	1 368	1 955	2 633			Total			7 229	8 674	13 244	17 336		
MS4	Sapinière à bouleau blanc montagnarde	8	8	22	22											
MS6	Sapinière à érable rouge	109	156	199	265											
RB1	Pessière blanche ou cédrière issue d'agriculture	18	35	28	53											
RB2	Pessière blanche maritime	1	1	1	1											
RB5	Pessière blanche issue de broutage	30	39	34	43											
RC3	Cédrrière tourbeuse à sapin	67	77	120	156											
RE1	Pessière noire à lichens	266	321	429	636											
RE2	Pessière noire à mousses ou à éricacées	1 070	1 381	1 733	2 658											
RE3	Pessière noire à sphaignes	394	484	664	1 002											
RE4	Pessière noire à mousse ou éricacées montagnarde	4	4	6	9											
RP1	Pinède blanche ou rouge	87	116	192	238											
RS1	Sapinière à thuja	190	241	386	475											
RS2	Sapinière à épinette noire	1 137	1 338	1 811	2 489											
RS3	Sapinière à épinette noire et sphaignes	131	162	235	330											
RS4	Sapinière à épinette noire montagnarde	8	8	11	15											
RS5	Sapinière à épinette rouge	31	65	71	125											
RT1	Prucheraie	47	64	109	139											
	Non déterminée	289	0	408	0											
Total		7 229	8 674	13 244	17 336											

Tableau 4. Statistiques descriptives des variables explicatives de Natura-2014, mesurées au début des périodes de croissance dans les placettes-échantillons permanentes (groupes d'essences : FI : feuillus intolérants; FT : feuillus tolérants; RI : résineux intolérants; RT : résineux tolérants; SAB : sapin baumier; TBE : tordeuse des bourgeons de l'épinette).

Variable explicative et groupe d'essences	Nombre de périodes	Moyenne	Écart-type	Minimum	Maximum
Temps entre 2 mesurages (années)	17 336	10,4	3,4	3,0	32,0
Hauteur dominante (m)	17 336	16,2	4,0	5,3	31,8
Âge moyen mesuré à une hauteur de 1 m des arbres codominants et dominants (années)	17 336	73	36	12	239
Indice de régularité de Shannon	17 336	0,63	0,13	0	0,93
Indice de réduction de croissance attribuable à la TBE	17 336	0,80	1,22	0	5,69
Température annuelle moyenne (°C)	17 336	1,8	2,0	-4,3	7,3
Précipitations totales annuelles (mm)	17 336	1031	113	724	1 551
Perturbation naturelle partielle dans la période*	17 336	0,14	-	0	1
Perturbation naturelle partielle dans la période précédente*	17 336	0,07	-	0	1
Coupe partielle dans la période précédente*	17 336	0,04	-	0	1
Nombre de tiges marchandes (tiges·ha ⁻¹)					
Total	17 336	854	459	100	3 975
FI	10 181	259	291	0	2 225
FT	7 652	280	229	0	1 475
RI	2 644	288	394	0	2 250
RT	14 275	407	439	0	3 525
SAB	11 847	292	348	0	3 950
Surface terrière marchande (m ² ·ha ⁻¹)					
Total	17 336	18,7	9,3	0,7	60,0
FI	10 181	6,2	6,5	0	50,5
FT	7 652	9,4	8,7	0	52,9
RI	2 644	5,6	6,7	0	38,7
RT	14 275	8,0	7,9	0	56,1
SAB	11 847	5,1	6,2	0	55,8
Volume marchand brut (m ³ ·ha ⁻¹)					
Total	17 336	111,3	74,2	1,0	666,0
FI	10 181	40,5	49,6	0	499,0
FT	7 652	66,0	73,7	0	543,6
RI	2 644	34,7	48,1	0	436,3
RT	14 275	43,7	48,8	0	637,3
SAB	11 847	25,0	33,8	0	306,6

* Variable binaire prenant la valeur de 0 pour indiquer une absence et la valeur de 1 pour indiquer une présence.

d'ajouter deux équations statiques sous forme de contraintes pour le diamètre moyen quadratique et le volume moyen par tige du groupe d'essences.

Une première équation contraint les prévisions du nombre de tiges (Éq. 4) et de la surface terrière (Éq. 5) à tendre vers des valeurs qui, lorsqu'utilisées dans l'équation [7] pour estimer le diamètre moyen quadratique, lui permettent de tendre vers sa valeur observée. La deuxième équation statique est

similaire : elle contraint les prévisions du nombre de tiges (Éq. 4) et du volume (Éq. 6) à tendre vers des valeurs qui, lorsqu'utilisées dans l'équation [8] pour estimer le volume moyen par tige, lui permettent de tendre vers sa valeur observée. Ces contraintes ne pouvaient pas être incluses dans les systèmes d'équations de Natura-2009 puisque les variables qui les définissaient se retrouvaient chacune dans différents systèmes d'équations. Le système complet pour un groupe d'essences pour la version 2014 est :

$$\ln(N_{g2,ij}) = a_1 + a_2 \ln(N_{g1,ij}) + \alpha \mathbf{x}_{ij} + \varepsilon_{N_g,ij} \quad [4]$$

$$\ln(ST_{g2,ij}) = b_1 + b_2 \ln(ST_{g1,ij}) + \beta \mathbf{w}_{ij} + \varepsilon_{ST_g,ij} \quad [5]$$

$$\ln(V_{g2,ij}) = c_1 + c_2 \ln(V_{g1,ij}) + \phi \mathbf{z}_{ij} + \varepsilon_{V_g,ij} \quad [6]$$

$$DQ_{g2,ij} = \sqrt{40000 \times \widehat{ST}_{g2,ij} / 25\pi \widehat{N}_{g2,ij}} \quad [7]$$

$$VT_{g2,ij} = 1000 \times \widehat{V}_{g2,ij} / 25\widehat{N}_{g2,ij} \quad [8]$$

où

$N_{g2,ij}$: nombre de tiges marchandes (tiges/400 m²) du groupe d'essences g , mesurées sur la placette i à la fin de la période j ,

$ST_{g2,ij}$: surface terrière marchande (m²/ha) du groupe d'essences g , mesurée sur la placette i à la fin de la période j ,

$V_{g2,ij}$: volume marchand brut (m³/ha) du groupe d'essences g , mesuré sur la placette i à la fin de la période j ,

$DQ_{g2,ij}$: diamètre moyen quadratique (cm) du groupe d'essences g , mesuré sur la placette i à la fin de la période j ,

$VT_{g2,ij}$: volume moyen par tige (dm³/tige) du groupe d'essences g , mesuré sur la placette i à la fin de la période j ,

$N_{g1,ij}$: nombre de tiges marchandes (tiges/400 m²) du groupe d'essences g , mesurées sur la placette i au début de la période j ,

$ST_{g1,ij}$: surface terrière marchande (m²/ha) du groupe d'essences g , mesurée sur la placette i au début de la période j ,

$V_{g1,ij}$: volume marchand brut (m³/ha) du groupe d'essences g , mesuré sur la placette i au début de la période j ,

$\widehat{N}_{g2,ij}$, $\widehat{ST}_{g2,ij}$ et $\widehat{V}_{g2,ij}$: valeurs estimées par les équations [4], [5] et [6] respectivement,

a_1 , a_2 , b_1 , b_2 , c_1 , c_2 , α , β et ϕ : paramètres à estimer,

$\mathbf{x}_{ij}$, $\mathbf{w}_{ij}$ et $\mathbf{z}_{ij}$: vecteurs de variables explicatives mesurées dans la placette i au début de la période j , et

$\varepsilon_{N_g,ij}$, $\varepsilon_{ST_g,ij}$ et $\varepsilon_{V_g,ij}$: erreurs résiduelles des équations [4] à [6] respectivement,

$(\varepsilon_{N_g,ij}, \varepsilon_{ST_g,ij}, \varepsilon_{V_g,ij})^T \sim N(0, \Sigma)$, où Σ est la matrice de covariances entre les erreurs des équations.

Nous avons étalonné le système d'équations séparément pour chacun des cinq groupes d'essences avec la méthode SUR (*Seemingly Unrelated Regression*) de la procédure MODEL de SAS/ETS® 13.1 (SAS Institute Inc. 2013b). Les équations détaillées du changement temporel du nombre de tiges marchandes, de la surface terrière marchande et du volume marchand brut de chacun des groupes d'essences sont présentées à l'annexe 2. Les estimations de chacun de leurs paramètres sont disponibles sur demande auprès de l'auteure, sous la forme d'un chiffrier Excel.

2.5.4 Nouvel étalonnage des équations

Pour étalonner l'ensemble des équations de prévision de la version 2014 de Natura, nous avons estimé de nouveaux paramètres pour chacune des équations de la version 2009 par un nouvel étalonnage (Weiskittel *et al.* 2011). À l'aide de graphiques, nous avons ensuite analysé les résidus (valeur observée moins valeur prédite) en fonction des variables explicatives absentes des équations pour vérifier si des variables explicatives supplémentaires étaient nécessaires. Une à une, nous avons ajouté les variables présentant une relation avec les résidus et retenu celles qui étaient significatives au seuil de 5 %. Pour finir, nous avons enlevé des équations les variables qui n'étaient plus significatives à la suite de l'ajout de nouvelles variables explicatives. Nous avons au préalable vérifié la multicolinéarité entre les variables explicatives disponibles. Le fait que la valeur de la statistique VIF d'aucune des variables soit supérieure à 10 indique l'absence de problème majeur de multicolinéarité.

2.5.5 Évaluation du modèle

Nous avons évalué les prévisions des versions 2009 et 2014 du modèle Natura selon une approche de validation croisée (Efron et Gong 1983). Pour ce faire, nous avons divisé aléatoirement les placettes de chacun des jeux de données en 10 groupes afin d'étalonner les équations 10 fois, en retirant un groupe différent à chaque occasion. Les prévisions du groupe retiré ont été obtenues en utilisant les

estimations des paramètres des équations étalonnées à partir des 9 autres groupes de placettes.

Le processus d'évaluation comporte plusieurs étapes. Premièrement, nous avons utilisé la 1^{re} mesure de chaque placette pour représenter le peuplement initial et nous avons estimé les changements temporels de ses caractéristiques pour la 1^{re} période de croissance en respectant le nombre d'années entre les 2 premières mesures de chaque placette. La différence entre les observations et les prévisions de la 2^e mesure servent à évaluer le 1^{er} pas de simulation. Ensuite, nous avons utilisé les prévisions du 1^{er} pas de simulation dans les équations pour estimer le changement temporel durant la 2^e période, et la différence entre les observations et les prévisions de la 3^e mesure pour évaluer le 2^e pas de simulation. Ce processus a été répété jusqu'à l'obtention de prévisions pour toutes les mesures d'une placette. Le modèle a donc pu être évalué après 1, 2, 3 et 4 pas de simulation, ce qui correspond approximativement à des horizons de 10, 20, 30 et 40 ans.

Les statistiques calculées pour évaluer les deux versions du modèle sont le biais, la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (REQM) et le coefficient de détermination (R^2) :

$$\text{biais} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i) \quad [9]$$

$$\text{REQM} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad [10]$$

$$R^2 = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \right] \quad [11]$$

où

y_i : valeur observée d'une variable,

$\hat{y}_i$: valeur prédite,

$\bar{y}$: moyenne des y_i , et

n : nombre d'observations.

Le biais est un écart systématique des prévisions par rapport à la valeur observée, tandis que la REQM et le R^2 sont des mesures de l'exactitude (une combinaison du biais et de la précision), et représentent le degré auquel les prévisions se rapprochent de

la réalité (Pretzsch 2009). Un biais négatif indique que le modèle surestime, en moyenne, la valeur observée, tandis qu'un biais positif indique une sous-estimation.

Nous avons estimé le biais, la REQM et le R^2 des prévisions de la hauteur dominante, de l'indice de Shannon, du nombre total de tiges marchandes, de la surface terrière marchande totale, du volume marchand brut total, du diamètre moyen quadratique et du volume moyen par tige, pour chaque version du modèle, végétation potentielle et horizon de simulation. Nous avons aussi calculé le biais des prévisions de la surface terrière des 3 groupes d'essences les plus abondants de chaque végétation potentielle pour chaque version du modèle, végétation potentielle et horizon de simulation. Nous avons calculé le biais, la REQM et le R^2 pour des groupes d'au moins 30 observations.

Nous avons aussi évalué les prévisions de la surface terrière du sapin baumier pour chaque décennie de la mesure du début de la période de croissance. Pour ce faire, nous avons estimé, avec les deux versions de Natura, le changement temporel en volume de chacune des périodes de croissance indépendamment de la période précédente, et calculé le biais des prévisions par décennie. On élimine ainsi l'accumulation des erreurs d'une période de croissance à l'autre, et l'on peut évaluer les prévisions du sapin en période épidémique (décennies 1970 et 1980) et en période non épidémique (décennie 1990).

Nous avons également évalué les prévisions des deux versions de Natura en regroupant les placettes en fonction de différents types de forêts, tels que définis dans le tableau 1 de Poulin (2013b). Les types de forêts retenus pour l'analyse sont ceux pour lesquels Natura est le modèle utilisé pour simuler l'évolution dans le calcul des possibilités forestières (Tableau 1 de Poulin 2013a). Nous avons retenu les placettes provenant de types de forêts dont les groupes dominants étaient composés d'une seule essence, afin d'évaluer la capacité d'un modèle à estimer le volume d'une essence individuelle à l'échelle du groupe d'essences.

Ainsi, nous avons évalué le biais relatif des prévisions du volume du groupe FI dans les types de forêts dont l'appellation contient le bouleau à papier (*Betula papyrifera* Marsh.) ou les peupliers (*Populus balsamifera* L., *Populus deltoides* W. Bartram, *Populus grandidentata* Michx, *Populus tremuloides* Michx); du groupe RI dans celles dont l'appellation contient le

pin gris (*Pinus banksiana* Lamb.); du groupe RT dans celles dont l'appellation contient l'épinette blanche (*Picea glauca* [Moench] Voss), l'épinette rouge (*Picea rubens* Sarg.) ou l'épinette noire (*Picea mariana* [Mill.] B.S.P.); et du groupe SAB où le sapin baumier se retrouve dans l'appellation (Tableau 5).

3. Résultats

Comparativement à la version de 2009, 2 fois plus de placettes ont maintenant 3 périodes, c'est-à-dire 4 mesurages, et 3 fois plus de placettes ont 4 périodes, c'est-à-dire 5 mesurages (Tableau 1). L'ajout des mesurages du 4^e inventaire écoforestier des PEP a permis d'ajouter plus de 4 000 périodes de croissance dans l'étalonnage de Natura-2014, soit 31 % de plus que pour Natura-2009 (Tableau 2). Les plus vieilles périodes de croissance, dont la fin est mesurée de 1970 à 1989, ont maintenant un poids relatif plus faible (33 %) que dans le jeu de données de 2009 (41 %). De même, les périodes plus récentes (2000 à 2012) ont un poids relatif plus grand (37 % en 2014 et 27 % en 2009, tableau 2). La majorité des variables explicatives présentes dans la version 2009 le sont encore dans la version 2014 (Tableau 6). Au terme de la mise à jour, certaines variables qui n'apparaissaient pas du tout dans la version 2009 ont été intégrées aux équations. Pour le changement temporel du nombre de tiges marchandes, il s'agit

de la surface terrière du groupe d'essences, du nombre total de tiges marchandes, de la végétation potentielle et de la température annuelle moyenne. Pour les équations du changement temporel de la surface terrière marchande, ce sont plutôt la végétation potentielle, les précipitations totales annuelles, l'occurrence d'une perturbation naturelle légère dans la période précédente et l'occurrence d'une coupe partielle dans la période précédente. Cinq variables ne sont plus nécessaires pour estimer le changement temporel de la surface terrière de l'un ou l'autre des groupes d'essences (Tableau 6). Les variables explicatives des équations de prévision du changement temporel du volume marchand brut dans la version 2014 sont les mêmes que celles de la version 2009, en plus de la végétation potentielle.

3.1 Modèle de croissance

3.1.1 Évaluation du modèle par végétation potentielle, toutes essences confondues

3.1.1.1 Hauteur dominante et indice de Shannon

Les biais relatifs de la prévision de la hauteur dominante et de l'indice de Shannon avec Natura-2014 sont semblables à ceux obtenus avec Natura-2009 (Figure 2). Pour la hauteur dominante, ils sont

Tableau 5. Types de forêts dans lesquels les groupes d'essences sont évalués en fonction du grand type de forêts et de l'essence visée.

Groupe d'essences évalué	Essence visée	Grand type de forêts				
		Bétulaie blanche	Peupleraie	Pinède grise	Pessière	Sapinière
Feuillus intolérants (FI)	Bouleau à papier	Bp, BpFi, BpFt, BpRx				SbBp
	Peupliers		Pe, PeFi, PeRx			
Résineux intolérants (RI)	Pin gris			Pg, PgEpx, PgFx	EnPg	
Résineux tolérants (RT)	Épinette blanche				Eb	SbEb
	Épinette rouge				Eu	
	Épinette noire			PgEpx	En, EnSb, EnPg, EnFx, EpxFx	SbEpx
Sapin baumier (SAB)	Sapin baumier				EnSb	Sb, SbEb, SbEpx, SbBp

Note : Bp : bétulaie blanche pure; BpFi : bétulaie blanche à feuillus intolérants; BpFt : bétulaie blanche à feuillus tolérants; BpRx : bétulaie blanche à résineux; Pe : peupleraie pure; PeFi : peupleraie à feuillus intolérants; PeRx : peupleraie à résineux; Pg : pinède grise pure; PgEpx : pinède grise à épinette; PgFx : pinède grise à feuillus; Eb : pessière blanche pure; Eu : pessière rouge pure; En : pessière noire pure; EnSb : pessière noire à sapin; EnPg : pessière noire à pin gris; EnFx : pessière noire à feuillus; EpxFx : pessière à feuillus; Sb : sapinière pure; SbEb : sapinière à épinette blanche; SbEpx : sapinière à épinette; SbBp : sapinière à bouleau blanc.

Tableau 6. Comparaison des variables explicatives dans les versions 2009 et 2014 de Natura, pour les équations estimant les changements temporels du nombre de tiges marchandes et de la surface terrière marchande des 5 groupes d'essences (FI : feuillus intolérants; FT : feuillus tolérants; RI : résineux intolérants; RT : résineux tolérants; SAB : sapin baumier; ○ : variable présente dans les 2 versions; X : variable présente dans la version 2009 qui n'est plus présente dans la version 2014; ● : nouvelle variable dans la version 2014).

Variable explicative*	Nombre de tiges marchandes					Surface terrière marchande				
	FI	FT	RI	RT	SAB	FI	FT	RI	RT	SAB
N_g	○	○	○	○	○	○	○	X	○	○
ST_g	●	●	●	●		○	○	○	○	○
HD	○	○	○	○	○			○	○	○
Age	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
SD	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
ST_g / ST_{Tot}	○					○	○	○	●	X
$Drai$								X		
Δt	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
TBE	○			○	○	○	●		○	○
$Perturb$	●		○	○	●	○	●	○	○	
EPX									X	
PIR								X		
$NTot$	●	●	●	●						
VP	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
$TMoy$	●									
$PTot$								●		
$ApresP$						●	●			
$ApresC$							●		●	

* N_g : nombre de tiges marchandes du groupe d'essences g ; ST_g : surface terrière marchande du groupe d'essences g ; HD : hauteur dominante; Age : âge moyen des arbres codominants et dominants de la placette; SD : sous-domaine bioclimatique; ST_g / ST_{Tot} : rapport entre la surface terrière marchande du groupe d'essences g et la surface terrière marchande totale; $Drai$: classe de drainage; Δt : nombre d'années dans la période; TBE : indice de réduction de la croissance attribuable à la tordeuse des bourgeons de l'épinette; $Perturb$: occurrence d'une perturbation naturelle légère dans la période; EPX : variable indicatrice signalant que la surface terrière de l'épinette blanche, de l'épinette rouge, du thuya ou de la pruche représente plus de 50 % de la surface terrière totale de la placette; PIR : variable indicatrice signalant que la surface terrière du pin rouge représente plus de 20 % de la surface terrière totale de la placette; $NTot$: nombre total de tiges marchandes; VP : végétation potentielle; $TMoy$: température annuelle moyenne; $PTot$: précipitations totales annuelles; $ApresP$: occurrence d'une perturbation naturelle légère dans la période précédente; $ApresC$: occurrence d'une coupe partielle dans la période précédente.

généralement inférieurs à 6 % en valeur absolue, sauf dans les pinèdes blanches ou rouges (végétation potentielle RP1) où la valeur du biais relatif atteint 11 % après 30 ans. Les biais relatifs des prévisions de l'indice de Shannon sont généralement inférieurs à 5 % en valeur absolue (Figure 2). Les valeurs de la REQM (Figure 3) des 2 caractéristiques sont semblables dans les 2 versions de Natura, tandis que l'on remarque certains écarts entre les 2 versions dans les valeurs de R^2 pour un horizon de 30 ans (Figure 4). Par exemple, les valeurs de R^2 se sont améliorées dans la version 2014 pour l'indice de Shannon sur les végétations potentielles FE et pour la hauteur dominante sur les végétations potentielles RE.

3.1.1.2 Surface terrière marchande, volume marchand brut et nombre de tiges marchandes

Les biais relatifs des prévisions de la surface terrière marchande, du volume marchand brut et du nombre de tiges marchandes, toutes essences confondues, sont généralement semblables pour Natura-2014 et Natura-2009, avec des différences de biais relatifs en valeur absolue dépassant rarement 5 % sur un horizon de 30 ans (Figure 2). Toutefois, sur la végétation potentielle RP1 et sur un horizon de 20 ans, le biais relatif du volume marchand obtenu avec Natura-2014 a diminué de plus de 12 % par rapport à celui de Natura-2009. Sur les végétations potentielles pour

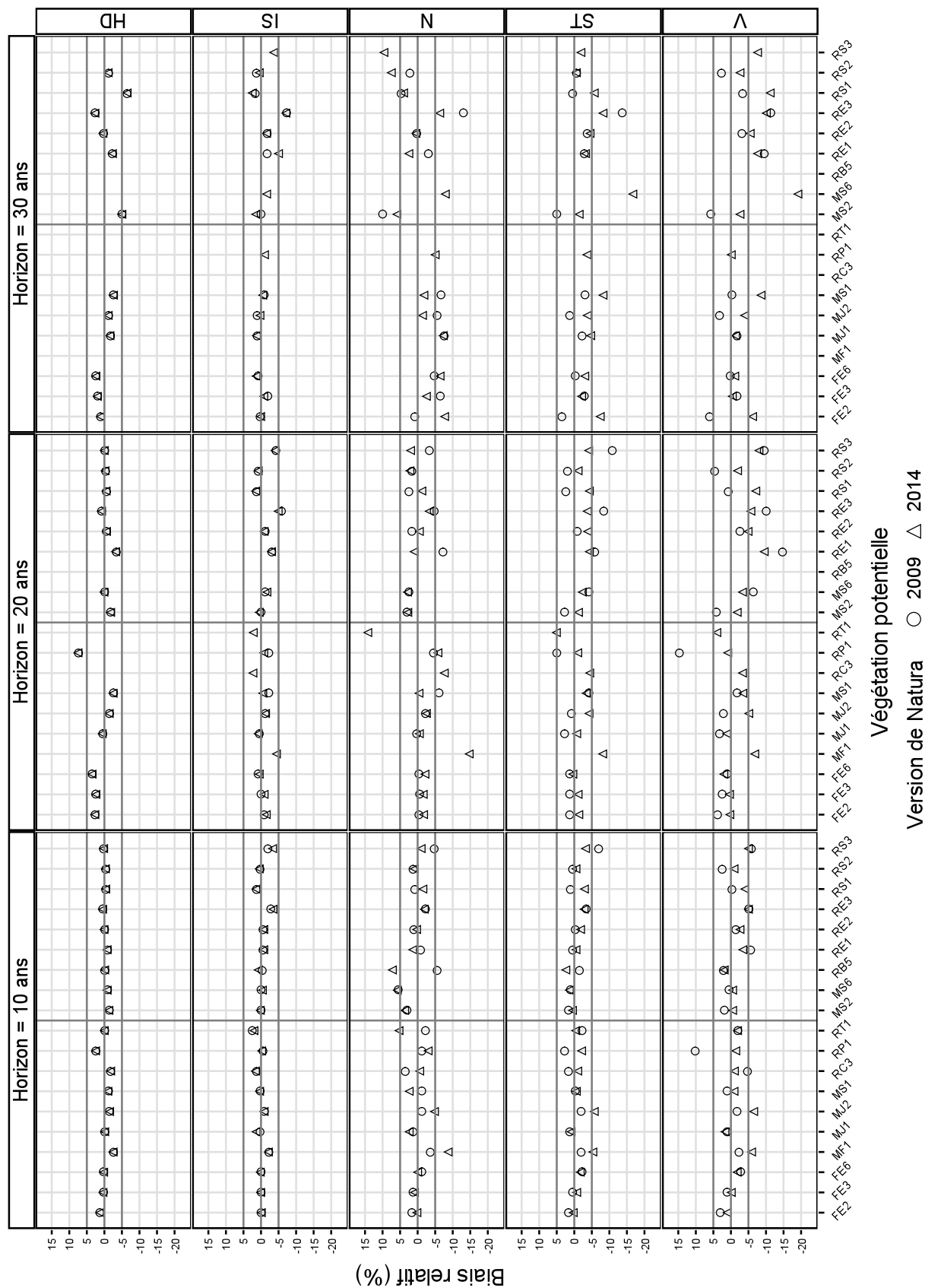


Figure 2. Comparaison du biais relatif des versions 2009 et 2014 de Natura pour la hauteur dominante (HD), l'indice de Shannon (IS), le nombre de tiges marchandes (N), la surface terrière marchande (ST) et le volume marchand brut (V), toutes essences confondues, par végétation potentielle et horizon de simulation. Les végétations potentielles à droite de la ligne verticale sont celles pour lesquelles Natura est utilisé par le Bureau du forestier en chef.

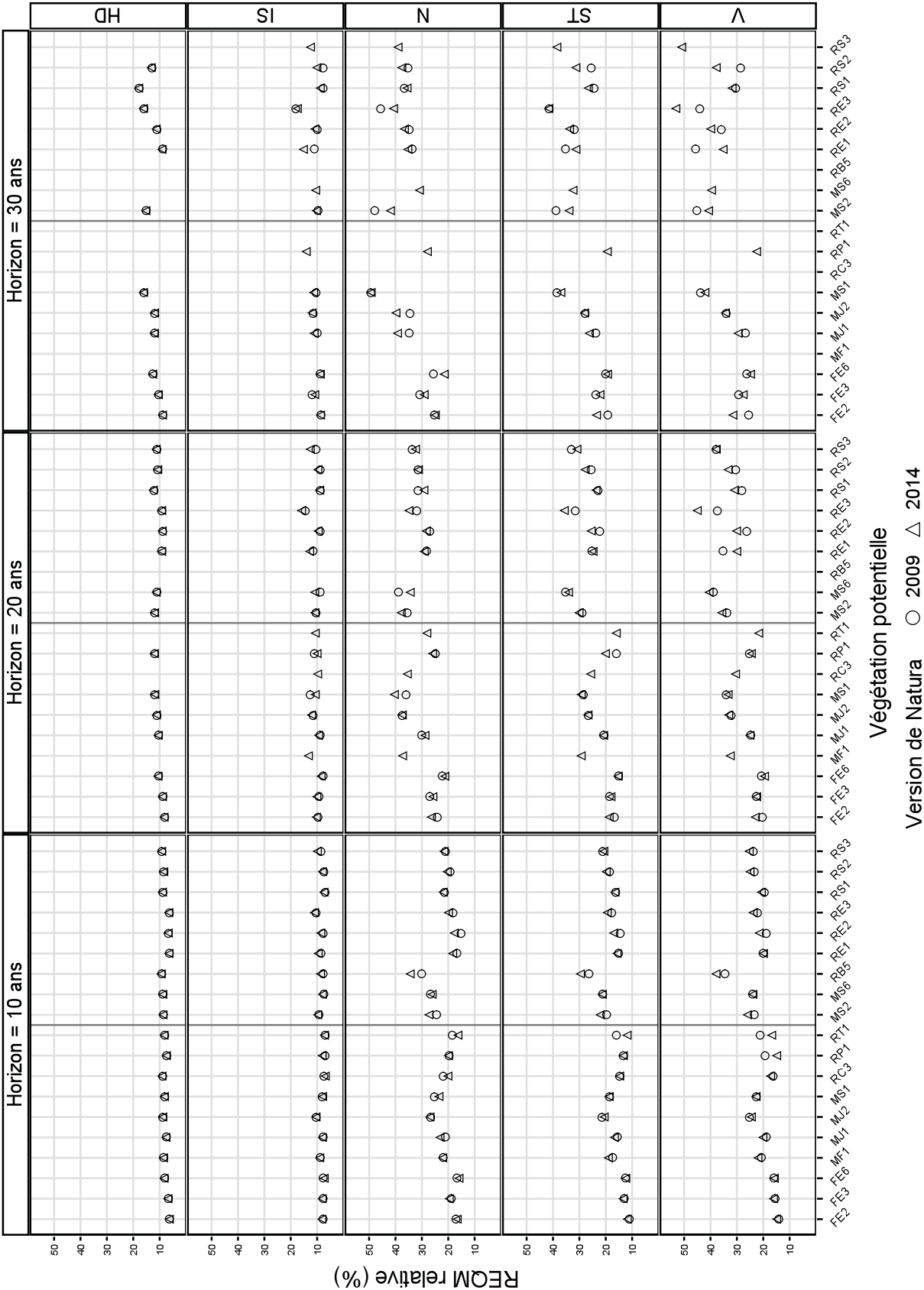


Figure 3. Comparaison de la valeur relative de la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (REQM) des versions 2009 et 2014 de Natura pour la hauteur dominante (HD), l'indice de Shannon (IS), le nombre de tiges marchandes (N), la surface terrière marchande (ST) et le volume marchand brut (V), toutes essences confondues, par végétation potentielle et horizon de simulation. Les végétations potentielles à droite de la ligne verticale sont celles pour lesquelles Natura est utilisé par le Bureau du forestier en chef.

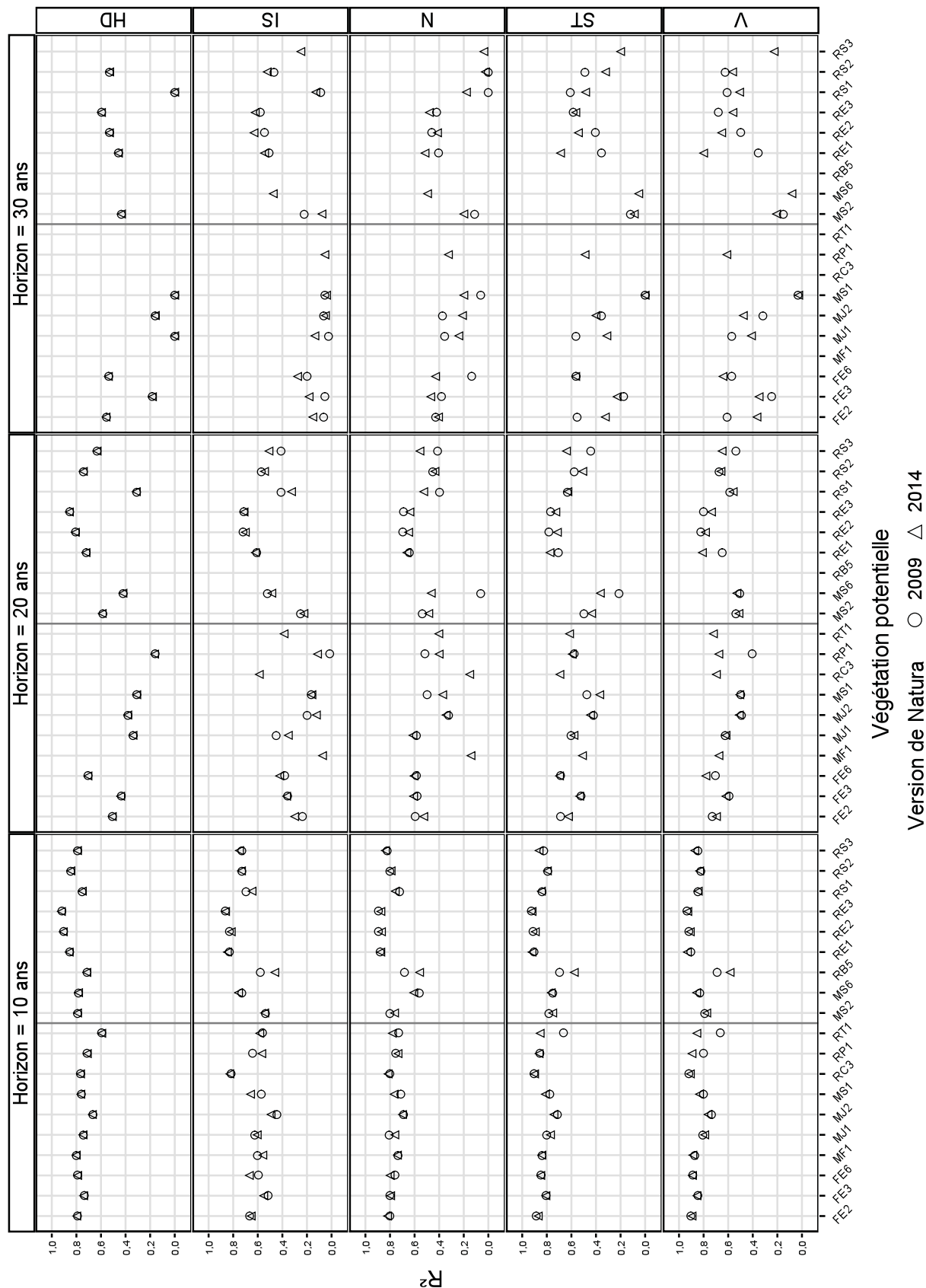


Figure 4. Comparaison du R^2 des versions 2009 et 2014 de Natura pour la hauteur dominante (HD), l'indice de Shannon (IS), le nombre de tiges marchandes (N), la surface terrière marchande (ST) et le volume marchand brut (V), toutes essences confondues, par végétation potentielle et horizon de simulation. Les végétations potentielles à droite de la ligne verticale sont celles pour lesquelles Natura est utilisé par le Bureau du forestier en chef.

lesquelles Natura est utilisé par le BFEC (Figure 2, à droite de la ligne verticale; voir aussi Poulin 2013a) et sur un horizon de 30 ans, les biais relatifs de la version 2014 sont semblables ou inférieurs, en valeur absolue, à ceux de la version 2009 (MS2 et les végétations potentielles RE), et semblables ou supérieurs, en valeur absolue, à ceux de la version 2009 (végétations potentielles RS; figure 2). Les valeurs de la REQM relative de la surface terrière marchande, du volume marchand brut et du nombre de tiges marchandes sont généralement semblables dans les 2 versions, avec des écarts d'environ $\pm 5\%$ (Figure 3). Dans quelques cas, la REQM relative pour un horizon de 30 ans a diminué avec Natura-2014 pour les 3 variables réponses, comme sur les végétations potentielles FE3, FE6 et MS2. En termes de R^2 , les écarts entre les 2 versions sont souvent supérieurs à $\pm 5\%$ (Figure 4). Pour un horizon de 30 ans, ils atteignent même, avec Natura-2014, une augmentation de plus de 30 % pour la surface terrière et le volume sur la végétation potentielle RE1, et une diminution de plus de 20 % pour la surface terrière et le volume sur la végétation potentielle FE2.

3.1.1.3 Diamètre moyen quadratique et volume moyen par tige

Pour le diamètre moyen quadratique, les valeurs de la REQM relative et du R^2 se sont améliorées avec Natura-2014 pour les 6 végétations potentielles sur lesquelles Natura est utilisé par le BFEC (MS2, RE1, RE2, RE3, RS1, RS2; gains de 4 à 46 % pour le R^2 et de 0 à 3 % pour la REQM relative). Le biais relatif a légèrement augmenté sur ces végétations potentielles avec la version 2014, et ce, de façon plus marquée (écarts de 3 à 8 %) pour le volume moyen par tige que pour le diamètre moyen quadratique pour ces mêmes végétations potentielles (Figure 5a). Les valeurs relatives de la REQM se sont améliorées avec Natura-2014 sur 3 des 6 végétations potentielles sur lesquelles Natura est utilisé par le BFEC (Figure 5b), tandis que le R^2 s'est amélioré pour 5 de ces 6 végétations potentielles (gain de 3 à 54 %, figure 5c).

3.1.2 Évaluation de la surface terrière marchande des groupes d'essences par végétation potentielle

Les différences entre les 2 versions de Natura pour les biais relatifs des prévisions de la surface terrière marchande des 3 groupes d'essences principaux de chaque végétation potentielle sont généralement

inférieures à 5 % en valeur absolue, sauf pour certains groupes d'essences de certaines végétations potentielles (Tableau 7). En particulier, les biais relatifs des groupes d'essences principaux FT et RT sont généralement plus petits en valeur absolue avec Natura-2014, sauf sur la végétation potentielle MJ1 pour le groupe FT et sur RE1 et RE2 pour le groupe RT. On note une réduction du biais relatif de plus de 5 % pour le plus long horizon avec Natura-2014 sur les végétations potentielles RE3, RP1, RS1 et RS3 pour le groupe principal RT. Pour le groupe principal SAB, Natura-2014 surestime la surface terrière du sapin sur un horizon de 20 et 30 ans sur les végétations potentielles MS2 et MS6, tandis que Natura-2009 la sous-estime. Pour les groupes d'essences secondaires, les plus grandes différences de biais relatifs sont observées sur la végétation potentielle MS1 pour le groupe FI (diminution de 23 % avec Natura-2014) et sur RS1 (augmentation de 9 %). Pour le groupe secondaire RT, le biais relatif a diminué de 9 % sur la végétation potentielle FE6 et de 19 % sur MS6 avec Natura-2014; pour le groupe SAB, il a augmenté de 20 % sur MJ1, et diminué de 14 % sur RS3.

Malgré des biais en valeur absolue généralement semblables pour les 2 versions de Natura, les biais relatifs demeurent assez grands pour certains groupes d'essences avec Natura-2014. En particulier, sur l'horizon le plus long, la surface terrière du groupe FI comme 2^e groupe d'essences est surestimée de 12 à 15 % sur les végétations potentielles FE2, RP1 et RS1, la surface terrière du groupe RT comme 3^e groupe d'essences est surestimée de 26 % sur FE3, et celle du sapin est surestimée de 16 à 25 % sur MJ1, MJ2, MS1, RC3, RS1 et RS3 (Tableau 7). Pour le groupe RI, le 2^e en importance sur les végétations potentielles RE1 et RE2, la surface terrière est surestimée de 5 et de 10 %, respectivement, après 30 ans (Tableau 7).

Les 2 versions de Natura surestiment la surface terrière du sapin baumier lorsque la mesure du début de la période de croissance était dans les années 1970, à l'exception de quelques végétations potentielles pour la version 2009 (Tableau 8). Lorsque le début de la période se situe dans les années 1980, Natura-2009 sous-estime généralement la surface terrière de sapin dans les végétations potentielles mixtes et surestime celles à dominance résineuse, tandis que Natura-2014 surestime le volume de sapin dans toutes les végétations potentielles. Lorsque le début de la période se situe dans les années 1990, les 2 versions de Natura sous-estiment la surface

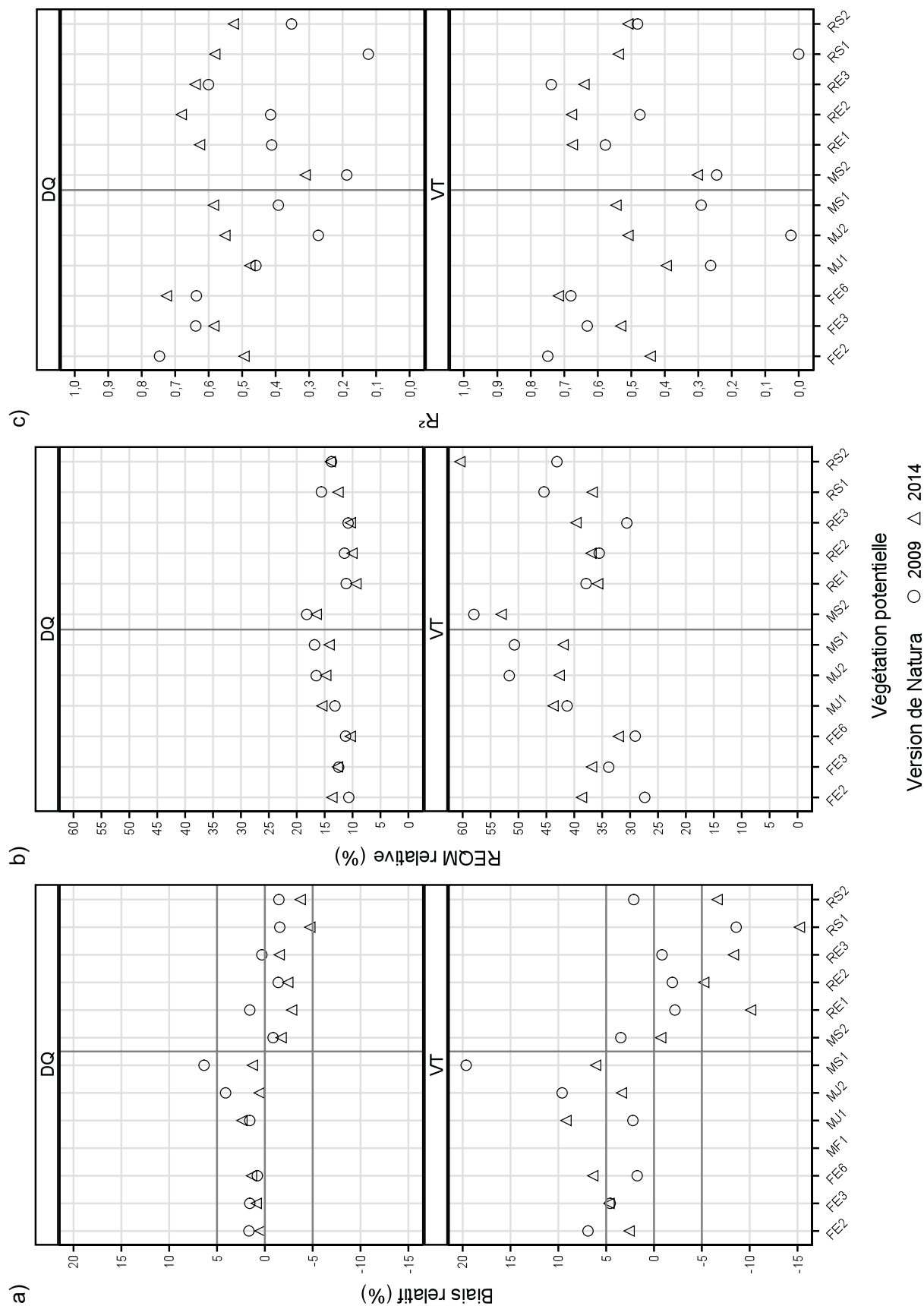


Figure 5. Comparaison du biais relatif (a), de la valeur relative de la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (REQM, [b]) et du R^2 (c), des versions 2009 et 2014 de Natura pour le diamètre moyen quadratique (DQ) et le volume moyen par tige (VT), toutes essences confondues, par végétation potentielle et sur un horizon de 30 ans. Les végétations potentielles à droite de la ligne verticale sont celles pour lesquelles Natura est utilisé par le Bureau du forestier en chef.

Tableau 7. Comparaison des biais des prévisions de la surface terrière marchande (ST) obtenues avec les versions 2009 et 2014 de Natura pour les 3 groupes d'essences les plus abondants (> 3 m²/ha), par végétation potentielle (VP), en fonction de l'horizon de simulation (n : nombre de périodes de croissance; FI : feuillus intolérants; FT : feuillus tolérants; RI : résineux intolérants; RT : résineux tolérants; SAB : sapin baumier).

VP	Version de Natura	Horizon	n	Groupe d'essences 1			Groupe d'essences 2			Groupe d'essences 3		
				ST moyenne observée (m²/ha)	Biais du modèle		ST moyenne observée (m²/ha)	Biais du modèle		ST moyenne observée (m²/ha)	Biais du modèle	
					Absolu (m²/ha)	(Relatif)		Absolu (m²/ha)	(Relatif)		Absolu (m²/ha)	(Relatif)
FE2	2014	10 ans	281	18,9	0,2	(1,1 %)	4,7	-0,1	(-1,5 %)	3,6	-0,1	(-3,6 %)
		20 ans	162	20,8	-0,1	(-0,4 %)	5,0	0,0	(0,0 %)	3,5	-0,3	(-8,1 %)
		30 ans	82	21,7	-1,0	(-4,5 %)	4,7	-0,7	(-15,3 %)			
	2009	10 ans	203	19,0	0,6	(3,2 %)	4,8	-0,0	(-0,1 %)	3,3	-0,3	(-8,3 %)
		20 ans	116	20,9	0,7	(3,4 %)	5,1	0,1	(1,3 %)	3,9	-0,5	(-13,7 %)
		30 ans	40	22,0	1,7	(7,6 %)						
FE3	2014	10 ans	838	17,9	0,1	(0,4 %)	6,6	-0,1	(-0,7 %)	3,2	-0,3	(-8,0 %)
		20 ans	517	19,7	0,3	(1,6 %)	6,8	-0,3	(-4,5 %)	3,3	-0,6	(-16,4 %)
		30 ans	304	20,7	0,3	(1,6 %)	7,7	-0,7	(-8,9 %)	3,4	-0,9	(-25,8 %)
	2009	10 ans	554	17,9	0,4	(2,4 %)	6,8	0,1	(1,3 %)	3,2	-0,2	(-5,5 %)
		20 ans	303	19,4	0,9	(4,7 %)	7,4	0,4	(4,8 %)	3,2	-0,6	(-17,3 %)
		30 ans	146	21,3	0,4	(1,7 %)	6,1	-0,7	(-10,6 %)	3,2	-0,9	(-28,1 %)
FE6	2014	10 ans	195	11,9	-0,1	(-0,5 %)	10,0	-0,1	(-1,4 %)	4,0	-0,1	(-2,8 %)
		20 ans	125	13,3	0,1	(0,5 %)	10,8	0,4	(3,5 %)	4,8	-0,1	(-1,2 %)
		30 ans	87	13,9	-0,4	(-2,7 %)	10,6	-0,2	(-1,8 %)	4,7	0,1	(2,7 %)
	2009	10 ans	141	11,8	-0,3	(-2,7 %)	10,5	0,3	(2,5 %)	3,5	-0,3	(-8,2 %)
		20 ans	82	13,4	-0,1	(-0,7 %)	11,1	0,7	(6,4 %)	3,2	-0,3	(-10,7 %)
		30 ans	54	13,4	-0,5	(-3,6 %)	12,3	0,6	(4,6 %)			
MF1	2014	10 ans	74	8,0	-0,2	(-3,0 %)	7,4	-0,5	(-6,4 %)	5,6	0,1	(1,4 %)
		20 ans	44	11,2	0,1	(0,7 %)	7,0	-0,6	(-7,9 %)	5,7	0,4	(6,7 %)
	2009	10 ans	48	8,5	-0,1	(-1,6 %)	6,4	-0,1	(-1,1 %)	6,0	-0,1	(-0,8 %)
MJ1	2014	10 ans	497	10,7	0,2	(1,7 %)	5,2	-0,0	(-0,2 %)	5,2	0,2	(3,1 %)
		20 ans	317	11,8	0,3	(2,6 %)	5,7	-0,6	(-11,1 %)	5,8	0,3	(4,9 %)
		30 ans	203	11,9	0,3	(2,2 %)	5,9	-1,2	(-21,0 %)	6,0	-0,1	(-0,9 %)
	2009	10 ans	335	10,3	-0,0	(-0,1 %)	5,2	0,2	(4,4 %)	5,4	0,3	(5,5 %)
		20 ans	202	11,1	-0,2	(-1,9 %)	6,0	0,6	(10,7 %)	6,0	0,5	(8,1 %)
		30 ans	57	13,5	-0,0	(-0,2 %)	4,4	-0,0	(-0,6 %)	6,6	0,3	(5,2 %)
MJ2	2014	10 ans	740	6,9	-0,1	(-1,0 %)	6,9	0,1	(0,7 %)	4,3	-0,9	(-21,8 %)
		20 ans	466	7,1	0,1	(1,2 %)	8,1	0,7	(8,1 %)	4,3	-1,3	(-30,2 %)
		30 ans	311	7,8	0,3	(3,9 %)	7,8	0,1	(1,6 %)	4,9	-1,0	(-19,3 %)
	2009	10 ans	514	6,7	-0,1	(-1,3 %)	7,5	0,1	(1,6 %)	4,2	-0,1	(-3,2 %)
		20 ans	282	6,8	-0,1	(-1,4 %)	8,2	0,2	(2,5 %)	4,4	0,3	(7,4 %)
		30 ans	149	7,2	-0,5	(-6,5 %)	8,3	-0,4	(-5,0 %)	4,8	1,3	(26,2 %)
MS1	2014	10 ans	341	8,2	0,0	(0,4 %)	6,9	0,0	(0,3 %)	6,0	-0,2	(-2,6 %)
		20 ans	181	7,5	-0,8	(-11,0 %)	7,4	0,4	(5,2 %)	6,5	-0,2	(-2,5 %)
		30 ans	107	7,3	-1,4	(-19,7 %)	7,5	-0,1	(-1,2 %)	6,4	-0,6	(-8,9 %)
	2009	10 ans	240	8,0	-0,3	(-3,7 %)	7,4	0,5	(6,0 %)	6,1	-0,2	(-2,6 %)
		20 ans	102	7,8	-1,1	(-14,6 %)	7,6	0,8	(10,9 %)	6,1	-0,5	(-8,2 %)
		30 ans	45	8,1	-1,8	(-21,6 %)	8,1	2,0	(24,2 %)	5,7	-0,7	(-11,7 %)
MS2	2014	10 ans	1411	9,3	0,3	(3,6 %)	9,0	0,0	(0,1 %)	4,8	-0,2	(-3,6 %)
		20 ans	782	7,6	-0,6	(-8,0 %)	10,7	0,7	(6,7 %)	4,7	-0,3	(-7,3 %)
		30 ans	453	8,2	-0,4	(-4,6 %)	10,5	0,6	(5,7 %)	5,4	-0,4	(-6,9 %)
	2009	10 ans	1080	10,9	0,5	(4,7 %)	8,8	0,1	(1,6 %)	4,8	-0,2	(-3,9 %)
		20 ans	470	8,5	0,3	(3,0 %)	10,5	0,8	(7,7 %)	4,8	-0,2	(-5,1 %)
		30 ans	159	8,3	0,7	(8,2 %)	10,1	0,9	(8,8 %)	5,3	-0,3	(-5,4 %)

Tableau 7. (suite)

VP	Version de Natura	Horizon	n	Groupe d'essences 1			Groupe d'essences 2			Groupe d'essences 3		
				ST moyenne observée (m ² /ha)	Biais du modèle		ST moyenne observée (m ² /ha)	Biais du modèle		ST moyenne observée (m ² /ha)	Biais du modèle	
					Absolu (m ² /ha)	(Relatif)		Absolu (m ² /ha)	(Relatif)		Absolu (m ² /ha)	(Relatif)
MS6	2014	10 ans	158	7,9	0,1	(1,5 %)	8,1	0,1	(1,7 %)	4,8	0,1	(3,0 %)
		20 ans	70	8,1	-0,6	(-7,8 %)	7,9	0,1	(1,4 %)	4,9	0,1	(0,9 %)
		30 ans	32				8,5	-0,8	(-9,9 %)			
	2009	10 ans	112	7,8	0,5	(6,8 %)	8,6	-0,1	(-1,0 %)	5,0	-0,2	(-3,4 %)
		20 ans	44	8,0	0,9	(11,7 %)	9,1	-0,8	(-8,3 %)	5,2	-1,1	(-20,3 %)
RB5	2014	10 ans	75	12,9	0,3	(2,5 %)	10,9	0,3	(2,6 %)	4,5	0,2	(4,6 %)
		20 ans	51	14,8	-0,2	(-1,3 %)	9,7	-0,3	(-3,3 %)			
		30 ans										
RC3	2014	10 ans	82	22,4	0,0	(0,1 %)	4,0	-0,2	(-5,2 %)	4,4	-0,2	(-4,3 %)
		20 ans	39	20,7	-0,2	(-0,9 %)	4,1	-0,7	(-16,1 %)			
		30 ans	66	22,4	1,2	(5,1 %)	3,9	-0,7	(-16,8 %)	3,9	-0,2	(-3,9 %)
	2009	10 ans										
RE1	2014	10 ans	321	6,4	0,0	(0,6 %)	4,9	-0,1	(-2,1 %)			
		20 ans	189	7,0	-0,1	(-1,7 %)	5,0	-0,5	(-9,3 %)			
		30 ans	103	7,1	-0,1	(-2,0 %)	5,1	-0,2	(-4,7 %)			
	2009	10 ans	245	6,6	0,0	(0,5 %)	5,2	0,1	(1,0 %)			
		20 ans	108	7,6	-0,4	(-4,6 %)	4,9	-0,3	(-6,8 %)			
		30 ans	36	6,5	0,0	(0,0 %)						
RE2	2014	10 ans	1393	12,6	-0,2	(-1,2 %)	8,8	-0,1	(-0,5 %)			
		20 ans	829	13,7	-0,3	(-1,9 %)	8,4	-0,4	(-5,0 %)			
		30 ans	414	14,7	-0,3	(-2,3 %)	6,3	-0,6	(-10,1 %)			
	2009	10 ans	1001	13,1	0,1	(0,8 %)	9,0	0,0	(0,5 %)			
		20 ans	499	14,8	0,2	(1,6 %)	7,8	-0,2	(-2,9 %)			
		30 ans	101	16,0	0,4	(2,6 %)						
RE3	2014	10 ans	486	10,9	-0,1	(-1,1 %)						
		20 ans	327	11,4	-0,1	(-1,0 %)						
		30 ans	168	11,6	-0,4	(-3,5 %)						
	2009	10 ans	346	11,1	-0,3	(-2,3 %)						
		20 ans	173	12,0	-0,7	(-5,7 %)						
		30 ans	48	10,6	-1,4	(-13,4 %)						
RP1	2014	10 ans	119	14,8	-0,1	(-0,6 %)	6,2	-0,1	(-0,9 %)	6,5	-0,3	(-4,5 %)
		20 ans	73	17,3	1,1	(6,1 %)	6,2	-0,5	(-8,1 %)			
		30 ans	46	19,2	0,6	(2,9 %)	6,1	-0,8	(-12,6 %)			
	2009	10 ans	78	15,0	1,0	(6,9 %)	6,7	-0,0	(-0,4 %)			
		20 ans	39	17,9	2,7	(15,3 %)	6,1	-0,9	(-14,1 %)			
RS1	2014	10 ans	245	15,0	-0,2	(-1,2 %)	6,2	0,1	(0,8 %)	4,5	-0,6	(-12,5 %)
		20 ans	144	15,5	0,4	(2,5 %)	6,4	0,2	(3,6 %)	4,2	-1,5	(-34,6 %)
		30 ans	79	16,5	0,9	(5,3 %)	5,9	-0,9	(-15,5 %)	4,5	-1,1	(-25,2 %)
	2009	10 ans	178	15,3	0,6	(3,8 %)	6,1	0,2	(3,2 %)	4,6	-0,4	(-9,1 %)
		20 ans	90	16,1	1,7	(10,8 %)	6,8	0,5	(6,6 %)	4,2	-1,3	(-31,2 %)
		30 ans	36	16,1	1,8	(11,1 %)	7,1	-0,5	(-6,4 %)			
RS2	2014	10 ans	1424	10,5	0,1	(0,5 %)	7,1	-0,0	(-0,6 %)	4,6	-0,2	(-4,2 %)
		20 ans	827	11,1	0,2	(1,9 %)	6,4	-0,5	(-7,2 %)	5,3	0,1	(1,1 %)
		30 ans	373	11,5	0,6	(4,8 %)	6,5	-0,3	(-4,4 %)	4,7	-0,5	(-10,4 %)
	2009	10 ans	1064	11,0	0,0	(0,3 %)	7,3	0,1	(1,3 %)	4,5	-0,0	(-0,1 %)
		20 ans	508	12,0	0,3	(2,9 %)	6,6	0,1	(1,9 %)	5,2	-0,1	(-2,2 %)
		30 ans	93	11,5	0,7	(5,6 %)	5,6	-0,2	(-3,7 %)	6,3	-0,6	(-9,9 %)

Tableau 7. (suite et fin)

VP	Version de Natura	Horizon	n	Groupe d'essences 1			Groupe d'essences 2			Groupe d'essences 3		
				ST moyenne observée (m ² /ha)	Biais du modèle		ST moyenne observée (m ² /ha)	Biais du modèle		ST moyenne observée (m ² /ha)	Biais du modèle	
					Absolu (m ² /ha)	(Relatif)		Absolu (m ² /ha)	(Relatif)		Absolu (m ² /ha)	(Relatif)
RS3	2014	10 ans	163	10,3	-0,1	(-1,3 %)	4,8	-0,3	(-6,4 %)			
		20 ans	105	10,3	-0,2	(-1,5 %)	3,7	-0,7	(-19,0 %)			
		30 ans	59	11,4	0,7	(5,8 %)	3,8	-0,7	(-18,9 %)			
	2009	10 ans	114	10,8	-0,5	(-4,2 %)	4,4	-0,7	(-15,9 %)			
		20 ans	57	11,5	-1,0	(-8,7 %)	3,1	-1,0	(-33,5 %)			
RT1	2014	10 ans	68	19,4	-0,1	(-0,5 %)	8,1	-0,2	(-2,9 %)	4,1	0,1	(2,9 %)
		20 ans	48	21,3	1,4	(6,3 %)	9,0	-0,1	(-0,6 %)			
	2009	10 ans	48	19,6	-0,2	(-0,7 %)	7,1	-0,4	(-5,0 %)			

terrière de sapin pour pratiquement toutes végétations potentielles. Dans les années 1970 et 1980, le biais relatif, en valeur absolue, avantage l'une ou l'autre des versions de Natura selon la végétation potentielle. Dans les années 1990, les prévisions du volume avec Natura-2014 ont généralement un biais relatif, en valeur absolue, plus petit que celles de la version 2009. Pour 3 végétations potentielles, la diminution du biais relatif est inférieure ou égale à 5 % et pour 6 végétations potentielles, cette diminution varie de 6 à 16 %.

3.1.3 Évaluation du volume marchand brut des groupes d'essences selon le type de forêts

En général, les 2 versions de Natura surestiment le volume du groupe RT dans les types de forêts où l'épinette noire domine (Figure 6a : En, EnPg, EnFx); ce biais est plus grand pour la version 2014 que pour celle de 2009. Cette surestimation atteint près de 15 % après 30 ans dans les pessières noires pures (En) avec Natura-2014. Les prévisions du volume du groupe RT sont peu biaisées avec les 2 versions de Natura dans les types de forêts où l'épinette blanche ou l'épinette rouge domine (Figure 6a : Eb et Eu). Natura-2014 sous-estime le volume du groupe RT dans les sapinières à épinette (SbEpx), mais le surestime dans les pessières à feuillus (EpxFx). Le volume de SAB est généralement surestimé avec les 2 versions de Natura, mais davantage avec Natura-2014 (Figure 6b). Dans les 2 versions de Natura, le volume du groupe FI est généralement surestimé dans les types de forêts où le bouleau à papier est une essence dominante (Figure 6c : Bp, BpFi, BpFt,

Tableau 8. Comparaison des biais relatifs (%) des prévisions de la surface terrière marchande de sapin baumier obtenues avec les versions 2009 et 2014 de Natura en fonction de la décennie du début de la période de mesure, pour les végétations potentielles comprenant le sapin baumier parmi les 3 groupes d'essences les plus abondants.

Version	Végétation potentielle	Décennie		
		1970	1980	1990
2009	MJ1	8,7	11,0	15,0
2014		-7,2	-4,9	-2,3
2009	MJ2	-7,3	13,4	27,9
2014		-37,2	-6,1	11,7
2009	MS1	-6,8	-2,5	9,0
2014		-7,8	-7,8	3,5
2009	MS2	8,7	4,2	21,8
2014		-1,9	-7,8	11,5
2009	MS6	-9,0	7,7	8,3
2014		-16,3	-1,0	-0,2
2009	RB5			-5,3
2014				3,1
2009	RC3	-19,0	-7,1	-2,0
2014		-10,6	-3,0	2,7
2009	RS1	-30,5	-3,2	14,0
2014		-40,0	-8,4	9,0
2009	RS2	5,1	-4,7	16,9
2014		0,0	-9,6	9,2
2009	RS3	-11,1	-6,3	3,0
2014		-11,3	-6,2	2,0

BpRx), et sous-estimé dans les types de forêts où les peupliers dominent (Figure 6c : Pe, PeRx). Les prévisions du volume du groupe RI avec la version 2014 sont peu biaisées dans les types de forêts où le pin gris domine, à l'exception des pinèdes grises (Pg) dans lesquelles le volume du groupe RI est surestimé (Figure 6d).

3.2 Effet des variables explicatives sur le volume marchand brut estimé

Nous avons sélectionné un peuplement afin d'illustrer le comportement temporel du volume marchand brut simulé avec Natura-2014 sur une période de 50 ans selon les principales variables explicatives retrouvées dans les équations. Nous avons fait varier les variables une à une pour en illustrer l'effet sur un peuplement pur d'épinette noire de 100 ans ayant les caractéristiques suivantes :

- sous-domaine bioclimatique : pessière à mousses de l'Ouest (6ouest);
- végétation potentielle : pessière noire à mousses ou à éricacées (RE2);
- hauteur dominante : 15 m;
- surface terrière marchande : 20 m²/ha (donc 20 m²/ha en épinette noire);
- volume marchand : 98 m³/ha;
- densité de tiges marchandes : 1 250 tiges/ha;
- pas de perturbation naturelle légère ni de coupe partielle.

Le volume de ce peuplement augmente légèrement au cours des 20 premières années, puis diminue légèrement au cours des 30 années suivantes (Figure 7). La simulation de la croissance de ce même type de peuplement dans un autre sous-domaine bioclimatique (Figure 7a) ou une autre végétation potentielle (Figure 7b) engendre des différences du même ordre de grandeur sur les prévisions de ce peuplement.

L'âge du peuplement et sa hauteur dominante sont les 2 variables explicatives affectant le plus l'évolution de ce peuplement. Avec des caractéristiques identiques, mais un âge de 50 ans, ce peuplement serait en croissance sur toute la période de simulation (Figure 7c). Avec un âge de 150 ans, il serait en décroissance sur toute la période. Des différences du même ordre de grandeur s'observent avec des hauteurs dominantes de 11 et de 19 m (Figure 7d).

Un indice de réduction de croissance attribuable à la TBE, équivalant à 8 années de défoliation grave

entre la 20^e et la 30^e année de la simulation, a un effet relativement faible sur l'évolution en volume de ce peuplement, tandis qu'une perturbation naturelle légère (p.ex. un chablis partiel) entraîne une perte moyenne de 17 m³/ha par rapport à une évolution sans perturbation (Figure 7e). La densité a peu d'effet sur le volume marchand brut de ce peuplement (Figure 7f).

4. Discussion

4.1 Améliorations de la version 2014 de Natura

L'ajout des données du 4^e inventaire des PEP a permis d'étalonner à nouveau le modèle Natura en ajoutant près de 4 000 périodes de croissance. Les équations de la version 2014 de Natura contiennent de nouvelles variables explicatives, notamment la végétation potentielle et 2 variables climatiques. Le biais moyen des prévisions des 2 versions est généralement du même ordre de grandeur, toutes essences confondues. En général, les biais des prévisions de la surface terrière des 3 principaux groupes d'essences de chaque végétation potentielle sont également semblables. Toutefois, les caractéristiques de certains groupes d'essences, en particulier le sapin baumier, continuent d'être surestimées par la version 2014 de Natura. Pour les végétations potentielles sur lesquelles Natura est principalement utilisé par le BFEC, le biais des prévisions de la surface terrière du groupe d'essences principal a généralement été réduit (MS2, RE3, RS2 et RS3), mais sur les végétations potentielles RE1 et RE2, ils sont légèrement plus grands.

L'ajout de mesures permet d'évaluer le modèle sur une échelle temporelle plus grande, puisque plus de placettes peuvent être évaluées sur un horizon de 20 à 40 ans. Ce plus grand nombre de données permet de représenter un plus large éventail de conditions de croissance, ce qui augmente la robustesse du modèle (Weiskittel *et al.* 2011). De plus, un plus grand nombre d'observations dans les années 2000 représente davantage, en principe, les conditions de croissance actuelles.

La végétation potentielle est une nouvelle variable explicative présente dans toutes les équations de prévision du nombre de tiges marchandes, de la surface terrière marchande et du volume marchand de Natura-2014. Cette variable exprime en partie la richesse du site, son exposition, sa

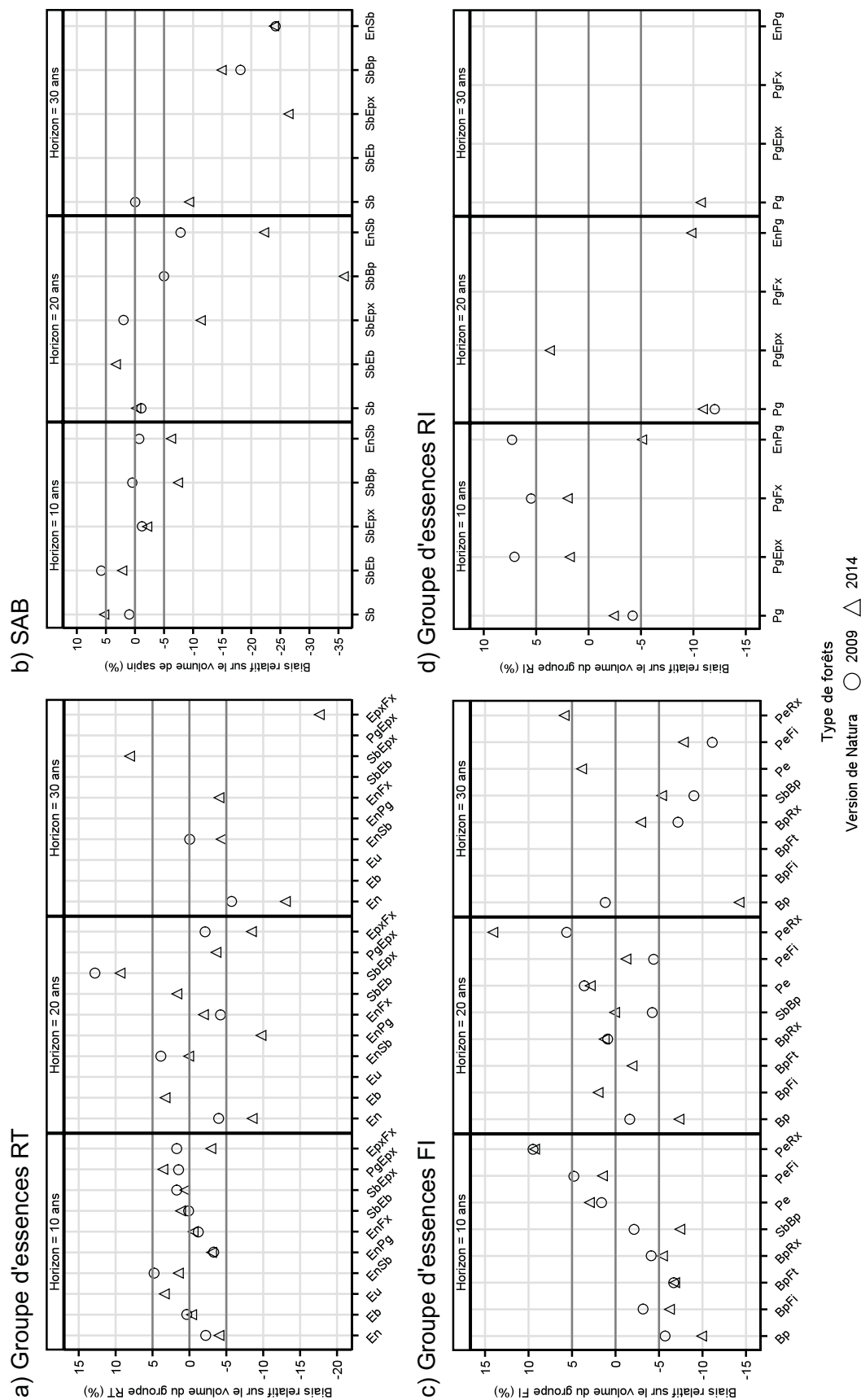


Figure 6. Comparaison du biais relatif des versions 2009 et 2014 de Natura pour le volume marchand brut des groupes d'essences des résineux tolérants (RT, [a]), du sapin baumier (b), des feuillus intolérants (FI, [c]), des résineux intolérants (RI, [d]), en fonction du type de forêts et de l'horizon de simulation.

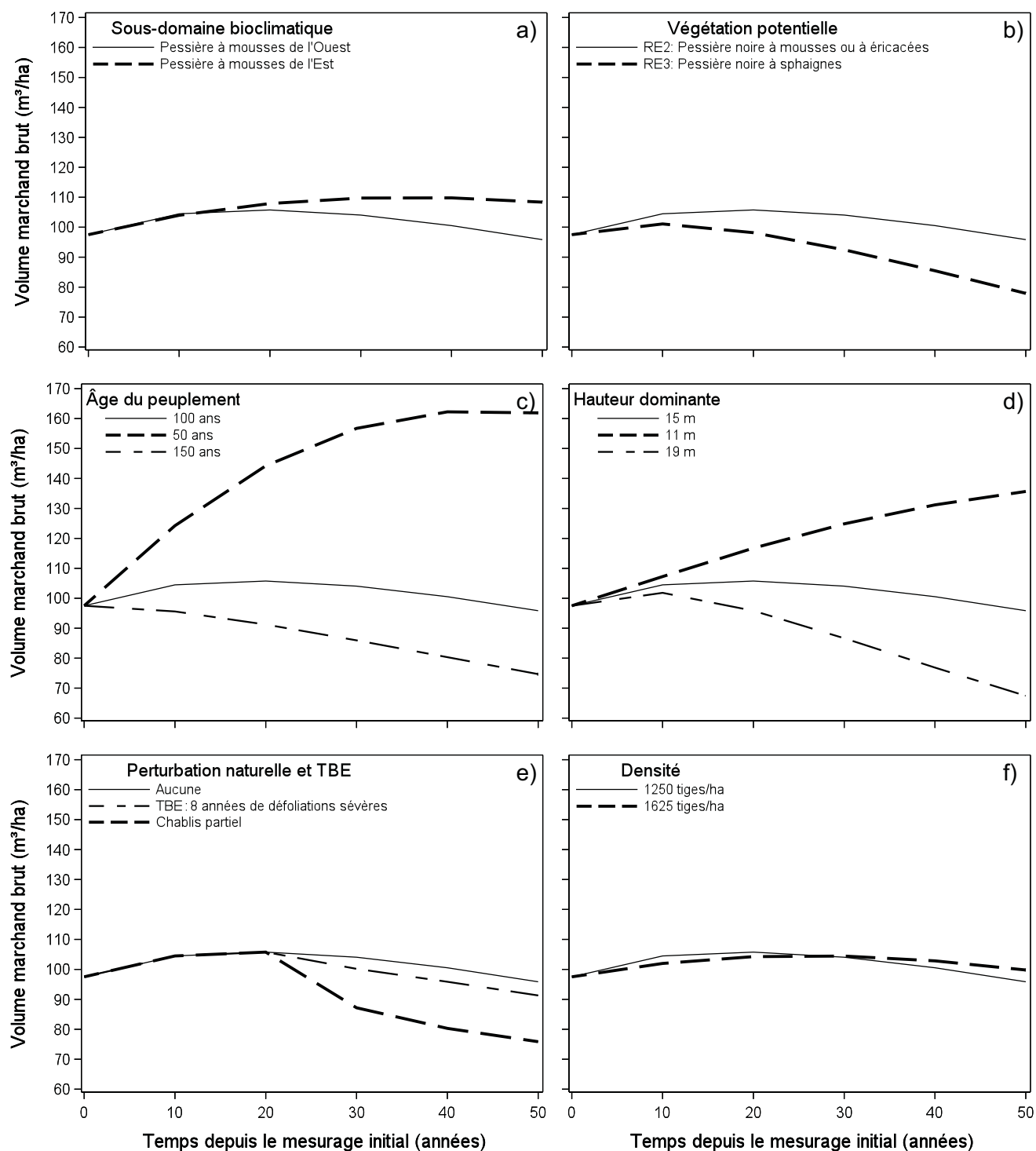


Figure 7. Simulation sur 50 ans avec Natura-2014 de l'évolution du volume marchand brut d'un peuplement pur d'épinette noire selon le sous-domaine bioclimatique (a), la végétation potentielle (b), l'âge du peuplement (c), la hauteur dominante (d), la perturbation naturelle (e) et la densité (f). Le peuplement de référence (ligne continue) est une pessière noire pure de 100 ans dans le sous-domaine bioclimatique de la pessière à mousses de l'Ouest (6ouest), sur la végétation potentielle de la pessière noire à mousses ou à éricacées (RE2), d'une hauteur dominante de 15 m, avec une surface terrière de $20 \text{ m}^2/\text{ha}$, un volume de $98 \text{ m}^3/\text{ha}$ et une densité de 1 250 tiges/ha.

pente et son altitude, et s'exprime à une échelle locale (Saucier *et al.* 1998). L'ajout de la végétation potentielle pourrait en partie expliquer le retrait des variables indicatrices de la présence du pin rouge, de l'épinette blanche, de l'épinette rouge, du thuya et de la pruche que contenait la version 2009 du modèle. En effet, les peuplements susceptibles de renfermer des proportions appréciables de ces 5 essences se trouvent dans des végétations potentielles précises. De ce fait, l'épinette blanche représente au moins 20 % du couvert forestier dans la pinède blanche ou rouge (RP1) ainsi qu'une forte proportion du couvert forestier dans la pessière blanche issue de broutage (RB5), l'épinette blanche et le thuya forment au moins de 1 à 15 % du couvert forestier dans la pessière blanche ou la cédrière issue de l'agriculture (RB1), le thuya représente au moins 10 % du couvert forestier dans la cédrière tourbeuse à sapin (RC3), et la pruche représente au moins 10 % du couvert forestier dans la prucheraie (RT1) (MRN 2013). La végétation potentielle n'avait pas été retenue dans les équations dans la version 2009, car des tests préliminaires avaient montré une corrélation de cette variable avec la hauteur dominante. À la suite de plus amples vérifications, nous avons constaté que l'utilisation de la végétation potentielle comme variable explicative dans la version 2014 n'engendrait pas de problèmes et permettait de diminuer certains biais.

Les faibles biais obtenus sur les prévisions de la hauteur dominante jouent un rôle important dans la qualité des prévisions du nombre de tiges, de la surface terrière et du volume. En effet, cette variable estimée intervient comme variable explicative dans pratiquement toutes les équations de Natura, et a un effet important, comme le montre la figure 7d. Malgré le processus de propagation de l'erreur statistique, elle contribue donc à générer des prévisions généralement peu biaisées pour la surface terrière des trois principaux groupes d'essences, qui à leur tour entraînent des prévisions peu biaisées lorsque toutes les essences sont confondues.

Bien qu'en général, Natura-2014 produise de faibles biais en surface terrière totale, les prévisions de la surface terrière du sapin baumier sont surestimées pour les horizons supérieurs à 10 ans, et ce, quels que soient la végétation potentielle et le type de forêts. Ce biais pourrait être causé par l'effet de la TBE dans ces peuplements, car la majorité des périodes de croissance (70 %) des périodes de simulation 1 et 2 ont eu lieu durant l'épidémie de TBE qui a sévi au Québec dans les années 1970 et

1980 (Gray *et al.* 2000). Un indice de défoliation a été calculé pour chaque période de croissance des placettes à partir des relevés aériens de la DPF, afin de tenir compte de l'effet de la TBE sur la croissance de ces placettes. Toutefois, une certaine imprécision demeure au sujet de l'emplacement et de la sévérité des défoliations, puisque celles-ci sont évaluées lors de survols aériens du territoire. De plus, l'indice a été étalonné à partir de mesures de pertes de croissance radiale d'arbres qui ont survécu aux épidémies de TBE. Comme il n'estime pas directement les pertes par mortalité, on peut donc s'attendre à ce qu'il sous-estime les pertes en volume à l'hectare. Ainsi, l'indice sous-estime probablement la quantité et la sévérité des défoliations; cela pourrait expliquer en partie la surestimation des surfaces terrières de sapin en période épidémique, provenant d'un indice de défoliation trop faible, et la sous-estimation en période non épidémique, provenant d'un effet résiduel de la TBE dans les prévisions. La sous-estimation en période non épidémique est toutefois moindre avec Natura-2014 qu'avec Natura-2009, et l'amélioration est non négligeable sur certaines végétations potentielles telles MJ2, MS2 et RS2. L'obtention de prévisions sans effets résiduels de la TBE est importante pour estimer l'évolution d'un peuplement en l'absence d'une telle perturbation, comme le fait le BFEC lors de l'élaboration de courbes « actuelles d'évolution » (Poulin 2013a). Une surestimation de la surface terrière du sapin est aussi rapportée avec le modèle Artémis-2014 (3 à 38 % après 30 ans) dans les peuplements sans coupe partielle (Power 2016). De même, le modèle de croissance forestière *Forest Vegetation Simulator* surestime l'accroissement en surface terrière de plantations d'épinette blanche affectées par la TBE dans le Minnesota, aux États-Unis (Russell *et al.* 2015). Ces auteurs ont employé des modificateurs pour tenir compte de l'intensité et de la durée de la défoliation par la TBE. Des efforts de recherche supplémentaires sont nécessaires pour résoudre ce problème avec Natura.

Certains biais sont présents dans les prévisions des rendements de Natura-2014 par groupe d'essences, en particulier lorsque le groupe est dominé par une seule essence. Certes, l'ajout de la végétation potentielle dans les équations représente une amélioration au modèle. Malgré cela, cette variable n'arrive pas à tenir compte de tous les effets de la composition du peuplement, comme le montre par exemple la surestimation du volume du groupe RT dans les pessières noires, dont la composition est en partie indiquée par la végétation potentielle (RE1, RE2 et

RE3). La variable indicatrice EPX de la version 2009, qui signale que la surface terrière de l'épinette blanche, de l'épinette rouge, du thuya ou de la pruche représente plus de 50 % de la surface terrière totale, permettait de tenir compte en partie de la composition du groupe RT. Cette variable n'était toutefois plus significative lorsque la végétation potentielle était ajoutée comme variable explicative. D'autres avenues devront être explorées pour améliorer cet aspect du modèle.

Sur un horizon de 30 ans, les prévisions de Natura-2014 sont quelquefois moins exactes que celles de la version 2009, comme le montre l'augmentation des valeurs de la REQM et la diminution des valeurs de R^2 pour certaines végétations potentielles des différentes équations (Figures 3 et 4). La REQM est la somme du carré du biais et de la variance des résidus (Pretzsch 2009). Ainsi, à biais égaux, l'augmentation de la REQM doit provenir de l'augmentation de la variance des résidus. Cette augmentation pourrait être expliquée en partie par une plus grande variabilité observée dans les données ajoutées pour étalonner la version 2014 que dans celles de la version 2009. De plus grandes valeurs de REQM sont aussi rapportées pour certaines végétations potentielles dans les prévisions avec Artémis-2014 comparativement à Artémis-2009 (Power 2016).

Malgré les questions soulevées plus haut, l'exactitude des prévisions de Natura-2014 pour le diamètre moyen quadratique et le volume moyen par tige a tout de même été améliorée, grâce en partie à l'introduction d'un nouveau système d'équations basé sur le groupe d'essences et des contraintes pour ces deux variables. Toutefois, la corrélation entre les mesures d'une même placette n'a pu être modélisée dans les systèmes d'équations en raison de la complexité de ceux-ci. Nous avons jugé plus pertinent de ne pas modéliser la corrélation temporelle et de conserver la structure du système d'équations afin de mieux estimer le diamètre moyen quadratique et le volume moyen par tige, puisque ces deux caractéristiques sont utilisées dans le calcul des possibilités forestières (Poulin 2013a).

4.2 Recommandations

Étant donné que l'âge et la hauteur dominante du peuplement interviennent dans plusieurs équations de Natura et qu'ils ont un effet important sur le comportement du modèle, il est primordial que leurs mesures soient les plus précises possible. Cela

souligne la nécessité de continuer à mesurer l'âge et la hauteur des arbres dominants non seulement dans les PEP, mais aussi dans les placettes-échantillons temporaires (PET). En effet, ce sont les caractéristiques des PET qui servent de peuplement initial dans Natura pour établir les courbes d'évolution dans le calcul des possibilités forestières (Poulin 2013a). De plus, lorsque cette variable sera disponible pour l'ensemble du territoire, le temps depuis la perturbation d'origine devrait être utilisé comme variable temporelle au lieu de l'âge moyen des arbres dominants et codominants, comme l'ont recommandé Pothier et Auger (2011). Il sera aussi important d'analyser plus en détail les biais des prévisions de la hauteur dominante, malgré le fait qu'ils soient faibles à l'échelle de la végétation potentielle, pour vérifier si la surestimation en volume que l'on observe dans les végétations potentielles RS1, RS3, RE1, RE3 ne proviendrait pas en partie de la surestimation de la hauteur dominante dans les vieilles forêts boréales. En effet, le modèle Natura est basé sur l'hypothèse d'une hauteur dominante qui suit une croissance asymptotique, comportement généralement associé aux peuplements monospécifiques de structure équiennne qui ne sont pas en phase de sénescence. À ce stade, les arbres dominants commencent à mourir pour céder la place à une nouvelle cohorte (Oliver et Larson 1996). Le biais des prévisions de la hauteur dominante pourrait aussi être exploré en fonction de la composition du peuplement. Cela permettrait de vérifier si la surestimation en volume observée dans les végétations potentielles MS1, MS6, MF1 et MJ2 provient ou non d'une surestimation de la hauteur dominante dans les peuplements mixtes boréaux, où les essences à croissance rapide dominent en hauteur au début, meurent et laissent la place ensuite aux essences plus longévives (Oliver et Larson 1996). Si tel est le cas, une solution à explorer serait de modifier la fonction de hauteur dominante pour lui permettre de diminuer dans le temps.

4.3 Limites d'utilisation du modèle

Puisque les rendements estimés par le modèle risquent d'être supérieurs à ceux observés, le modèle Natura-2014 devra être utilisé avec précaution sur les végétations potentielles et les types de forêts pour lesquels le volume marchand est surestimé, en particulier les végétations potentielles MS1, MS6, RE1, RE3, RS1 et RS3 ainsi que dans les pessières pures et les sapinières. Les surestimations du volume sont étroitement associées à une surestimation du volume de sapin baumier (possiblement à cause des effets de

la TBE), mais aussi à la surestimation du volume des groupes d'essences RT, RI et FI. Les biais peuvent aussi être associés à l'accumulation de légères surestimations de 2 ou 3 groupes d'essences, qui produisent une surestimation non négligeable du volume marchand total. Une solution temporaire à examiner pour corriger ces biais pourrait être d'appliquer un facteur de correction aux prévisions, dont une des méthodes les plus communes est d'établir une régression linéaire passant par l'origine entre les valeurs prédites et les valeurs observées (Weiskittel *et al.* 2011). Ce facteur de correction pourrait être fonction de certaines variables comme l'âge du peuplement.

Les limites d'utilisation de Natura-2014 sont les mêmes que celles mentionnées dans Pothier et Auger (2011), puisque la structure du modèle ainsi que la majeure partie du jeu de données sont demeurées les mêmes. Il n'est pas recommandé d'utiliser Natura pour simuler l'effet des changements climatiques sur la croissance forestière, car le modèle n'est pas très sensible aux variables climatiques (seulement 2 équations sur 17 sont influencées par le climat) et il n'a pas été étalonné pour tenir compte des variations climatiques d'une période à l'autre. Il est important de rappeler que Natura est un modèle strictement empirique, et que ce type de modèle est fortement lié aux conditions environnementales présentes lors de son ajustement (Weiskittel *et al.* 2011). Natura doit donc être utilisé dans des conditions équivalentes à celles des placettes ayant servi à son étalonnage, c'est-à-dire des inventaires de placettes qui répondent aux critères suivants :

- elles ont une superficie de 400 m²;
- elles sont situées dans des peuplements hauts de plus de 7 m et âgés d'au moins 12 ans;
- elles sont situées dans des peuplements qui contiennent au moins 100 tiges marchandes à l'hectare et qui n'ont subi aucune éclaircie précommerciale (EPC).

Rappelons que le jeu de données ayant servi à étalonner Natura-2014 ne contenait aucune placette identifiée comme ayant été traitée par une EPC et que ce modèle ne doit donc pas être utilisé dans un tel contexte tant qu'une évaluation de ses prévisions n'a pas été effectuée dans des peuplements traités par une EPC (Tremblay *et al.* 2016). Le changement temporel de production possible à la suite de ce type de perturbation devra être estimé d'une autre façon, comme par des hypothèses ou un modèle conçu pour simuler la réaction à un tel traitement.

5. Conclusion

Même si une grande partie du jeu de données est commune aux versions 2009 et 2014 de Natura, l'ajout de près de 4000 périodes de croissance, provenant majoritairement des années 2000, a élargi le spectre des conditions de croissance rencontrées pour mieux représenter le climat actuel. La modification de la structure des systèmes d'équations permet maintenant de tenir compte des corrélations entre les différentes caractéristiques d'un groupe d'essences et d'améliorer l'exactitude des prévisions du diamètre moyen quadratique et du volume moyen par tige sur plusieurs végétations potentielles. De plus, la sous-estimation des prévisions de la surface terrière du sapin baumier en période non épidémique est moindre avec Natura-2014 qu'avec Natura-2009, ce qui permet d'obtenir des estimations avec moins d'effets résiduels de la TBE. Natura-2014 gagne donc à être utilisé dans le prochain calcul des possibilités forestières.

En général, les biais des prévisions, toutes essences confondues, des 2 versions de Natura sont du même ordre de grandeur. Néanmoins, certaines surestimations subsistent à l'échelle des groupes d'essences; l'utilisateur devrait en tenir compte lorsqu'il interprétera les prévisions, particulièrement celles à long terme et celles concernant le sapin baumier. Dans ce contexte, une étude sera entreprise pour comparer la performance des modèles Natura et Artémis afin d'orienter l'utilisateur selon ses besoins. L'étude de Natura devrait aussi être approfondie afin d'évaluer sa prise en compte de la TBE dans les équations et de déterminer les sources de biais. Finalement, comme les données d'étalonnage de Natura ne représentent qu'un peu plus de 8600 placettes, il sera essentiel de mettre à jour le modèle chaque fois qu'un nombre suffisant de nouvelles mesures deviendra disponible.

Remerciements

Ces travaux ont été réalisés dans le cadre du projet interne 142332123 de la Direction de la recherche forestière (DRF). L'auteure remercie le Dr David Pothier (Université Laval), le Dr Hugues Power (DRF) et l'éditrice associée, Mme Marie-Claude Lambert, ainsi que les réviseurs anonymes pour leurs conseils et commentaires sur une version préliminaire de ce manuscrit. Elle remercie aussi Mmes Denise Tousignant et Viviane St-Arnaud pour l'édition, Mme Nathalie Langlois pour la révision typographique et Mme Maripierre Jalbert pour la mise en page.

Références bibliographiques

- Auger, I., 2016. *Une nouvelle relation hauteur-diamètre tenant compte de l'influence de la station et du climat pour 27 essences commerciales du Québec*. Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de la recherche forestière. Note de recherche forestière n° 146. 31 p. [<https://www.mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Auger-Isabelle/Note146.pdf>]
- Efron, B. et G. Gong, 1983. *A leisurely look at the bootstrap, the jackknife and cross-validation*. The Am. Stat. 37: 36-48.
- Fortin, M., J. DeBlois, S. Bernier et G. Blais, 2007. *Mise au point d'un tarif de cubage général pour les forêts québécoises : une approche pour mieux évaluer l'incertitude associée aux prévisions*. For. Chron. 83: 754-765.
- 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.
- [MFFP] Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, 2014. *Réseaux des placettes-échantillons permanentes du Québec méridional*. Gouvernement du Québec, Direction des inventaires forestiers. 10 p. [<https://www.mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/Reseaux-PEP.pdf>]
- [MRN] Ministère des Ressources naturelles, 2013. *Le guide sylvicole du Québec, Tome 1, Les fondements biologiques de la sylviculture*. Ouvrage collectif sous la supervision de B. Boulet et M. Huot. Les Publications du Québec. 1044 p.
- [MRNF] Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, 2012. *Aires infestées par la tordeuse des bourgeons de l'épinette au Québec en 2012*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Direction de la protection des forêts. 19 p. [http://www.mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/fimaq/insectes/tordeuse/TBE_2012_P.pdf]
- Oliver, C.D. et B.C. Larson, 1996. *Forest stand dynamics. Update edition*. John Wiley and Sons. New York, NY (États-Unis). 520 p.
- Ouzennou, H., D. Pothier et F. Raulier, 2008. *Adjustment of the age-height relationship for uneven-aged black spruce stands*. Can. J. For. Res. 38: 2003-2012.
- Pothier, D. et I. Auger, 2011. *NATURA-2009 : un modèle de prévision de la croissance à l'échelle du peuplement pour les forêts du Québec*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Direction de la recherche forestière. Mémoire de recherche forestière n° 163. 56 p. [<https://www.mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Auger-Isabelle/Memoire163.pdf>]
- Pothier, D., D. Mailly et S. Tremblay, 2005. *Predicting balsam fir growth reduction caused by spruce budworm using large-scale historical records of defoliation*. Ann. For. Sci. 62: 261-267.
- Poulin, J., 2013a. 2.4. *Évolution des strates*. Dans : Bureau du forestier en chef (éd.). *Manuel de détermination des possibilités forestières 2013-2018*. Gouvernement du Québec, Roberval, QC. p. 55-61. [http://forestierenchef.gouv.qc.ca/wp-content/uploads/2013/01/055-61_MDPF_Evolution.pdf]
- Poulin, J., 2013b. 2.3. *Stratégie sylvicole*. Dans : Bureau du forestier en chef (éd.). *Manuel de détermination des possibilités forestières 2013-2018*. Gouvernement du Québec, Roberval, QC. p. 51-54. [http://forestierenchef.gouv.qc.ca/wp-content/uploads/2013/01/051-54_MDPF_Strategie.pdf]
- Power, H., 2016. *Comparaison des biais et de la précision des estimations des modèles Artémis2009 et Artémis-2014 pour la surface terrière totale des peuplements forestiers, avec et sans coupe partielle, sur une période de 40 ans*. Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de la recherche forestière. Note de recherche forestière n° 143. 21 p. [<http://www.mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Power-Hugues/Note143.pdf>]
- Pretzsch, H., 2009. *Forest dynamics, growth and yield, from measurement to model*. Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg. 664 p.
- Régnière, J., R. Saint-Amant et A. Béchard, 2014. *BioSIM 10 – Guide de l'utilisateur*. Ressources Naturelles Canada, Service canadien des forêts, Centre de foresterie des Laurentides. Rapport d'information. LAU-X-137F. 70 p. [http://publications.gc.ca/collections/collection_2015/rncan-nrcan/Fo113-3-137-fra.pdf]

- Russell, M.B., A.W. D'Amato, M.A. Albers, C.W. Woodall, K.J. Puettmann, M.R. Saunders et C.L. VanderSchaaf, 2015. *Performance of the Forest Vegetation Simulator in managed white spruce plantations influenced by eastern spruce budworm in northern Minnesota*. For. Sci. 61(4): 723-730.
- SAS Institute Inc., 2013a. *SAS/STAT® 13.1 User's Guide*. SAS Institute Inc., Cary, NC (États-Unis).
- SAS Institute Inc., 2013b. *SAS/ETS® 13.1 User's Guide*. SAS Institute Inc., Cary, NC (États-Unis).
- Saucier, J.-P., J.-P. Berger, H. D'Avignon, et P. Racine, 1994. *Le Point d'observation écologique : normes techniques*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles, Direction de la gestion des stocks forestiers. Code de diffusion : RN94-3078. 126 p. [<http://mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/le-point-observation-ecologique-normes-tech-34.pdf>]
- Saucier, J.-P., J.-F. Bergeron, P. Grondin et A. Robitaille, 1998. *Les régions écologiques du Québec méridional : un élément du système hiérarchique de classification écologique du territoire mis au point par le ministère des Ressources naturelles*. L'Aubelle (supplément), février-mars 1998. 8 p.
- Tremblay, S., I. Auger et G. Prigent, 2016. *Utilisation des modèles de croissance développés à la Direction de la recherche forestière pour prévoir l'évolution des peuplements résineux régénérés naturellement ou par plantation à la suite d'une éclaircie précommerciale*. Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de la recherche forestière. Avis technique SSRF-09. 6 p. [<https://www.mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Tremblay-Stephane/Avis-technique-SSRF-09.pdf>]
- Weiskittel, A.R., D.W. Hann, J.A. Kershaw Jr. et J.K. Vanclay, 2011. *Forest growth and yield modeling*. John Wiley & Sons. UK. 415 p.

Annexes

Annexe 1. Liste des essences dans chacun des groupes et nombre d'arbres dans les placettes utilisées pour l'étalonnage de Natura-2014.

Groupe d'essences	Code*	Nom vernaculaire	Nom latin	Nombre d'arbres	Pourcentage du groupe (%)
Feuillus intolérants (FI)	BOG	Bouleau gris	<i>Betula populifolia</i> Marsh.	2 064	1,7
	BOP	Bouleau à papier	<i>Betula papyrifera</i> Marsh.	71 830	60,3
	CAC	Caryer cordiforme	<i>Carya cordiformis</i> (Wangenh.) K. Koch	23	0,0
	CET	Cerisier tardif	<i>Prunus serotina</i> Ehrh.	789	0,7
	CHR	Chêne rouge	<i>Quercus rubra</i> L.	3 063	2,6
	ERA	Érable argenté	<i>Acer saccharinum</i> L.	254	0,2
	NOC	Noyer cendré	<i>Juglans cinerea</i> L.	31	0,0
	PEB	Peuplier baumier	<i>Populus balsamifera</i> L.	1 316	1,1
	PED	Peuplier deltoïde	<i>Populus deltoides</i> W. Bartram ex Marsh.	14	0,0
	PEG	Peuplier à grandes dents	<i>Populus grandidentata</i> Michx	5 030	4,2
	PET	Peuplier faux-tremble	<i>Populus tremuloides</i> Michx	34 626	29,1
Feuillus tolérants (FT)	BOJ	Bouleau jaune	<i>Betula alleghaniensis</i> Britt.	17 439	18,0
	CAF	Caryer à fruits doux	<i>Carya ovata</i> (Miller) K. Koch	1	0,0
	CHB	Chêne blanc	<i>Quercus alba</i> L.	62	0,1
	CHE	Chêne bicolore	<i>Quercus bicolor</i> W.	8	0,0
	CHG	Chêne à gros fruits	<i>Quercus macrocarpa</i> Michx	14	0,0
	ERN	Érable noir	<i>Acer nigrum</i> F. Michx	1	0,0
	ERR	Érable rouge	<i>Acer rubrum</i> L.	32 195	33,3
	ERS	Érable à sucre	<i>Acer saccharum</i> Marsh.	33 432	34,6
	FRA	Frêne d'Amérique	<i>Fraxinus americana</i> L.	752	0,8
	FRN	Frêne noir	<i>Fraxinus nigra</i> Marsh.	2 556	2,6
	FRP	Frêne de Pennsylvanie	<i>Fraxinus pennsylvanica</i> Marsh.	37	0,0
	HEG	Hêtre à grandes feuilles	<i>Fagus grandifolia</i> Ehrh.	5 772	6,0
	ORA	Orme d'Amérique	<i>Ulmus americana</i> L.	778	0,8
	ORR	Orme rouge	<i>Ulmus rubra</i> Muhl.	5	0,0
	ORT	Orme de Thomas	<i>Ulmus thomasii</i> Sarg.	4	0,0
	OSV	Ostryer de Virginie	<i>Ostrya virginiana</i> (Mill) K. Koch	2 198	2,3
	TIL	Tilleul d'Amérique	<i>Tilia americana</i> L.	1 523	1,6
Résineux intolérants (RI)	MEL	Mélèze laricin	<i>Larix laricina</i> (Du Roi) K. Koch	2 157	6,3
	PIG	Pin gris	<i>Pinus banksiana</i> Lamb.	31 505	92,3
	PIR	Pin rouge	<i>Pinus resinosa</i> Ait.	462	1,4
Résineux tolérants (RT)	EPB	Épinette blanche	<i>Picea glauca</i> (Moench) Voss	20 140	7,8
	EPN	Épinette noire	<i>Picea mariana</i> (Mill.) B.S.P.	209 604	80,8
	EPO	Épinette de Norvège	<i>Picea abies</i> (L.) H. Karst.	1	0,0
	EPR	Épinette rouge	<i>Picea rubens</i> Sarg.	6 065	2,3
	PIB	Pin blanc	<i>Pinus strobus</i> L.	4 064	1,6
	PRU	Pruche de l'Est	<i>Tsuga canadensis</i> (L.) Carr.	3 751	1,5
	THO	Thuja occidental	<i>Thuja occidentalis</i> L.	15 901	6,1
Sapin baumier (SAB)	SAB	Sapin baumier	<i>Abies balsamea</i> (L.) Mill.	178 929	100,0

* Code des essences utilisé dans les inventaires forestiers du MFFP (voir l'Annexe 4 de Saucier *et al.* 1994).

Annexe 2. Équations de prévision du changement temporel du nombre de tiges marchandes (Éq. 4), de la surface terrière marchande (Éq. 5) et du volume marchand brut (Éq. 6) pour les groupes d'essences des feuillus intolérants (FI), des feuillus tolérants (FT), des résineux intolérants (RI), des résineux tolérants (RT) et pour le sapin baumier (SAB).

$$NFI_2 = \exp \left(a_{1,SD} + a_{2,SD} \ln(NFI_1 + 1) + a_3 \Delta t + a_4 HD_1 + a_5 Age_1 \times STFI_1 / STTot_1 + a_6 \ln(NFI_1 + 1) \times Age_1 \right. \\ \left. + a_7 TBE + a_{8,SD} \ln(STFI_1 + 0,1) + a_9 Perturb + a_{10} \ln(NTot_1) + a_{11,VP} + a_{12,VP} \ln(NFI_1 + 1) + a_{13} TMoy \right)$$

$$STFI_2 = \exp \left(b_{1,SD} + b_{2,SD} \ln(STFI_1 + 0,1) + b_3 \Delta t + b_4 \ln(NFI_1 + 1) + b_{5,SD} / Age_1 + b_6 STFI_1 / STTot_1 \right. \\ \left. + b_7 \ln(STFI_1 + 0,1) \times Perturb + b_8 \ln(STFI_1 + 0,1) \times TBE + b_{9,VP} + b_{10,VP} \ln(STFI_1 + 0,1) + b_{11} ApresP \times \ln(STFI_1 + 0,1) \right)$$

$$VFI_2 = \exp \left(c_{1,SD} + c_2 \ln(VFI_1 + 0,1) + c_3 \Delta t + c_4 \ln(NFI_2) + c_{5,SD} \ln(STFI_2) + c_6 HD_2 + c_7 / (Age_1 + \Delta t) + c_{8,VP} \ln(STFI_2) + c_{9,VP} \right)$$

$$NFT_2 = \exp \left(a_{1,SD} + a_{2,SD} \ln(NFT_1 + 1) + a_3 \Delta t + a_4 HD_1 + a_5 / Age_1 + a_{6,SD} \ln(STFT_1 + 0,1) + a_7 \ln(NTot_1) + a_{8,VP} + a_{9,VP} \ln(NFT_1 + 1) \right)$$

$$STFT_2 = \exp \left(b_{1,SD} + b_2 \ln(STFT_1 + 0,1) + b_3 \Delta t + b_4 \ln(NFT_1 + 1) + b_5 Age_1 + b_6 \ln(STFT_1 + 0,1) \times Age_1 + b_7 STFT_1 / STTot_1 + b_8 ApresC \right. \\ \left. + b_9 TBE \times \ln(STFT_1 + 0,1) + b_{10} Perturb \times \ln(STFT_1 + 0,1) + b_{11,VP} + b_{12,VP} \ln(STFT_1 + 0,1) + b_{13} ApresP \right)$$

$$VFT_2 = \exp \left(c_{1,SD} + c_2 \ln(VFT_1 + 0,1) + c_3 \Delta t + c_4 \ln(NFT_2) + c_{5,SD} \ln(STFT_2) + c_6 HD_2 + c_7 / (Age_1 + \Delta t) + c_{8,VP} \ln(STFT_2) \right)$$

$$NRI_2 = \exp \left(a_{1,SD} + a_{2,SD} \ln(NRI_1 + 1) + a_3 \Delta t + a_4 HD_1 + a_5 \ln(NRI_1 + 1) \times Age_1 + a_{6,SD} Perturb + a_{7,SD} \ln(STRI_1 + 0,1) \right) \\ \left. + a_8 \ln(NTot_1) + a_{9,VP} + a_{10,VP} \ln(NRI_1 + 1) \right)$$

$$STRI_2 = \exp \left(b_{1,SD} + b_{2,SD} \ln(STRI_1 + 0,1) + b_3 \Delta t + b_5 HD_1 + b_{6,SD} / Age_1 + b_7 STRI_1 / STTot_1 + b_{10} \ln(STRI_1 + 0,1) \times Perturb + b_{12,VP} + b_{13} PTot \right)$$

$$VRI_2 = \exp \left(c_{1,SD} + c_2 \ln(VRI_1 + 0,1) + c_3 \Delta t + c_4 \ln(NRI_2) + c_{5,SD} \ln(STRI_2) + c_6 HD_2 + c_7 (Age_1 + \Delta t) + c_{8,VP} \right)$$

$$NRT_2 = \exp \left(a_{1,SD} + a_{2,SD} \ln(NRT_1 + 1) + a_3 \Delta t + a_{4,SD} HD_1 + a_5 \ln(NRT_1 + 1) / Age_1 + a_{6,SD} \ln(NRT_1 + 1) \times Perturb \right. \\ \left. + a_7 TBE + a_{8,SD} \ln(STRT_1 + 0,1) + a_9 \ln(NTot_1) + a_{10,VP} + a_{11,VP} \ln(NRT_1 + 1) \right)$$

$$STRT_2 = \exp \left(b_{1,SD} + b_{2,SD} \ln(STRT_1 + 0,1) + b_3 \Delta t + b_4 \ln(NRT_1 + 1) + b_{5,SD} HD_1 + b_{6,SD} / Age_1 + b_{8,SD} \ln(STRT_1 + 0,1) \times Perturb \right. \\ \left. + b_9 \ln(STRT_1 + 0,1) \times TBE + b_{10} ApresC \times \ln(STRT_1 + 0,1) + b_{11,SD} STRT_1 / STTot_1 + b_{12,VP} + b_{13,VP} \ln(STRT_1 + 0,1) \right)$$

$$VRT_2 = \exp \left(c_{1,SD} + c_2 \ln(VRT_1 + 0,1) + c_3 \Delta t + c_4 \ln(NRT_2) + c_{5,SD} \ln(STRT_2) + c_6 HD_2 + c_7 (Age_1 + \Delta t) + c_{8,VP} + c_{9,VP} \ln(STRT_2) \right)$$

$NSAB_2 = \exp \left(\begin{aligned} &a_{1,SD} + a_{2,SD} \ln(NSAB_1 + 1) + a_3 \Delta t + a_{4,SD} HD_1 + a_{5,SD} \ln(NSAB_1 + 1) \times Age_1 + a_{6,SD} \ln(NSAB_1 + 1) / Age_1 \\ &+ a_{7,SD} \ln(NSAB_1 + 1) \times TBE + a_8 Perturb \times \ln(NSAB_1 + 1) + a_{9,SD} (\ln(NSAB_1 + 1))^2 + a_{10,VP} + a_{11,VP} \ln(NSAB_1 + 1) \end{aligned} \right)$
$ST SAB_2 = \exp \left(\begin{aligned} &b_{1,SD} + b_{2,SD} \ln(ST SAB_1 + 0,1) + b_3 \Delta t + b_4 \ln(NSAB_1 + 1) + b_5 HD_1 + b_6 \ln(ST SAB_1 + 0,1) / Age_1 \\ &+ b_8 \ln(ST SAB_1 + 0,1) \times TBE + b_{9,VP} + b_{10,VP} \ln(ST SAB_1 + 0,1) \end{aligned} \right)$
$VSAB_2 = \exp \left(c_{1,SD} + c_2 \ln(VSAB_1 + 0,1) + c_3 \Delta t + c_4 \ln(NSAB_2) + c_{5,SD} \ln(ST SAB_2) + c_6 HD_2 + c_7 (Age_1 + \Delta t) + c_{8,VP} + c_{9,VP} \ln(ST SAB_2) \right)$
où
$NFI_1, NFT_1, NRI_1, NRT_1, NSAB_1$
= Nombre de tiges marchandes des groupes d'essences FI, FT, RI, RT, SAB, respectivement, au début de la période (tiges/400 m ²);
$NFI_2, NFT_2, NRI_2, NRT_2, NSAB_2$
= Nombre de tiges marchandes des groupes d'essences FI, FT, RI, RT, SAB, respectivement, à la fin de la période (tiges/400 m ²);
$STFI_1, STFT_1, STRI_1, STRT_1, STSAB_1$
= Surface terrière marchande des groupes d'essences FI, FT, RI, RT, SAB, respectivement, au début de la période (m ² /ha);
$STFI_2, STFT_2, STRI_2, STRT_2, STSAB_2$
= Surface terrière marchande des groupes d'essences FI, FT, RI, RT, SAB, respectivement, à la fin de la période (m ² /ha);
$VFI_1, VFT_1, VRI_1, VRT_1, VSAB_1$
= Volume marchand brut des groupes d'essences FI, FT, RI, RT, SAB, respectivement, au début de la période (m ³ /ha);
$VFI_2, VFT_2, VRI_2, VRT_2, VSAB_2$
= Volume marchand brut des groupes d'essences FI, FT, RI, RT, SAB, respectivement, à la fin de la période (m ³ /ha);
$STTot_1$
= Surface terrière marchande totale au début de la période (m ² /ha);
$NTot_1$
= Nombre total de tiges marchandes au début de la période (tiges/400 m ²);
HD_1, HD_2
= Hauteur dominante au début et à la fin de la période, respectivement (m);
Age_1
= Âge moyen des arbres codominants et dominants au début de la période (années);
Δt
= Nombre d'années dans la période;
TBE
= Indice de réduction de la croissance potentielle attribuable à la tordeuse du bourgeon de l'épinette durant la période;
$Perturb$
= Variable binaire indiquant la présence d'une perturbation naturelle légère (chablis, brûlis ou déperissement partiels) durant la période;
$ApresP$
= Variable binaire indiquant la période suivant une perturbation naturelle légère;
$ApresC$
= Variable binaire indiquant la période suivant une coupe partielle;
$TMoy$
= Température moyenne annuelle (°C);
$PTot$
= Précipitations totales annuelles (mm).



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 : 978-2-550-79576-6
ISBN (PDF) : 978-2-550-79577-3
F.D.C. : 561--015.5 (714)
L.C. : SD 387.M33
Dépôt légal 2017
Bibliothèque nationale du Québec
© 2017 Gouvernement du Québec