

Effets réels de l'éclaircie précommerciale : évaluation des prévisions des modèles de croissance Natura-2014 et Artémis-2014 dans des peuplements de résineux propices à une éclaircie précommerciale

Stéphane Tremblay, Hugues Power et Isabelle Auger

Résumé

Au cours des années 1990, l'éclaircie précommerciale (EPC) est devenue l'un des traitements sylvicoles ayant été les plus appliqués dans la forêt boréale québécoise. Les peuplements traités par EPC commencent plus tôt à développer des caractéristiques marchandes, ce qui peut avoir une incidence sur le calcul des possibilités forestières. Les modèles de croissance forestière Artémis-2014 et Natura-2014 sont deux des principaux outils employés par le Bureau du forestier en chef du Québec pour réaliser ces calculs. Afin d'évaluer l'aptitude de ces deux modèles à prévoir l'évolution des peuplements traités par EPC, nous avons simulé l'évolution des placettes des deux réseaux de la mesure des effets réels de l'EPC.

A partir du premier mesurage avec au moins un arbre marchand, les deux modèles sous-estiment le volume marchand brut, la surface terrière et la densité des peuplements, et ce, davantage dans les peuplements éclaircis. Les biais augmentent avec la longueur de l'horizon de simulation, mais les biais relatifs (en pourcentage) tendent à se stabiliser au début de la simulation. Les biais des prévisions effectuées à partir de l'avant-dernier mesurage sont toujours moins grands, particulièrement avec des données prises 20 ans et plus après EPC. Dans un tel cas, c'est Natura qui affiche les biais les plus faibles. Les comportements à long terme des deux modèles sont réalistes, tout particulièrement lorsque les simulations sont effectuées à partir de données prises dans des peuplements plus âgés. Natura prévoit souvent des valeurs plus élevées que celles d'Artémis et qui se rapprochent plus des moyennes observées dans les réseaux de la mesure des effets réels de l'EPC. Le comportement d'Artémis peut cependant se rapprocher de celui de Natura, tout en permettant d'obtenir des informations plus détaillées, lorsqu'on l'utilise en mode stochastique et que l'on conserve des réalisations plus optimistes que la moyenne.

Mots-clés : éclaircie précommerciale, modèle de croissance, peuplements de résineux, évaluation des prévisions

Abstract

During the 1990s, precommercial thinning (PCT) became one of the most widespread silvicultural treatments in Quebec's boreal forest. Thinned stands reach merchantable characteristics earlier, and this can influence the assessment of allowable annual cuts. Artemis-2014 and Natura-2014 are two forest growth models that are used by Quebec's Bureau du forestier en chef for these calculations. Our objective was to assess the ability of these two models to predict the evolution of thinned stands. To do this, we simulated the evolution of two permanent plot networks that were created to monitor the effects of PCT.

In simulations performed from the first measurement with at least one merchantable tree per plot, both models underestimated stand merchantable volume, basal area and density, and biases were greater for thinned stands. Biases increased for longer simulation horizons. However, the relative (%) value of these biases tended to stabilize soon after simulations began. The predictions of stand characteristics based on the beginning of the last measurement period showed smaller biases than those based on the first, especially with data taken 20 years or more after thinning. In this case, Natura's predictions were the least biased. The long-term behavior of both models appears realistic, particularly when predictions are made with data from older stands, but both models seem to underestimate stand merchantable volume. Nevertheless, Natura's forecasts are often higher and closer to the mean values observed in the PCT networks. When Artemis is used in stochastic mode while keeping above-average (more optimistic) realizations, it behaves in a manner similar to that of Natura and yields more detailed results.

Keywords: growth model; precommercial thinning; softwood stands; validation

Correspondance : stephane.tremblay@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.forestiery@mffp.gouv.qc.ca
Site Internet : www.mffp.gouv.qc.ca

1. Introduction

L'éclaircie précommerciale (EPC) est un traitement d'éducation appliqué au début du stade de gaulis qui vise à stimuler la croissance en diamètre des arbres choisis, et ainsi, à redistribuer les ressources disponibles sur un moins grand nombre d'arbres. Cet objectif est atteint en coupant les arbres en surnombre ainsi que les tiges d'espèces ligneuses compétitrices (Tremblay et al. 2013). Avant 1989, l'EPC était généralement réalisée dans des pessières et des sapinières âgées de 5 à 20 ans et où la hauteur des arbres était de 1 à 3 m. L'intervention visait à laisser environ 2 500 arbres·ha⁻¹ bien répartis. Dans le cas des pinèdes grises, à la même époque, l'âge du peuplement devait être de 10 à 20 ans, et la densité cible variait de 3 000 à 3 700 arbres·ha⁻¹ (MER 1979). Les peuplements traités pouvaient également avoir une hauteur allant jusqu'à 5 m, à condition qu'ils soient âgés de 20 ans ou moins. De 1989 à 1992 (MER 1989), le seuil d'âge minimal est passé à 10 ans dans tous les cas. À partir de 1992, il est repassé à 5 ans, mais la hauteur cible a été réduite à 2 à 3 m et la densité visée a été établie à des valeurs variant de 1 500 à 3 125 arbres·ha⁻¹ (MFO 1992).

Bien que ce traitement ait été l'objet de recherches depuis la fin des années 1960, il n'a vraiment gagné en popularité qu'au cours des années 1990. La superficie des aires traitées annuellement est passée d'environ 22 000 ha, au début des années 1990, à plus de 100 000 ha au milieu des années 2000 (MFFP 2015, MFO 1993, MRN 1996, MRNF 2005, 2007, 2010), ce qui a fait de l'EPC le second traitement en importance au Québec après la coupe avec protection de la régénération et des sols. Une cause de cet intérêt est l'hypothèse énoncée dans les trois premières éditions du *Manuel d'aménagement forestier*, à savoir que le rendement des peuplements éclaircis équivaldrait à celui d'une plantation (MER 1989; MFO 1992; MRN 1998).

À défaut de disposer de modèles permettant de prévoir l'évolution des peuplements après un traitement donné, le calcul des possibilités forestières utilise une approche par hypothèse pour inclure les effets probables des traitements sylvicoles (Rheault 2013). Ces hypothèses sont élaborées à partir des renseignements trouvés dans la littérature scientifique et des résultats d'expériences réalisées localement. Jusqu'en 2003, l'hypothèse retenue pour l'EPC découlait possiblement de l'apparente similitude entre les peuplements traités et une plantation, vu l'espacement plus régulier entre les arbres. Toutefois,

cette hypothèse ne prenait pas en compte le fait que les arbres en peuplement naturel se sont développés dans des conditions de compétition pendant un certain temps.

Par ailleurs, l'incertitude quant au rendement des traitements sylvicoles et à leurs effets sur l'environnement forestier a mené, au début des années 2000, à la mise sur pied du Comité consultatif scientifique du *Manuel d'aménagement forestier*. Ce Comité a analysé les connaissances scientifiques disponibles pour différents traitements sylvicoles, et ce, par rapport à plusieurs aspects, y compris la production. Il a alors passé en revue la littérature scientifique au sujet du traitement de l'EPC et des facteurs influençant les effets du traitement. Cependant, peu de résultats scientifiques à long terme étaient alors disponibles pour l'EPC en peuplement naturel. Dans ce contexte, les travaux du Comité ont conduit à recommander d'utiliser l'hypothèse que les peuplements éclaircis auraient la même production que les peuplements non traités, mais que celle-ci serait répartie sur moins d'arbres (CCSMAF 2002). C'est cette hypothèse de rendement qui a été retenue dans la 4^e édition du *Manuel d'aménagement forestier* (MRNFP 2003). Ainsi, le principal avantage anticipé de l'EPC est devenu de produire des arbres de plus gros diamètre lorsque le peuplement atteindrait la maturité.

Le calcul des possibilités forestières nécessite de connaître l'évolution des peuplements et, plus spécifiquement, la production de bois sur un horizon de 150 ans (BFEC 2013). L'utilisation de modèles de croissance s'avère donc nécessaire pour réaliser cette tâche. Actuellement, les modèles Artémis (Fortin et Langevin 2010) et Natura (Pothier et Auger 2011) servent à prévoir la croissance des peuplements d'origine naturelle visés par le calcul des possibilités forestières. Artémis, un modèle à l'échelle de l'arbre, est généralement utilisé pour prévoir la croissance des forêts de feuillus et des forêts mixtes à feuillus tolérants, alors que Natura, un modèle à l'échelle du peuplement, est principalement utilisé pour prévoir la croissance et le rendement des forêts résineuses et des forêts mixtes à feuillus intolérants. Les deux modèles ont été ajustés à l'aide de données des 12 000 placettes-échantillons permanentes (PEP) du réseau de la Direction des inventaires forestiers (DIF). Cependant, peu de mesures ont été prises après une EPC dans les PEP; au mieux, celles-ci ne couvrent que les deux premières décennies suivant l'application du traitement.

L'ampleur des superficies traitées par EPC en forêt publique depuis le début des années 1990 fait en sorte que les hypothèses de rendement retenues ou les prévisions des modèles utilisés pour simuler l'évolution de ces peuplements à long terme peuvent grandement influencer la possibilité annuelle de récolte. Par conséquent, il y a lieu de se questionner sur la capacité des modèles de croissance actuels à simuler le rendement des peuplements traités en EPC, compte tenu des données utilisées pour ajuster ces modèles. De récents travaux ont d'ailleurs souligné la difficulté des modèles de croissance à prendre en compte les effets de l'éclaircie, même commerciale, sans recourir à des modules spécifiquement adaptés à ce type de traitement (Kuehne *et al.* 2016) ainsi que la difficulté de certains modèles à simuler l'évolution de jeunes peuplements (Lacerte *et al.* 2004).

L'objectif principal du présent travail était d'évaluer la capacité des modèles de croissance Artémis-2014 (Power 2016) et Natura-2014 (Auger 2017a, b) à

prévoir le développement de peuplements d'origine naturelle traités par EPC. Plus précisément, nous avons quantifié le biais des prévisions des modèles sur un horizon de simulation de 20 à 35 ans dans des peuplements traités par EPC. Nous avons également analysé les prévisions sur un horizon plus long de manière qualitative, étant donné qu'aucune donnée de suivi à long terme n'était disponible. Nous avons ensuite testé des approches qui avaient le potentiel d'améliorer les prévisions de la croissance des peuplements issus d'EPC.

2. Matériel et méthodes

2.1. Données

Les données proviennent de deux réseaux de la mesure des effets réels de l'EPC (figure 1). Le premier a été établi de 1969 à 1991 par la Direction de l'assistance technique (EPC-DAT), et le second

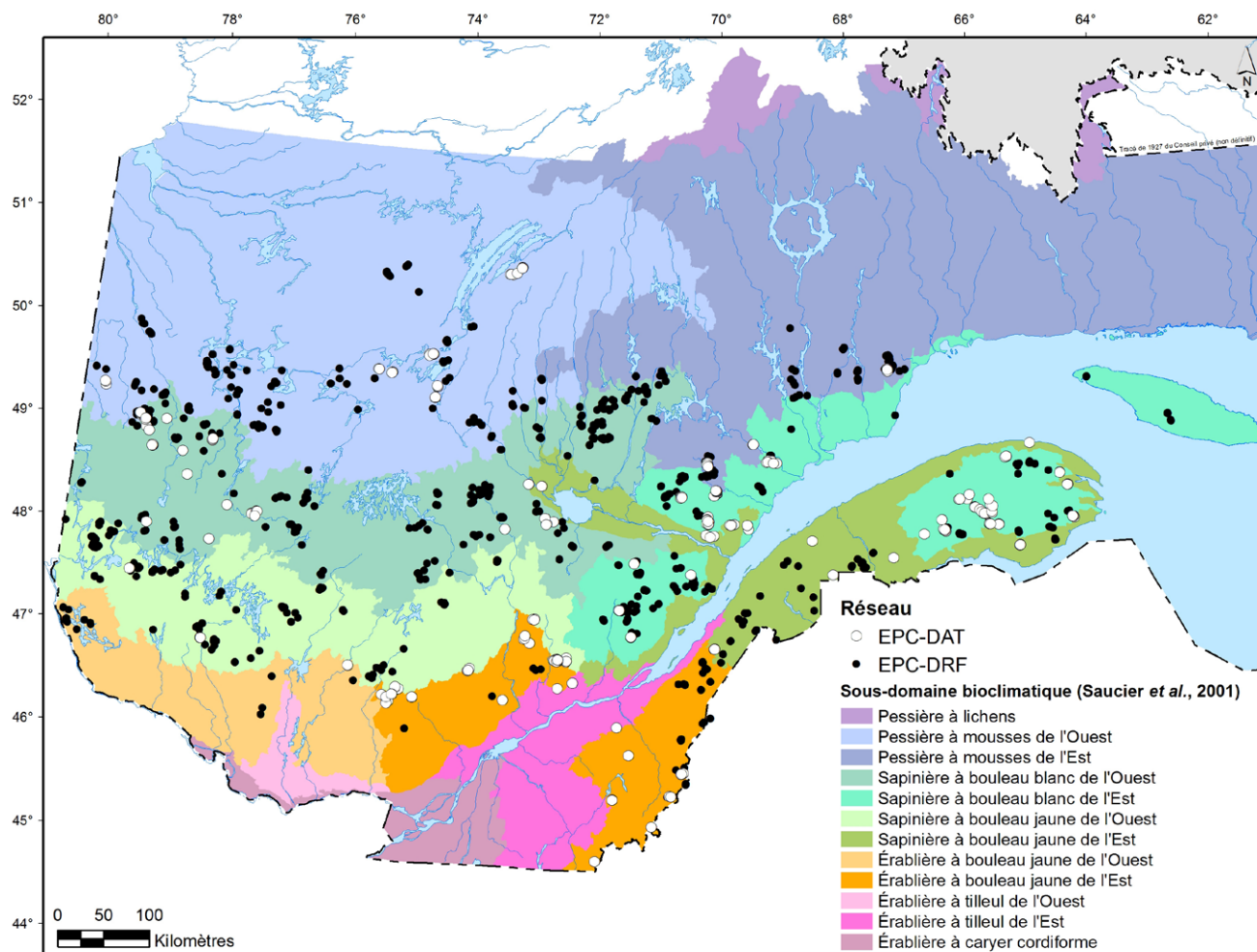


Figure 1. Répartition des placettes des réseaux de la mesure des effets réels de l'éclaircie précommerciale établis par la Direction de l'assistance technique (EPC-DAT) et par la Direction de la recherche forestière (EPC-DRF).

a été établi de 1995 à 1999 sous la responsabilité de la Direction de la recherche forestière (EPC-DRF) (Lafliche et Tremblay 2008). Tous deux sont constitués de placettes circulaires de 400 m² dans lesquelles, pour chaque essence commerciale, tous les arbres marchands (c'est-à-dire avec un diamètre à hauteur de poitrine [DHP, mesuré à 1,3 m] > 9 cm) sont dénombrés périodiquement par classes de 2 cm. Pour le réseau EPC-DAT, la régénération (hauteur ≥ 60 cm et DHP < 1,1 cm) est dénombrée dans une sous-placette centrale de 30 m², et les gaules (1 < DHP < 9,1 cm), dans l'ensemble de la placette de 400 m². Pour le réseau EPC-DRF, la régénération et les gaules sont dénombrées dans une sous-placette centrale de 100 m². Toujours dans le réseau EPC-DRF, les placettes sont installées par paires (une placette traitée par EPC et une placette non traitée [témoin] dans le même peuplement), avec une distance de 50 m entre leurs centres. Les placettes traitées ont été éclaircies à une densité résiduelle variant de 1 875 à 3 125 arbres·ha⁻¹, comme le prescrit le *Manuel d'aménagement forestier* (MFO 1992). Dans le réseau EPC-DAT, les placettes sont généralement regroupées dans un même secteur, à raison d'une placette témoin pour une à trois placettes traitées par EPC.

Pour les deux réseaux, nous avons estimé les caractéristiques avant traitement des placettes traitées à partir des données prises lors de l'établissement dans chacune des placettes témoins avec lesquelles elles étaient jumelées (tableau 1). Dans le réseau EPC-DRF et pour les mesurages effectués à partir de 2003 dans le réseau EPC-DAT, des informations complémentaires ont été prises sur 20 arbres-études représentatifs des essences principales et de leur distribution diamétrale. Pour ces arbres-études, le DHP (en mm) et la hauteur (en cm) ont été mesurés. De plus, l'âge a été déterminé pour au moins 3 arbres-études des principales essences-objectifs dans l'étage dominant ou codominant. Lors des mesurages effectués avant 2003 dans le réseau EPC-DAT, le nombre d'arbres-études variait de 3 à 5 par placette. Dans le réseau EPC-DRF, les placettes ont été mesurées immédiatement après le traitement, et tous les 5 ans par la suite. Pour le réseau EPC-DAT, la majorité des placettes ont été mesurées tous les 5 ans jusqu'à 20 ou 25 ans après traitement, et tous les 10 ans par la suite. Ainsi, des informations sont disponibles jusqu'à 20 ans pour les placettes du réseau EPC-DRF, et jusqu'à 45 ans pour celles du réseau EPC-DAT. Toutefois, nous avons jugé que le nombre de mesures effectuées plus de 35 ans après traitement était trop faible pour que nous puissions les utiliser dans la présente étude.

Pour estimer le volume marchand brut (VMB) dans les placettes, nous avons estimé d'abord la hauteur des arbres marchands avec la relation hauteur-diamètre d'Auger (2016), puis leur volume avec le tarif de cubage de Fortin et al. (2007), soit de la même manière que dans Artémis-2014 et Natura-2014. Les données ont ensuite été compilées à l'échelle de la placette.

2.2. Simulation avec les modèles de croissance

Nous avons utilisé les versions 2014 des modèles Artémis et Natura afin de simuler l'évolution des peuplements témoins et traités par EPC. Artémis est un modèle de croissance fonctionnant à l'échelle de l'arbre, de manière déterministe ou stochastique (Fortin et Langevin 2012). Il prévoit l'accroissement diamétral et la probabilité de mortalité de chacun des arbres marchands. Il comprend également un module de recrutement qui permet d'introduire de nouveaux arbres marchands (dont le DHP atteint 9,1 cm) dans la placette. Natura, quant à lui, est un modèle à l'échelle du peuplement qui prévoit l'évolution du VMB, de la surface terrière marchande (ST_M) et de la densité des arbres marchands, et ce, de manière déterministe. Il permet d'effectuer des simulations pour 5 groupes d'essences : les feuillus tolérants, les feuillus intolérants, les résineux tolérants, les résineux intolérants et le sapin baumier. À l'aide de la ST_M et de la densité des arbres marchands, on peut aussi calculer l'évolution du diamètre moyen quadratique (DQ) des arbres marchands.

Le mode de fonctionnement déterministe étant commun aux deux modèles et celui employé pour le calcul des possibilités forestières, nous l'avons utilisé afin d'évaluer la qualité des prévisions. Puisque les deux modèles simulent uniquement l'évolution des arbres marchands, nous n'avons pas utilisé les mesurages sans arbres marchands.

Afin d'évaluer la performance des modèles sur l'horizon le plus long possible, nous avons utilisé le premier mesurage comportant au moins un arbre marchand pour simuler l'évolution de chaque placette, et ce, sur l'ensemble de la période s'étendant jusqu'à la dernière mesure disponible. Ensuite, nous avons utilisé les données de l'avant-dernier mesurage pour prévoir les caractéristiques au dernier mesurage, afin d'évaluer l'effet d'avoir un temps plus grand depuis le traitement, et donc d'avoir des caractéristiques marchandes plus développées au départ des simulations.

Tableau 1. Caractéristiques moyennes (minimum et maximum entre parenthèses) des placettes des réseaux EPC-DRF et EPC-DAT disponibles pour l'analyse, en fonction du traitement et du temps après le traitement d'éclaircie précommerciale (EPC).

Caractéristique*	Traitement	Après traitement	5 ans	10 ans	15 ans	20 ans	25 ans	35 ans
Nombre de placettes	EPC	1054	1058	1055	938	485	208	50
	Témoïn	961	967	964	864	440	181	49
Âge (ans)	EPC	17 (5-56)	22 (8-61)	27 (13-66)	32 (18-60)	36 (23-65)	41 (28-70)	53 (37-72)
	Témoïn	18 (6-53)	22 (9-58)	27 (12-63)	32 (17-55)	36 (22-59)	40 (27-64)	52 (37-74)
Hauteur (m)	EPC	4,6 (1,8-11,9)	6,0 (2,6-13,1)	7,6 (3,8-14,4)	9,1 (4,6-16,7)	10,2 (4,8-17,9)	11,5 (7,0-18,7)	14,7 (8,4-21,0)
	Témoïn	4,6 (1,8-12,0)	6,0 (2,7-13,7)	7,4 (3,5-14,1)	8,7 (3,6-19,5)	9,7 (3,9-18,2)	11,2 (6,4-16,8)	14,0 (9,2-19,7)
Densité de la régénération (arbres·ha ⁻¹)	EPC	2758 (0-70333)	8950 (0-148667)	7867 (0-109667)	6051 (0-73333)	4921 (0-65000)	3085 (0-29333)	747 (0-5333)
	Témoïn	16110 (0-384333)	12109 (0-128333)	9398 (0-438000)	6140 (0-85000)	4452 (0-60333)	2208 (0-57667)	1014 (0-13667)
Densité des gaules (arbres·ha ⁻¹)	EPC	2319 (0-28400)	2813 (0-20100)	3648 (0-24450)	3514 (100-24100)	3656 (100-21425)	3398 (125-16775)	1687 (75-7975)
	Témoïn	12729 (775-53800)	15281 (1400-56600)	15611 (800-152100)	13462 (200-59850)	12121 (400-49375)	8992 (150-32050)	3940 (400-19675)
Densité des gaules 6-8 cm (arbres·ha ⁻¹)	EPC	562 (0-3400)	1119 (0-3900)	1171 (0-7200)	970 (0-4175)	802 (0-2850)	782 (50-2875)	558 (25-2250)
	Témoïn	1109 (0-12400)	2172 (0-8600)	3197 (75-20700)	3542 (200-9700)	3716 (400-10700)	3378 (125-10775)	2074 (125-6175)
Densité des arbres marchands (arbres·ha ⁻¹)	EPC	90 (0-1650)	344 (0-2150)	825 (0-2300)	1232 (0-3100)	1484 (125-2600)	1764 (225-2675)	1909 (1100-2825)
	Témoïn	110 (0-1850)	275 (0-2075)	638 (0-2475)	1065 (0-3325)	1380 (0-3650)	1875 (50-3225)	2237 (775-4000)
Densité totale (nombre·ha ⁻¹)	EPC	2409 (0-28400)	3157 (275-20825)	4474 (625-24825)	4747 (950-24875)	5140 (1050-22375)	5162 (1650-17950)	3596 (1425-9825)
	Témoïn	12839 (775-53825)	15556 (2075-56625)	16249 (1725-152375)	14526 (1150-60300)	13501 (1675-49625)	10867 (1900-32650)	6178 (1675-20975)
ST des gaules (m ³ ·ha ⁻¹)	EPC	3,3 (0,0-25,6)	5,4 (0,0-24,6)	5,9 (0,0-36,9)	5,2 (0,1-22,7)	4,7 (0,0-20,9)	4,6 (0,3-18,2)	3,0 (0,2-11,1)
	Témoïn	10,1 (0,2-57,1)	15,5 (1,4-57,9)	19,5 (2,5-110,0)	19,7 (0,8-54,0)	19,8 (2,0-53,9)	17,0 (0,6-53,4)	9,5 (0,7-29,9)
ST marchande (m ² ·ha ⁻¹)	EPC	1,0 (0,0-18,5)	3,6 (0,0-30,7)	9,2 (0,0-32,3)	15,2 (0,0-41,0)	19,9 (1,0-40,9)	25,7 (1,9-49,2)	34,1 (13,8-49,8)
	Témoïn	1,2 (0,0-18,6)	2,9 (0,0-22,5)	6,7 (0,0-33,9)	11,6 (0,0-41,4)	15,5 (0,0-46,4)	22,4 (0,4-47,5)	31,7 (7,2-50,3)
ST totale (m ² ·ha ⁻¹)	EPC	4,3 (0,0-32,9)	9,0 (0,5-36,2)	15,1 (1,6-41,2)	20,4 (3,1-43,3)	24,6 (5,6-42,1)	30,3 (8,1-50,0)	37,1 (18,9-50,9)
	Témoïn	11,3 (0,2-57,1)	18,4 (1,4-62,4)	26,1 (3,8-112,2)	31,4 (4,6-65,0)	35,3 (10,9-65,9)	39,4 (12,1-62,3)	41,3 (16,2-60,0)
VMB (m ³ ·ha ⁻¹)	EPC	3,2 (0,0-85,7)	11,3 (0,0-247,7)	31,9 (0,0-218,9)	60,0 (0,0-199,7)	84,9 (1,9-226,0)	119,0 (4,4-280,1)	188,1 (54,5-301,6)
	Témoïn	4,2 (0,0-92,1)	9,3 (0,0-118,8)	22,0 (0,0-179,7)	41,4 (0,0-216,9)	57,6 (0,0-235,8)	89,6 (0,8-230,9)	153,2 (21,0-244,8)
AAP en volume marchand brut (m ³ ·ha ⁻¹ ·an ⁻¹)	EPC		1,6 (-6,2-32,4)	4,1 (-5,8-24,8)	5,7 (-3,8-20,3)	6,1 (-2,2-17,7)	7,1 (-0,3-30,6)	5,9 (-0,6-11,4)
	Témoïn		1,0 (-7,1-14,6)	2,6 (-5,3-27,0)	3,9 (-0,3-17,7)	4,3 (-0,6-16,9)	6,2 (-2,1-15,7)	5,2 (-0,8-10,6)
Diamètre moyen quadratique marchand (cm)	EPC	11,3 (10,0-30,0)	11,1 (10,0-22,0)	11,6 (10,0-18,0)	12,3 (10,0-18,2)	12,9 (10,0-16,7)	13,4 (10,5-17,5)	15,1 (11,5-19,2)
	Témoïn	11,7 (10,0-31,0)	11,2 (10,0-29,5)	11,2 (10,0-21,8)	11,5 (10,0-17,9)	11,7 (10,0-16,0)	12,2 (10,0-15,2)	13,5 (10,8-16,4)

* ST : surface terrière; VMB : volume marchand brut; AAP : accroissement annuel périodique.

Comme les modèles simulent l'évolution des peuplements par période de 10 ans, nous avons effectué les prévisions portant sur des périodes de plus de 10 ans en réintroduisant dans le modèle les résultats de la période précédente comme point de départ de la période suivante (Power 2016). Puisque les mesures ont généralement été prises tous les 5 ans, les prévisions pour les mesurages quinquennaux situés au milieu d'une période de simulation donnée ont été obtenues par interpolation linéaire afin de pouvoir effectuer les comparaisons.

Nous avons effectué les prévisions avec le modèle Artémis à l'aide d'une version du modèle programmée sur la plateforme Capsis (Dufour-Kowalski et al. 2012). Dans le cas de Natura, étant donné que la version dans Capsis rejette les placettes qui n'ont pas au moins 4 arbres marchands et au moins un arbre-étude marchand dans l'étage codominant ou dominant (Auger 2017b), nous avons réalisé les prévisions avec une version du simulateur programmée dans le logiciel SAS (SAS Institute Inc., 2016), afin de conserver un maximum de placettes et de mesurages ayant au moins un arbre marchand.

2.2.1 Évaluation des prévisions

Nous avons évalué les prévisions obtenues avec Artémis et Natura en estimant leur biais (Éq. 1) et leur biais relatif (Éq. 2). Le biais consiste en un écart des prévisions par rapport aux valeurs observées (Pretzsch 2009).

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

$$\text{biais relatif} = \frac{1}{n \times \bar{y}} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i) \quad [2]$$

où y_i est la valeur observée d'une variable,

$\hat{y}_i$ est sa valeur prédite,

$\bar{y}$ est la moyenne des y_i et

n est le nombre d'observations.

Un biais négatif indique une surestimation de la part du modèle, tandis qu'un biais positif indique une sous-estimation.

Nous avons estimé les biais pour le VMB, l'accroissement annuel périodique en VMB (AAP), la ST_M , la densité des arbres marchands et le DQ. Nous avons analysé ces variables pour toutes les essences commerciales du peuplement prises

ensemble. Nous avons calculé le biais pour chacune des combinaisons du modèle employé (Artémis et Natura), du traitement (EPC et témoin), du temps de simulation, du groupe de végétations potentielles et du type de forêt de la placette. Un nombre minimal de 10 placettes a été retenu afin de former un groupe. Lorsque le nombre de placettes disponibles pour une combinaison donnée de type de forêt et de végétation potentielle était inférieur à 10, nous avons regroupé ces placettes avec celles d'un autre groupe afin de former des groupes avec des caractéristiques les plus homogènes possible, tout en respectant le seuil minimal de 10 placettes (tableau 2).

2.2.2 Caractérisation des biais des prévisions

Dans un premier temps, nous avons caractérisé l'importance des biais et des biais relatifs obtenus à partir du premier mesurage pour toutes les variables étudiées. En comparant l'évolution des biais jusqu'au dernier mesurage disponible, nous avons évalué l'effet de la longueur de l'horizon de simulation sur la qualité des prévisions.

Dans un second temps, nous avons examiné les biais obtenus à partir de l'avant-dernier mesurage afin de savoir si l'utilisation des données prises plus longtemps après EPC, et donc dans des peuplements ayant plus d'attributs marchands, influençait la qualité des prévisions.

2.2.3 Analyse des biais en volume marchand brut

Afin d'explorer les causes possibles des biais des prévisions des modèles, nous avons étudié le biais du VMB simulé à partir du premier mesurage en fonction de différentes variables explicatives : le traitement; le temps de simulation; les densités de la régénération, des gaules, des grosses gaules (classes de DHP de 6 et 8 cm), ainsi que celle des arbres marchands du peuplement avant traitement; la hauteur moyenne et l'âge moyen des arbres-études immédiatement après traitement. Nous avons d'abord standardisé les variables continues. Ensuite, nous avons examiné l'effet individuel de chaque variable à l'aide d'un modèle linéaire mixte avec une matrice de covariances tenant compte des mesures répétées sur une même placette, à l'aide de la procédure MIXED du logiciel SAS (SAS Institute Inc. 2015). Nous avons aussi testé les interactions de chacune des variables avec le temps et avec le traitement. Enfin, pour chacun des modèles, nous avons ordonné les résultats selon l'importance de la valeur obtenue de la statistique t de Student.

Tableau 2. Nombre de placettes par type de forêt et par groupe de végétations potentielles en fonction du temps de simulation et du traitement.

Type de forêt	Groupe de végétations potentielles		Temps de simulation (années)	Nombre de placettes	
	Nom	Contenu (nombre de placettes témoins)		Témoin	EPC
Pessière noire (En)	RS2 (Sapinière à épinette noire)	RS2 (29), RS3 (8) et ME1-MJ2-MS2 (6)	5	36	38
			10	30	31
			15	17	13
	RE2 (Pessière noire à mousses ou à éricacées)	RE2 (117)	5	104	115
			10	85	92
			15	56	64
			20	24	28
	RE3 (Pessière noire à sphaignes)	RE3 (40)	5	28	36
			10	21	28
			15	13	18
Pessière noire à résineux (EnRx)	RS2 (Sapinière à épinette noire)	RS2 (61), MS2 (6), ME1-MJ2 (2) et RS3 (1)	5	68	66
			10	59	59
			15	47	46
			20	20	15
	RE2 (Pessière noire à mousses ou à éricacées)	RE2 (32), RE3 (3) et RB2 (1)	5	34	33
			10	34	31
			15	26	23
			20	11	11
Pinède grise (Pg)	RE2 (Pessière noire à mousses ou à éricacées)	RE2 (107), ME1 (17), RS2-RS5 (10), RE1 (7) et MS2 (1)	5	112	122
			10	99	110
			15	80	76
			20	30	42
	MS2 (Sapinière à bouleau blanc)	MS2 (172), MJ2 (10), MS1 (8) et MS6 (5)	25	13	11
			5	164	187
			10	153	178
			15	106	129
			20	56	65
			25	33	36
Sapinière (Sb)	RS2 (Sapinière à épinette noire)	RS2 (93), RS5 (17), RS3 (2), RB2-RE2 (2) et RS4 (1)	35	12	13
			5	107	115
			10	94	108
			15	64	70
			20	30	33
	RE2 (Pessière noire à mousses ou à éricacées)	RE2 (20), RS2 (10), ME1-RB1-RB2-RE3 (8) et RS3-RS5 (5)	25	12	10
			5	71	79
			10	61	69
			15	37	54
			20	24	32
Sapinière à résineux (SbRx)	RS2 (Sapinière à épinette noire)	RS2 (59), RE2-RE3 (7), RS5 (5), RS3 (4) et RB2 (2)	25	<10	10
			5	36	38
			10	34	38
			15	28	30
	RE2 (Pessière noire à mousses ou à éricacées)	RE2 (20), RS2 (10), ME1-RB1-RB2-RE3 (8) et RS3-RS5 (5)	20	13	13
			5	51	66
			10	48	58
			15	37	50
Résineux (Rx)	MS2 (Sapinière à bouleau blanc)	MS2 (48), MJ1-MJ2 (5), ME1 (2), MS1 (2) et MS6 (2)	20	25	19
			25	12	<10
	RS2 (Sapinière à épinette noire)	RS2 (53) et RS5 (5)	5	56	57
			10	53	55
			15	42	44
			20	25	19
Résineux à feuillus intolérants (RxFi)	MS2 (Sapinière à bouleau blanc)	MS2 (18), MS6 (5) et MJ2 (2)	25	11	<10
			5	25	26
			10	24	24
			15	20	18
	RS2 (Sapinière à épinette noire)	RS2 (21), RS1-RS5 (9) et RE2 (4)	5	34	42
			10	33	41
			15	20	27
	MS2 (Sapinière à bouleau blanc)	MS2 (18), MS6 (5) et MJ2 (2)	5	34	42
			10	33	41
			15	20	27
			5	34	42
Feuillus intolérants à résineux (FiRx)	RS2 (Sapinière à épinette noire)	RS2 (21), RS1-RS5 (9) et RE2 (4)	10	33	41
			15	20	27
	MS2 (Sapinière à bouleau blanc)	MS2 (18), MS6 (5) et MJ2 (2)	5	34	42
			10	33	41
			15	20	27
			5	34	42
	RS2 (Sapinière à épinette noire)	RS2 (21), RS1-RS5 (9) et RE2 (4)	10	33	41
			15	20	27
			5	34	42
			10	33	41

2.2.4 Simulations à long terme

Nous avons simulé l'évolution à long terme du VMB, de la ST_M et de la densité des arbres marchands de chaque placette à partir du premier et de l'avant-dernier mesurage. Le DQ a été calculé à partir de la ST_M et de la densité marchande. Pour juger du réalisme des prévisions à long terme, nous avons comparé la moyenne de l'évolution des caractéristiques des placettes avec les valeurs observées dans les placettes-échantillons temporaires du 4^e programme d'inventaire forestier de la DIF. Cela a été réalisé pour chaque combinaison de modèle, de traitement, de type de forêt et de groupe de végétations potentielles qui partageaient les mêmes caractéristiques (essence principale, végétation potentielle, densité et âge moyen).

2.3. Solutions envisagées pour simuler à long terme l'évolution des peuplements propices à une EPC

2.3.1 Utilisation d'un échantillon de PEP

Nous avons choisi un sous-échantillon de PEP pouvant être considérées comme semblables à celles du dernier mesurage des placettes du réseau de l'EPC de la DRF, afin de tester si celles-ci pouvaient être utilisées pour développer des équations permettant de simuler l'évolution des peuplements après EPC. Les PEP sélectionnées devaient avoir un âge, une densité (gaules et arbres marchands) et un AAP comparables à ceux des placettes du réseau de la DRF. Nous avons alors utilisé les valeurs minimales des placettes du réseau de la DRF, déterminées à partir des données du dernier mesurage à l'aide de deux régressions par quantile. La première modélisait le 5^e percentile du logarithme du nombre d'arbres total en fonction du DQ. La seconde modélisait le 5^e percentile de l'AAP en fonction du logarithme du DQ. Nous avons sélectionné les PEP qui présentaient à la fois 1) un DQ plus grand que celui du 5^e percentile des placettes du réseau de la DRF pour une densité donnée; 2) un AAP plus grand que celui du 5^e percentile des placettes du réseau de la DRF pour un diamètre donné.

2.3.2 Utilisation du modèle Artémis en mode stochastique

Puisque les placettes des réseaux de l'EPC ont été établies dans des peuplements ayant une grande quantité de gaules, leur évolution diffère probablement de celle prévue par Artémis lorsque ce modèle

est utilisé de manière déterministe. En effet, pour permettre l'ajustement des modèles, les prévisions faites en mode déterministe produisent des résultats reflétant le comportement moyen des placettes, parmi lesquelles les peuplements très denses ne sont que faiblement représentés. Pour essayer de mieux prendre en compte cette caractéristique particulière des placettes des réseaux de la mesure des effets réels de l'EPC, nous avons fait des simulations stochastiques comptant 500 réalisations pour chacune de ces placettes, et ce, à partir de leur avant-dernier mesurage. Pour obtenir des prévisions plus optimistes, nous avons classé les résultats des réalisations de chaque placette en ordre croissant de VMB prévu à chaque pas de simulation, pour ne conserver ensuite que celles correspondant aux 75^e et 90^e percentiles à chaque pas de simulation.

3. Résultats

3.1. Biais des prévisions

3.1.1 Biais sur 15 à 35 ans d'évolution

La majorité (88 %) des placettes des réseaux de l'EPC contenaient au moins un arbre marchand immédiatement après ou 5 ans après traitement. À ce moment, ces placettes avaient un âge moyen d'environ 20 ou 25 ans. Pour 11 % des placettes, le 1^{er} arbre marchand apparaît 10 ans après traitement (âge moyen : 27 ans), et pour le 1 % restant, il n'est présent qu'après 15 ans (âge moyen : 32 ans). Cette différence dans l'âge de mesure du 1^{er} arbre marchand crée un décalage entre le temps de simulation et le temps après traitement (tableau 3). Nous avons préféré utiliser le temps de simulation plutôt que le temps après traitement dans l'analyse des résultats, étant donné que le décalage avec le temps après traitement est minime et que le décalage sur l'âge est pratiquement nul (tableau 3).

Tableau 3. Temps moyen après éclaircie précommerciale (EPC) et âge moyen des arbres dans les placettes en fonction du temps de simulation.

Temps de simulation (ans)	Nombre de placettes utilisées (témoins + traitées)	Temps moyen après EPC (ans)	Âge moyen (ans)
0	1957	3	20
5	1946	8	25
10	1750	13	30
15	1255	17	34
20	581	21	39
25	205	25	44
35	70	35	55

Les biais des prévisions du VMB des peuplements témoins et traités par EPC sont grands et presque toujours positifs, ce qui correspond donc à une sous-estimation. Ils varient de -1 à $+92 \text{ m}^3\cdot\text{ha}^{-1}$ avec Artémis (biais relatifs de -14 à $+77 \%$) et sont généralement plus petits qu'avec Natura (de -1 à $+168 \text{ m}^3\cdot\text{ha}^{-1}$, ou biais relatifs de -6 à 84% ; figure 2). Avec les deux modèles, les biais en $\text{m}^3\cdot\text{ha}^{-1}$ augmentent avec la longueur de l'horizon de simulation, alors que les biais relatifs augmentent dès la première période de simulation, puis se stabilisent. De même, les biais des deux modèles sont plus grands pour les peuplements traités que pour les peuplements témoins. Ils tendent à être plus petits pour les pessières noires que pour les autres types de forêts. Par contre, les biais relatifs diffèrent peu entre les types de forêts et les groupes de végétations potentielles. Les biais en VMB sont principalement attribuables aux essences principales des groupes de simulation. Certaines essences secondaires ont de grands biais relatifs, mais cela n'a qu'un effet limité sur le biais total, compte tenu du faible volume de ces essences (résultats non présentés).

Les biais des prévisions de l'AAP ont permis d'analyser les résultats des modèles pour chacune des périodes de simulation en éliminant l'accumulation de biais provenant des périodes précédentes. Nous avons ainsi pu évaluer l'évolution de la performance des modèles au fil de l'horizon de simulation. Comme pour le VMB, le modèle Artémis est moins biaisé (biais de $-0,3$ à $+7,3 \text{ m}^3\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$; biais relatifs de -33 à $+86 \%$) que Natura (biais de $-0,6$ à $+14,7 \text{ m}^3\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$; biais relatifs de -43 à $+211 \%$; annexe 1). De plus, les biais de l'AAP sont plus grands pour les peuplements traités que pour ceux témoins, et ils sont plus petits

pour les pessières noires que pour les autres types de forêts. Les biais et les biais relatifs augmentent entre la première et la deuxième période de simulation, puis demeurent relativement constants.

Les biais des prévisions de la ST_M sont également grands et positifs pour les deux modèles, allant de $0,0$ à $16,1 \text{ m}^2\cdot\text{ha}^{-1}$ (biais relatifs de 0 à 73%) pour Artémis et de $-0,3$ à $+30,5 \text{ m}^2\cdot\text{ha}^{-1}$ (biais relatifs de -15 à $+83 \%$) pour Natura (annexe 2). De même, les biais augmentent avec la longueur de l'horizon de simulation, alors que les biais relatifs se stabilisent.

Les prévisions des deux modèles pour la densité des arbres marchands sont biaisées positivement (annexe 3). Ces biais apparaissent dès le début de la simulation, puis s'accroissent de façon pratiquement linéaire, alors que les biais relatifs tendent à se stabiliser. Les biais et les biais relatifs sont plus grands avec Natura (sous-estimation de 38 à $2251 \text{ arbres}\cdot\text{ha}^{-1}$ ou de 24 à 87%) qu'avec Artémis (sous-estimation de 30 à $1610 \text{ arbres}\cdot\text{ha}^{-1}$ ou de 10 à 70%). Comme pour les prévisions du VMB, les biais des prévisions de la densité sont plus petits pour les pessières noires que pour les autres types de forêts.

Le DQ, quant à lui, est plutôt bien évalué par les deux modèles. Artémis produit des prévisions biaisées de $-2,9$ à $+1,1 \text{ cm}$ (c'est-à-dire allant d'une surestimation de 22% à une sous-estimation de 8%) et Natura produit des prévisions biaisées de $-4,7$ à $+2,3 \text{ cm}$ (c'est-à-dire d'une surestimation de 39% à une sous-estimation de 15% ; annexe 4). Avec les deux modèles, le DQ est généralement sous-estimé dans les placettes traitées, tandis qu'il est surestimé dans les placettes témoins.

Tableau 4. Moyennes de la densité des gaules et des arbres marchands, de la surface terrière marchande (ST_M) et de l'âge des peuplements au début du dernier intervalle de croissance.

Traitement*	Temps après EPC	Nombre de placettes	Densité des gaules (nombre·ha ⁻¹)	Densité des arbres marchands (nombre·ha ⁻¹)	ST_M (m ² ·ha ⁻¹)	Âge (ans)
Témoin	5	92	13 682	289	3,0	23
	10	408	14 996	658	6,9	27
	15	251	14 476	963	10,3	32
EPC	5	106	2 695	337	3,6	22
	10	444	3 411	855	9,6	27
	15	265	3 682	1 170	14,3	31

* EPC : Éclaircie précommerciale

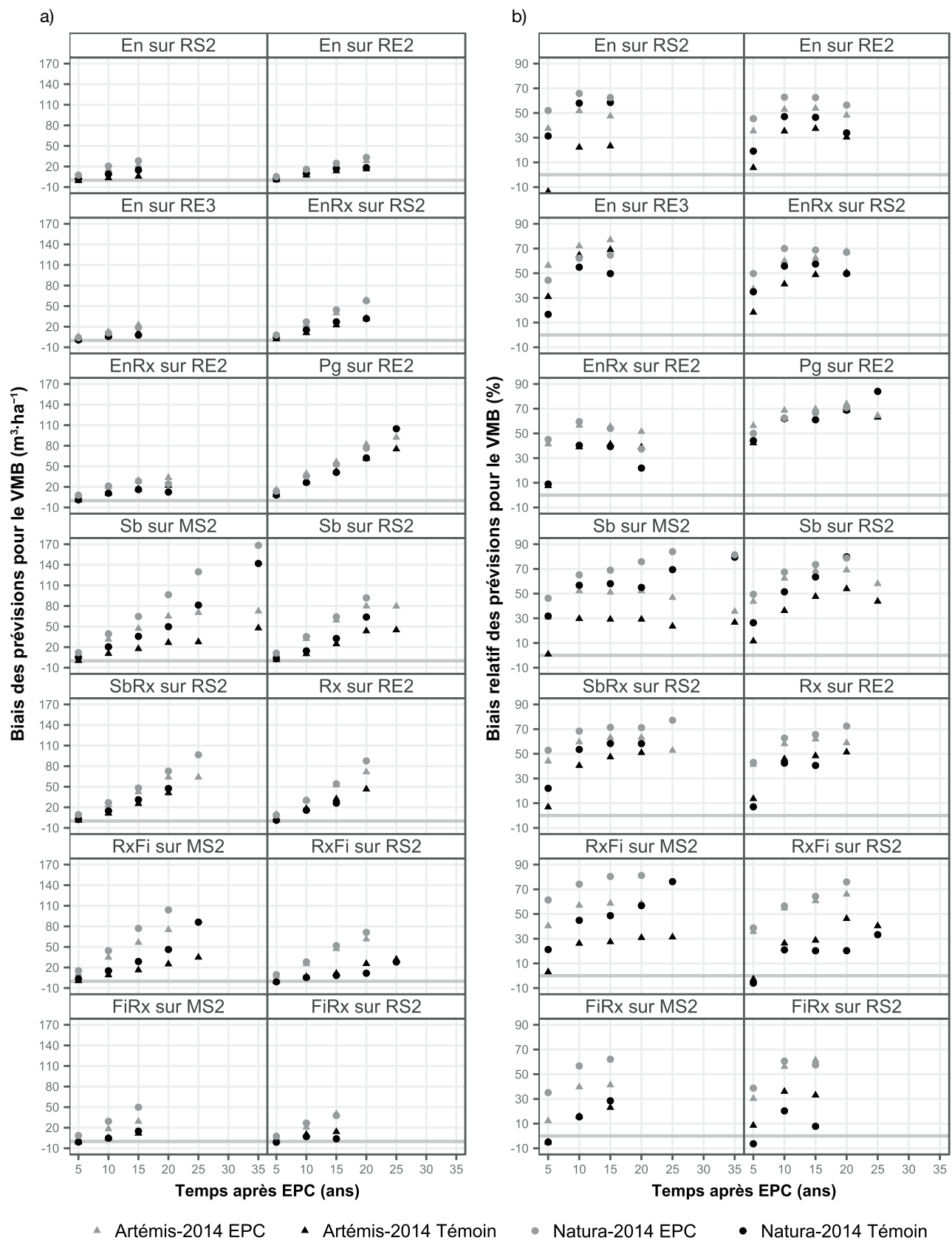


Figure 2. Biais (a) et biais relatifs (b) des prévisions d'Artémis-2014 et de Natura-2014 pour le volume marchand brut (VMB), toutes essences confondues, simulé à partir du premier mesurage, par traitement et par combinaison de type de forêt et de groupe de végétations potentielles (voir le tableau 2).

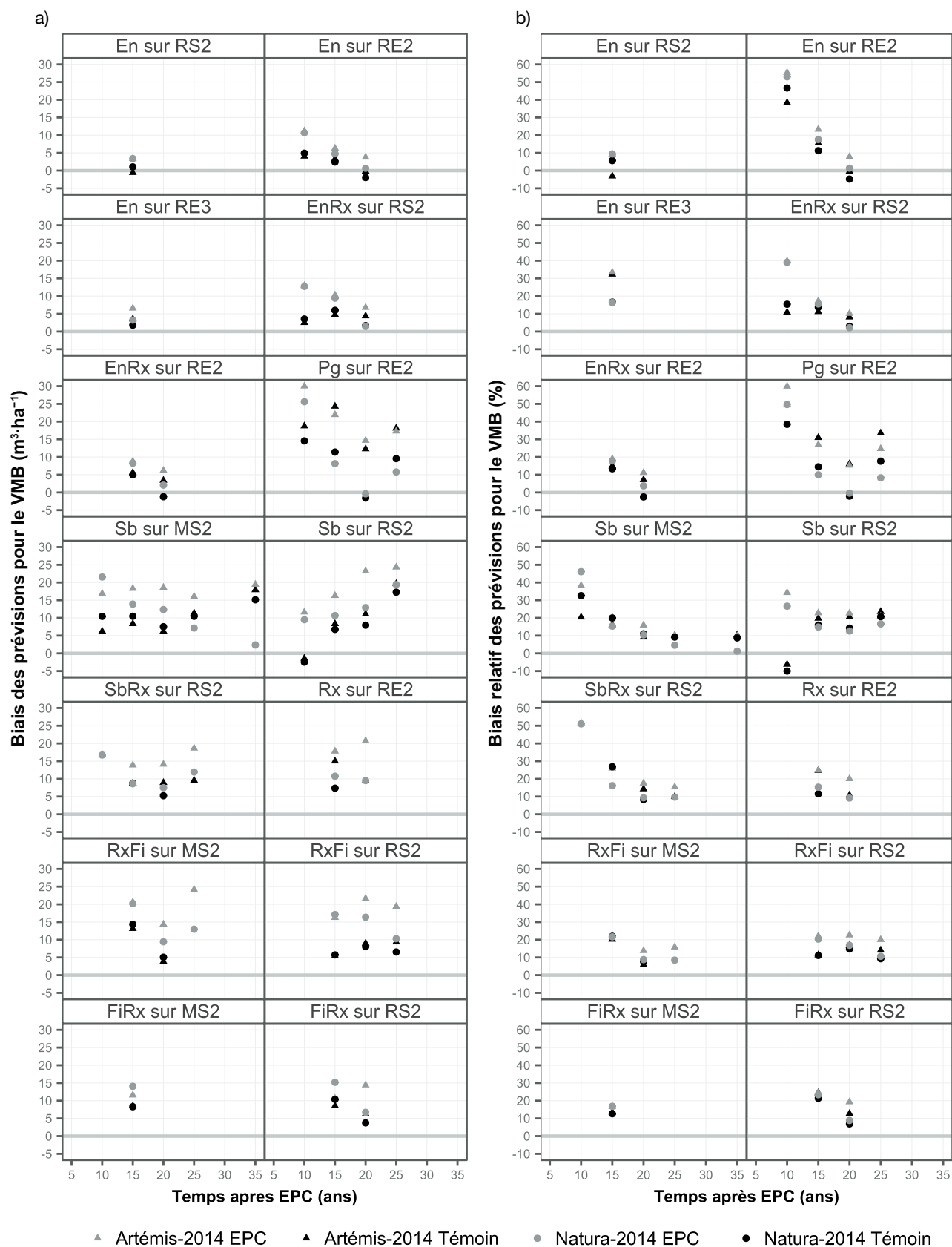


Figure 3. Biais (a) et biais relatifs (b) des prévisions d'Artémis-2014 et de Natura-2014 pour le volume marchand brut (VMB), toutes essences confondues, simulé à partir de l'avant-dernier mesurage, par traitement et par combinaison de type de forêt et de groupe de végétations potentielles (voir le tableau 2).

3.1.2 Biais sur la dernière période de croissance

Les caractéristiques moyennes des peuplements au début du dernier intervalle de croissance sont présentées au tableau 4. Tout comme les simulations sur 15 à 35 ans, celles du dernier intervalle de croissance se traduisent par une sous-estimation du VMB, laquelle est plus marquée dans les placettes traitées que dans les placettes témoins (figure 3). Les prévisions d'Artémis pour le VMB ont des biais allant de -1 à $+31 \text{ m}^3\cdot\text{ha}^{-1}$ (biais relatifs de -6 à $+60 \%$), alors que celles de Natura ont des biais de -3 à $+26 \text{ m}^3\cdot\text{ha}^{-1}$ (biais relatifs de -10 à $+53 \%$). Les biais augmentent avec le temps depuis l'intervention dans les sapinières sur le groupe des végétations potentielles RS2, alors qu'il diminue pour les pessières noires sur la végétation potentielle RE2 et pour les pinèdes grises. Pour les autres combinaisons de type de forêt et de groupe de végétations potentielles, les biais varient peu en fonction du temps après EPC. Contrairement aux simulations sur 15 à 35 ans, pour lesquelles Artémis produit des prévisions moins biaisées, les biais du dernier intervalle de croissance sont généralement plus petits avec Natura, et ce, principalement pour les peuplements traités lorsque le temps après EPC est d'au moins 20 ans.

Les biais relatifs des prévisions pour le VMB diminuent avec le temps depuis l'EPC pour plusieurs combinaisons de types de forêts et de groupes de végétations potentielles (figure 3b). En fait, jusqu'à concurrence de 20 ans, plus le temps depuis l'EPC est long au début d'une simulation, meilleures sont les performances des modèles pour un même horizon. Dix ans après EPC, les deux modèles produisent en moyenne des biais relatifs de 35 % sur l'ensemble des groupes. Vingt ans après EPC, ces biais relatifs moyens diminuent à 13 % et à 6 % pour Artémis et Natura, respectivement. Par la suite, ils tendent à se stabiliser; 25 ans après EPC, ils sont respectivement de 17 % et de 10 %. Les différences des biais relatifs des prévisions du VMB entre les peuplements traités et témoins sont également beaucoup plus faibles (moins de 9 % pour Artémis et moins de 6 % pour Natura) 20 ans après EPC, et ce, avec les deux modèles.

Les biais des prévisions de la ST_M (annexe 5) et de la densité des arbres marchands (annexe 6) obtenus avec le dernier intervalle de croissance diminuent en général avec l'augmentation du temps depuis l'EPC au début des simulations. Les deux modèles sous-estiment la ST_M et la densité des arbres marchands pour tous les groupes, à l'exception de Natura

pour les sapinières traitées par EPC sur le groupe des végétations potentielles MS2, où la ST_M est surestimée 35 ans après traitement.

Les biais des prévisions pour le DQ sont assez faibles (de $-1,0$ à $+0,8 \text{ cm}$; biais relatifs de -9 à $+7 \%$) et généralement stables pour tous les temps d'initiation des simulations après EPC (annexe 7). Le DQ des peuplements témoins est surestimé, peu importe le temps depuis l'EPC et le modèle, sauf dans le cas des pinèdes grises avec Artémis, où il y a sous-estimation du DQ. Pour les peuplements traités, le biais des prévisions du DQ est parfois positif, parfois négatif selon le modèle et le temps depuis l'EPC.

3.2. Explication des biais en volume marchand brut

Les 4 variables qui contribuent le plus à expliquer les biais des prévisions du VMB sont les mêmes pour les deux modèles. Elles sont toutes liées positivement aux biais, ce qui veut dire qu'une augmentation pour l'une ou l'autre de ces variables se traduit par une augmentation des biais (tableau 5). La variable la plus importante, et de loin, est la longueur de l'horizon de simulation. Les trois autres sont la hauteur moyenne des arbres et la densité des grosses gaules au début de la simulation, ainsi que le traitement (témoin ou EPC). De plus, l'influence positive du traitement et de la hauteur moyenne des arbres sur le biais augmente avec le temps de simulation.

3.3. Comportement des modèles de croissance à long terme

Lorsque le premier mesurage sert comme point de départ des simulations, les prévisions à long terme des modèles Artémis et Natura du VMB sont relativement semblables pour 10 des 14 groupes (figure 4). Natura prévoit cependant des volumes plus grands qu'Artémis pour les pessières noires sur RE3, et Artémis prévoit de plus grands volumes que Natura pour les groupes de végétations potentielles MS2 (sapinières, résineux à feuillus intolérants et feuillus intolérants à résineux). Nous remarquons que les prévisions à long terme des modèles demeurent à l'intérieur du nuage de points des valeurs observées dans les placettes de la DIF. De plus, les prévisions moyennes à long terme des deux modèles pour le VMB sont généralement inférieures aux moyennes des valeurs observées dans les placettes des réseaux de la mesure des effets réels de l'EPC, et ce, tant pour les peuplements traités que témoins.

Tableau 5. Coefficients standardisés des modèles linéaires mixtes pour expliquer les biais des prévisions du volume marchand brut, toutes essences confondues.

Modèle	Effets*	Coefficient standardisé	Erreur type	Valeur de <i>t</i>
Artémis-2014	TEMPS	14,14	0,27	52,7
	TRT	6,19	0,59	10,4
	AGE	-3,15	0,62	-5,1
	HT	7,33	0,59	12,4
	GAULES	2,33	0,62	3,8
	GAULES ₆₋₈	6,22	0,60	10,3
	MARCHAND	4,33	0,63	6,8
	REGEN	-2,63	0,60	-4,4
	TRT × TEMPS	3,14	0,26	12,1
	AGE × TEMPS	-2,31	0,26	-8,8
	HT × TEMPS	3,18	0,26	12,0
	MARCHAND × TEMPS	0,86	0,26	3,3
	REGEN × TEMPS	-0,63	0,27	-2,3
	AGE × TRT	-1,20	0,60	-2,0
	GAULES × TRT	2,86	0,59	4,9
	REGEN × TRT	1,93	0,58	3,3
Natura-2014	TEMPS	15,07	0,29	52,1
	TRT	6,12	0,66	9,2
	AGE	-2,62	0,69	-3,8
	HT	5,90	0,67	8,8
	GAULES	4,54	0,67	6,7
	GAULES ₆₋₈	6,21	0,67	9,3
	MARCHAND	1,47	0,71	2,1
	REGEN	-1,59	0,67	-2,4
	TRT × TEMPS	3,21	0,28	11,4
	AGE × TEMPS	-2,17	0,28	-7,7
	HT × TEMPS	2,24	0,29	7,8
	MARCHAND × TEMPS	-0,75	0,28	-2,7
	AGE × TRT	-0,89	0,67	-1,3
	GAULES × TRT	2,56	0,65	3,9
	REGEN × TRT	1,90	0,65	2,9

* TEMPS : temps de simulation; TRT : traitement; AGE : âge moyen au début de la simulation; HT : hauteur moyenne des arbres au début de la simulation; GAULES : densité des gaules avant traitement; GAULES₆₋₈ : densité des grosses gaules (classes de DHP : 6 et 8 cm) avant traitement; MARCHAND : densité des arbres marchands avant traitement; REGEN : densité de la régénération avant traitement.

Par contraste, lorsque l'avant-dernier mesurage est utilisé comme point de départ des simulations, les différences de comportement à long terme des deux modèles sont plus grandes pour les prévisions du VMB pour les pinèdes grises, les sapinières, les sapinières

à résineux et pour les peuplements de résineux, de résineux à feuillus intolérants et de feuillus intolérants à résineux (figure 5). Pour ces types de forêts, Natura prévoit souvent de plus grands volumes qu'Artémis, particulièrement pour les peuplements traités. Les

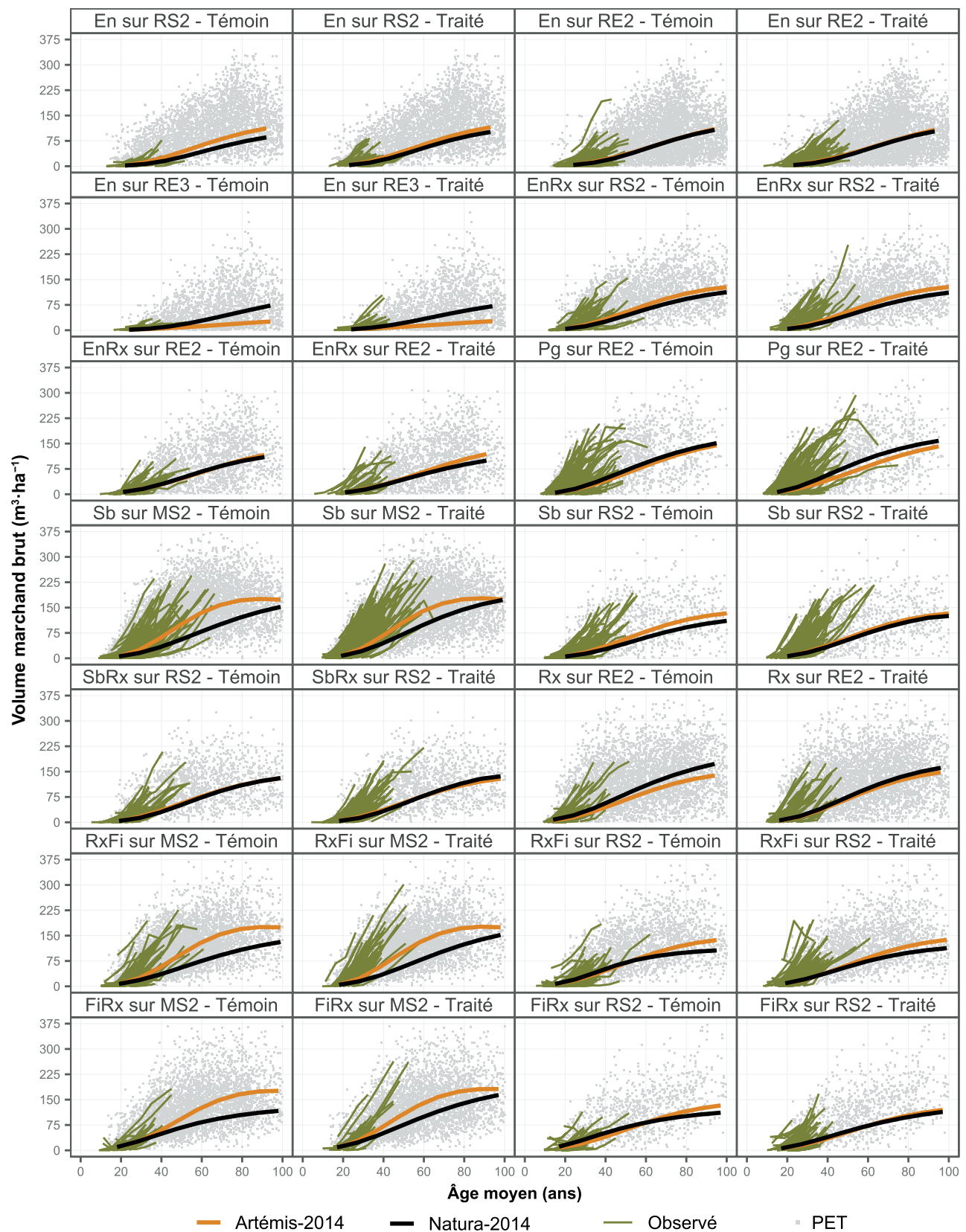


Figure 4. Évolution du volume marchand brut (VMB), toutes essences confondues, dans les placettes des réseaux de l'EPC (lignes vertes), à partir du premier mesurage, selon le modèle de croissance (lignes orange et noires) et le traitement, par combinaison de type de forêt et de groupe de végétations potentielles (voir le tableau 2). Les points gris sont les placettes-échantillons temporaires (PET) et permanentes (PEP) comparables du 4^e programme d'inventaire forestier de la Direction des inventaires forestiers.

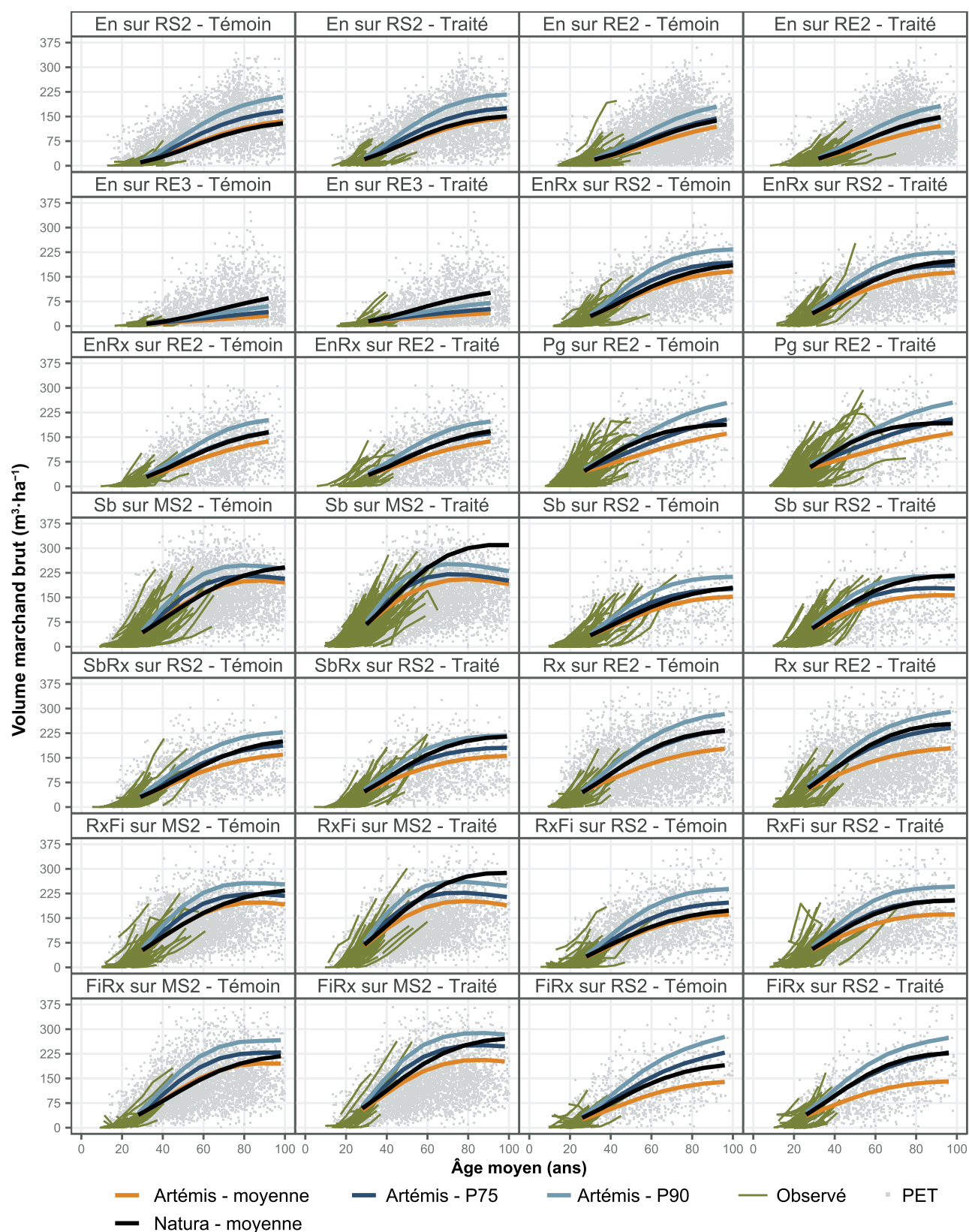


Figure 5. Évolution du volume marchand brut (VMB), toutes essences confondues, dans les placettes des réseaux de l'EPC (lignes vertes), à partir de l'avant-dernier mesurage, selon le modèle de croissance en mode déterministe (lignes orange et noires) et avec Artémis-2014 en mode stochastique pour les réalisations correspondant au 75^e percentile (P75, lignes bleu foncé) et au 90^e percentile (P90, lignes bleu pâle) et le traitement, par combinaison de type de forêt et de groupe de végétations potentielles (voir le tableau 2). Les points gris sont les placettes-échantillons temporaires (PET) et permanentes (PEP) comparables du 4^e programme d'inventaire forestier de la Direction des inventaires forestiers.

prévisions de Natura se rapprochent donc ainsi des valeurs moyennes observées dans les placettes des réseaux de l'EPC. Les écarts sont moindres entre les modèles pour les pessières noires et les pessières noires à résineux (sauf pour les pessières noires sur RE3).

3.4. Solutions envisagées pour simuler à long terme des peuplements propices à une EPC

3.4.1 Utilisation de sous-échantillons de PEP

L'examen des valeurs observées du VMB dans les placettes des réseaux de l'EPC permet de constater que celles-ci se trouvent généralement dans la portion supérieure du nuage de points des valeurs observées dans l'ensemble des PET et des PEP (figure 4).

Pour les pessières noires, les PEP sélectionnées sur la base de leur ressemblance avec les placettes des réseaux de l'EPC présentent un AAP moyen de $2,3 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$, soit une valeur entre celle des placettes traitées ($2,8 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$) et celle des placettes témoins ($2,1 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$, tableau 6). Par contre, le VMB moyen est plus grand dans les PEP sélectionnées ($50,8 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$) que dans les placettes témoins et traitées des réseaux de l'EPC ($31,5$ et $34,7 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$, respectivement).

Pour les sapinières, l'AAP moyen dans les PEP sélectionnées demeure inférieur de $1,2 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ à celui dans les placettes témoins, et inférieur de plus de $4 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ à celui dans les placettes traitées. Le VMB moyen dans les PEP sélectionnées se situe entre ceux des placettes témoins et traitées (tableau 6).

De même, pour les pinèdes grises, les différences entre les PEP sélectionnées et les placettes des réseaux de l'EPC sont grandes : les placettes témoins et traitées ont des AAP moyens plus grands de $2,7$ et de $3 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$, respectivement, que les PEP sélectionnées, et des VMB moyens plus grands de $10,4$ et de $22,6 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$, respectivement (tableau 6).

3.4.2 Utilisation du modèle Artémis en mode stochastique

Les prévisions d'Artémis, lorsque ce modèle est utilisé en mode stochastique à partir de l'avant-dernier mesurage, génèrent des courbes qui se comportent très différemment des courbes moyennes. Ainsi, avec les prévisions des quantiles supérieurs, le comportement des courbes s'apparente à celui des segments de croissance des placettes des réseaux de l'EPC. Pour les placettes témoins, les prévisions d'évolution du 75^e percentile sont généralement celles qui s'approchent le plus des observations, alors que pour les placettes traitées, c'est plutôt le cas de celles du 90^e percentile (figure 5). Nous remarquons aussi que pour les placettes témoins,

Tableau 6. Accroissement annuel périodique (AAP) en volume marchand brut (VMB), VMB et âge moyen à la fin du dernier intervalle de 5 ans des arbres mesurés dans les placettes-échantillons du réseau EPC-DRF, de même qu'à la fin de la première période d'accroissement dans les placettes-échantillons permanentes (PEP) sélectionnées sur la base de leur ressemblance avec le réseau EPC-DRF.

Type de forêt	Type de couvert	Type de végétation potentielle	Source	Caractéristiques des placettes-échantillons		
				AAP en VMB pour l'intervalle ($\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$)	VMB moyen pour l'intervalle ($\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$)	Âge moyen pour l'intervalle (ans)
Pessière noire	Résineux	Résineuse	EPC-DRF-Témoins	2,1	31,5	37,5
			EPC-DRF-Traités	2,8	34,7	36,2
			PEP	2,3	50,8	38,9
Sapinière	Mixte	Mixte	EPC-DRF-Témoins	5,6	58	32
			EPC-DRF-Traités	8,5	93	31,3
			PEP	4,4	75,3	32,5
Pinède grise	Résineux	Résineuse	EPC-DRF-Témoins	5,8	68,5	29
			EPC-DRF-Traités	6,1	80,7	29,1
			PEP	3,1	58,1	31,3

les prévisions obtenues avec Natura s'apparentent souvent à celles obtenues autour du 75^e percentile d'Artémis, tandis que pour les placettes traitées, les prévisions de Natura se situent entre les moyennes autour du 75^e et du 90^e percentile d'Artémis.

4. Discussion

4.1. Biais des prévisions

Les résultats de ce travail montrent que les modèles Artémis et Natura produisent des prévisions biaisées de l'évolution de peuplements propices à une EPC, que ceux-ci soient traités ou non. Bien que la détermination des VMB nécessite le recours à une relation hauteur-diamètre et à un tarif de cubage, l'utilisation des mêmes équations pour les valeurs observées et les prévisions permet de limiter les différences pouvant être induites par ces relations. Toutefois, la valeur des volumes peut être biaisée, tant pour les prévisions que pour les observations. En effet, un examen des hauteurs prédites avec la relation hauteur-diamètre d'Auger (2016) montre qu'elles sont surestimées. L'analyse des biais des deux modèles permet de poser l'hypothèse que leur ampleur s'explique, en grande partie, par le stade de développement juvénile de ces peuplements. Compte tenu de la relation positive entre les biais et le nombre de gaules de fort diamètre, on peut supposer que le recrutement d'arbres marchands issus de cette cohorte d'arbres fait augmenter rapidement le VMB des placettes des réseaux de l'EPC. Les travaux de Gauthier *et al.* (2015) ont d'ailleurs montré la corrélation entre la densité des grosses gaules et le recrutement d'arbres marchands dans les peuplements de feuillus. Cette hypothèse est renforcée par l'augmentation du biais en densité des arbres marchands au cours de la période de simulation. Ainsi, les modèles sous-estiment le recrutement des arbres marchands dans les placettes propices à l'EPC, possiblement parce qu'ils ne comportent pas les variables explicatives qui permettraient de prévoir le recrutement sans biais dans de telles placettes (par exemple, la densité de la régénération et des gaules).

Les placettes des réseaux de la mesure des effets réels de l'EPC constituent un sous-échantillon dont les caractéristiques diffèrent fortement de l'échantillon ayant servi à ajuster les modèles Artémis et Natura. Pour les placettes témoins, la densité moyenne des gaules s'apparente plutôt au 95^e percentile des données d'ajustement des modèles (tableaux 4 et 7). De plus, l'âge moyen des placettes des réseaux de l'EPC lors de l'avant-dernier mesurage se compare

au 5^e percentile des données, alors que la densité moyenne des arbres marchands varie entre le 25^e et le 75^e percentile et que la ST_M moyenne varie entre le 5^e et le 50^e percentile (tableaux 4 et 7). Dans le cas des placettes éclaircies, malgré une densité des gaules comparable à celle des PEP, les forts biais sont possiblement attribuables à la sélection des arbres lors du traitement, laquelle a rendu leur distribution spatiale plus uniforme. L'uniformité de la distribution des arbres, pour une même densité relative, est d'ailleurs une différence importante entre les peuplements naturels et les peuplements traités par EPC, comme l'a noté le Comité scientifique chargé d'étudier l'éclaircie précommerciale (CCSMAF 2002). Ainsi, les arbres éclaircis subissent moins de compétition et disposent de plus de ressources pour croître (del Rio *et al.* 2014).

Puisque le VMB, la ST_M et la densité des arbres marchands augmentent avec le temps après traitement, il n'est pas étonnant de constater que la valeur des biais tend à s'accroître en fonction de la longueur de l'horizon de simulation. L'examen des biais relatifs permet d'analyser l'importance des biais en tenant compte des valeurs des observations auxquelles ils sont reliés. Dans le cas présent, les arbres marchands au début des simulations jouent un rôle prépondérant. La diminution des biais relatifs avec le temps après traitement pourrait s'expliquer par le fait que les placettes alors plus vieilles présentent des caractéristiques plus près de celles des données ayant servi à ajuster les modèles. La simulation des peuplements en jeune âge est d'ailleurs un défi reconnu pour certains autres modèles de croissance (Lacerte *et al.* 2004).

La réduction de la différence entre les biais des peuplements traités et témoins pourrait, quant à elle, s'expliquer par l'homogénéisation des caractéristiques entre les placettes traitées et témoins à mesure que le temps après EPC augmente. En fait, à mesure que les peuplements vieillissent, le processus d'autoéclaircie s'opère dans les placettes où la densité est trop forte, ce qui rend des ressources disponibles pour les arbres demeurant vivants et favorise leur passage à des dimensions marchandes (Pretzsch 2009). Toutefois, puisque la taille d'échantillon des groupes diminue fortement avec le temps après traitement, la précision du biais estimé lors de nos analyses diminue, elle aussi. Il est donc préférable de s'attarder à l'évolution générale des biais, plutôt qu'à leur valeur précise.

L'ensemble des résultats montre que Natura et Artémis performant mieux lorsque les peuplements

Tableau 7. Distribution*, par végétation potentielle et par sous-domaine bioclimatique, de certaines variables ayant servi à ajuster les modèles Artémis-2014 et Natura-2014.

Groupe	Densité des gaules d'essences commerciales (nombre·ha ⁻¹)					Densité des arbres marchands (nombre·ha ⁻¹)					Surface terre ^{re} marchande (m ² ·ha ⁻¹)					Âge moyen (ans)					
	P5	P25	P50	P75	P95	P5	P25	P50	P75	P95	P5	P25	P50	P75	P95	P5	P25	P50	P75	P95	
Végétation potentielle	MS2	0	500	1750	4250	13250	50	375	775	1175	1975	0,6	8,6	17,1	25,6	36,1	26	40	52	67	100
	RE2	0	500	1500	3500	8000	0	475	850	1250	1925	0,0	6,5	13,4	21,1	32,1	30	48	69	113	165
	RE3	0	1000	2250	4000	7250	25	275	625	1000	1600	0,2	3,0	8,5	15,2	25,7	40	69	105	134	178
	RS2	0	1000	2750	5000	11250	50	525	900	1225	1825	0,9	9,7	16,8	23,7	34,1	31	52	80	120	162
	RS3	0	1000	2500	5000	10000	50	300	650	1050	1700	0,5	4,9	11,5	19,7	30,0	33	52	71	106	153
Sous-domaine bioclimatique	3EST	0	500	1500	3250	9000	50	425	675	1000	1500	0,8	12,9	20,3	26,4	35,6	29	45	57	73	102
	3OUEST	0	500	1250	2750	7000	175	400	575	800	1225	3,9	14,2	20,5	26,4	35,7	34	50	65	83	115
	4EST	0	500	1500	3500	11000	75	400	750	1150	1800	1,0	8,7	16,9	24,7	36,2	25	38	48	61	89
	4OUEST	0	250	1250	3000	8750	75	350	600	925	1475	1,7	9,9	16,5	23,4	32,3	30	45	58	74	104
	5EST	0	750	2500	6000	15750	25	400	825	1375	2175	0,4	7,0	16,5	26,7	39,5	27	43	57	76	114
	5OUEST	0	500	1500	3250	9000	25	350	700	1100	1750	0,5	6,0	13,9	21,6	32,2	26	40	53	70	104
	6EST	0	1250	2500	4500	9500	50	575	925	1250	1825	0,6	8,3	14,8	22,3	33,2	49	89	119	144	178
	6OUEST	0	500	1500	3250	7500	0	350	725	1125	1825	0,0	4,5	11,9	20,0	32,4	38	57	90	121	167

* P5 = 5^e percentile; P25 = 25^e percentile; P50 = médiane (50^e percentile); P75 = 75^e percentile; P95 = 95^e percentile.

atteignent des conditions comparables à celles des peuplements ayant servi à l'ajustement de ces deux modèles. Ainsi, une période de 15 à 20 ans après EPC semble nécessaire avant que les peuplements propices à une EPC, qu'ils soient traités ou non, puissent être simulés avec Artémis ou Natura de manière acceptable. Ce délai implique que l'âge minimal des peuplements propices à une EPC devrait être d'environ 30 ans au début de la simulation. À partir de ce moment, les biais ont largement diminué pour les pessières (et s'approchent même de 0 avec Natura). Pour les autres types de forêts, bien que les biais demeurent grands, les valeurs relatives diminuent. Avant l'âge de 30 ans, les peuplements passent par les phases d'établissement et d'exclusion (Oliver et Larson 1996), pendant lesquelles d'importants changements s'opèrent rapidement; leurs caractéristiques ne sont pas encore stabilisées et donc, leur évolution est plus difficile à prévoir.

4.2. Comportement des prévisions à long terme

Les courbes d'évolution à long terme produites par Artémis et Natura semblent réalistes, en particulier lorsque ces modèles utilisent des peuplements plus âgés comme point de départ. Toutefois, ces modèles génèrent le plus souvent des sous-estimations pour la période pour laquelle des données sont disponibles. Leurs prévisions sont donc conservatrices pour les peuplements propices à l'EPC. Lorsque la simulation commence à l'avant-dernier mesurage, les prévisions de Natura sont alors celles qui se rapprochent le plus des observations, tant pour les peuplements témoins que traités.

Ces observations sont cohérentes avec l'analyse des biais qui montre généralement une meilleure performance de Natura et une amélioration des performances des modèles lorsque les simulations sont effectuées pour des peuplements plus âgés. Malgré cela, ces courbes de simulation ne doivent pas être utilisées pour évaluer l'effet à long terme de l'EPC. En effet, les courbes simulées du témoin ne tiennent pas compte du très grand nombre de gaules présentes dans les placettes, notamment celles dans les classes de DHP de 6 et de 8 cm (tableau 1). Puisque plusieurs de ces grosses gaules passeront au stade marchand au cours des prochaines années, la courbe simulée des placettes témoins peut ne pas être représentative de l'évolution réelle de ces placettes dans le futur. Cela rend hasardeux la comparaison entre les courbes simulées des peuplements témoins et traités. Comme nous l'avons mentionné précédemment, les placettes des réseaux

de la mesure des effets réels constituent un sous-échantillon qui diffère fortement de l'échantillon ayant servi à ajuster les modèles.

4.3. Piste de solutions envisagées pour simuler à long terme des peuplements propices à une EPC

Bien que les placettes des réseaux de l'EPC se comparent aux PET et aux PEP les plus productives (figure 4), l'échantillonnage des PEP les plus productives ne permet pas de retrouver des combinaisons de VMB et d'AAP comparables aux placettes des réseaux EPC à un âge comparable pour les peuplements de sapins et de pins gris. L'utilisation des PEP les plus productives pour modéliser les peuplements propices à une EPC ne serait donc envisageable que pour les peuplements d'épinettes noires. Cette approche comporte toutefois des limites. Étant donné que le choix des PEP se fait à environ 30 ans (afin de correspondre avec le dernier mesurage des placettes des réseaux de la mesure des effets réels de l'EPC), la profondeur temporelle des observations des PEP demeure limitée, puisque l'âge moyen et l'âge maximal du dernier mesurage de ces placettes sont de 46 ans et de 73 ans, respectivement. Ainsi, cette solution ne devrait être employée que pour les peuplements d'épinettes noires.

L'utilisation d'Artémis avec une approche stochastique permet aussi d'obtenir diverses évolutions. En stratifiant les résultats en fonction de leur rang, il est possible de travailler uniquement avec les évolutions faisant partie des percentiles supérieurs et d'obtenir des prévisions plus optimistes. Alors, les courbes moyennes de prévisions adoptent une forme s'apparentant grandement aux segments d'évolution observée. De plus, le comportement à long terme des courbes ainsi obtenues semble réaliste. La similitude des courbes d'évolution en ST_M confirme le bon comportement des prévisions. Toutefois, la détermination du VMB fait appel à des relations hauteur-diamètre qui ne sont pas nécessairement bien adaptées au contexte étudié (diamètre plus grand pour une hauteur donnée dans les peuplements traités par EPC), et cela doit être pris en compte lors de l'utilisation des valeurs prédites de VMB.

Considérant ces résultats, la meilleure avenue pour simuler l'évolution à l'échelle des arbres des peuplements propices à une EPC serait de procéder par simulations stochastiques avec Artémis et de construire des courbes moyennes avec les seuils de percentiles appropriés. Lorsque le but est d'avoir des prévisions à l'échelle des

peuplements, Natura semble produire des résultats acceptables. Cependant, ces deux approches — et particulièrement l'approche stochastique — doivent être utilisées avec prudence puisqu'elles peuvent mener à des estimations largement supérieures à la moyenne des peuplements. Bien que ces approches semblent appropriées, le manque de profondeur temporelle des observations provenant des réseaux de l'EPC ne nous permet pas de confirmer la validité des résultats pendant tout le développement du peuplement.

Une autre avenue possible serait de modifier les modèles Natura et Artémis afin de tenir compte du nombre de gaules, notamment les plus grosses. En ce sens, plusieurs modèles utilisés aux États-Unis (FVS, Dixon 2002) et au Canada, notamment en Ontario (FVS-Ontario, Lacerte et al. 2006) et en Colombie-Britannique (TASS, Mitchell 1975), intègrent des informations sur le gaulis. La présence d'informations sur les gaules pourrait permettre aux modèles de mieux prévoir le recrutement des arbres marchands dans les jeunes peuplements. Cela dit, l'intégration de ces nouvelles informations lors de la calibration et de l'application des modèles pose plusieurs défis. Un premier découle du fait que les gaules ne sont pas suivies individuellement, ce qui implique que les équations dynamiques actuellement utilisées par Artémis pour prévoir l'accroissement en diamètre de chacun des arbres de taille marchande ne pourraient pas être utilisées telles quelles. Un second défi vient du fait que les gaules sont mesurées sur une plus petite superficie (sous-placettes de 40 ou de 100 m²) que les arbres marchands (placettes de 400 m²), et qu'il faut donc s'assurer que la distribution des espèces et des diamètres des gaules dans les sous-placettes représente adéquatement celle des placettes de 400 m². Un troisième défi réside dans les informations disponibles afin de faire fonctionner le modèle. Le nombre de gaules par espèce et par classe de DHP est disponible dans les PET de la DIF. Cependant, les modèles sont parfois utilisés avec des données d'inventaire provenant d'autres sources qui ne fournissent pas cette information. Enfin, la complexification des modèles représente un dernier défi : si le nombre de gaules est utilisé comme variable explicative dans le module de recrutement des arbres marchands, il sera nécessaire de prévoir leur évolution par l'ajout d'un module de recrutement de gaules.

Toutes ces questions devront être analysées en détail avant de modifier les modèles. Ultiment, la calibration de modèles existants ou le développement de nouveaux modèles avec des données prises

dans des réseaux comme ceux de la mesure des effets réels, lorsque ceux-ci posséderont une plus grande profondeur temporelle, permettra de simuler adéquatement le développement des peuplements propices à une EPC.

5. Conclusion

Les placettes des réseaux de la mesure des effets réels de l'EPC constituent un sous-échantillon très différent de l'échantillon ayant servi à ajuster les modèles Artémis et Natura. Ces modèles ne permettent donc pas de simuler adéquatement l'évolution des peuplements dont les arbres sont en majorité au stade de gaulis. Dans ce contexte, la DRF déconseille l'utilisation de ces deux modèles (Tremblay et al. 2016). Avant d'utiliser ces modèles pour simuler l'effet de traitements sylvicoles appliqués en bas âge, comme l'éclaircie précommerciale, il faut donc attendre que les peuplements aient atteint des caractéristiques ressemblant à celles des données ayant servi à ajuster Artémis et Natura, ce qui correspond à un âge d'environ 30 ans.

Malgré cette précaution, nos résultats indiquent que les deux modèles sous-estiment le VMB dans tous les types de forêts sauf les peuplements d'épinettes noires, et ce, davantage dans les peuplements soumis à une EPC que dans ceux non traités. Utilisé en mode déterministe et avec des données prises au moins 20 ans après EPC, Natura fournit les meilleures estimations à court et à long terme. Par contre, le modèle Artémis, lorsqu'il est utilisé en mode stochastique et en choisissant de ne retenir que les réalisations correspondant à un certain rang percentile supérieur à la moyenne, permet également de bien représenter le développement des peuplements propices à l'EPC à l'échelle de l'arbre, mais seulement à condition de commencer la simulation au moins 20 ans après le traitement.

Aucune des diverses solutions examinées utilisant la forme actuelle des modèles ne permet d'avoir des estimations fiables pour tous les types de forêts et groupes de végétations potentielles. Certains développements semblent donc essentiels. À moyen terme, il pourrait s'agir de prendre en compte les gaules dans les modèles existants, puisque celles-ci sont la source du recrutement des arbres marchands, qui est grandement sous-estimé lors de la simulation de placettes propices à l'EPC. Toutefois, cette modification entraînerait une complexification des modèles qui ne se ferait pas sans coût et qui devrait être évaluée sérieusement avant d'être mise en place. À plus long terme, il est impératif de continuer

la prise des données dans les placettes des réseaux de la mesure des effets réels de l'EPC de manière à pouvoir porter un jugement sur un horizon temporel plus long.

Pour l'heure, nous recommandons d'utiliser le modèle Natura pour prévoir l'évolution des peuplements de résineux d'origine naturelle propices à l'EPC, qu'ils soient traités ou non.

Remerciements

La réalisation de travail a été rendue possible grâce à l'implication de M. David Pothier à titre d'initiateur et de titulaire du réseau de placettes de la mesure des effets réels de la Direction de la recherche forestière (EPC-DRF) jusqu'en 2004. Ce travail met également à contribution les données du réseau établi sous la gouverne de MM. Jacques Martel et Conrad Mérette de la Direction de l'assistance technique (EPC-DAT) et tous leurs collaborateurs. Nos remerciements s'adressent également à M. Michel Beaulieu, responsable de l'implantation du réseau EPC-DRF, ainsi qu'à M. Louis Faucher, responsable actuel du suivi des deux réseaux. Il faut aussi souligner la contribution des autres collègues de la DRF, des équipes des bureaux régionaux et des unités de gestion du ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, ainsi que des firmes ayant participé à la prise des données sur le terrain.

Les auteurs tiennent également à remercier M. Jean-Pierre Saucier, M. Marcel Prévost, les réviseurs scientifiques anonymes et Mme Denise Tousignant, pour leurs commentaires qui ont contribué à améliorer le document, ainsi que Mmes Viviane St-Arnaud, Nathalie Langlois et Maripierre Jalbert pour la mise en page, le graphisme et l'édition. La très grande majorité de ces travaux ont été financés dans le cadre du projet interne n° 1423322-1422240-142332056 de la DRF.

Références

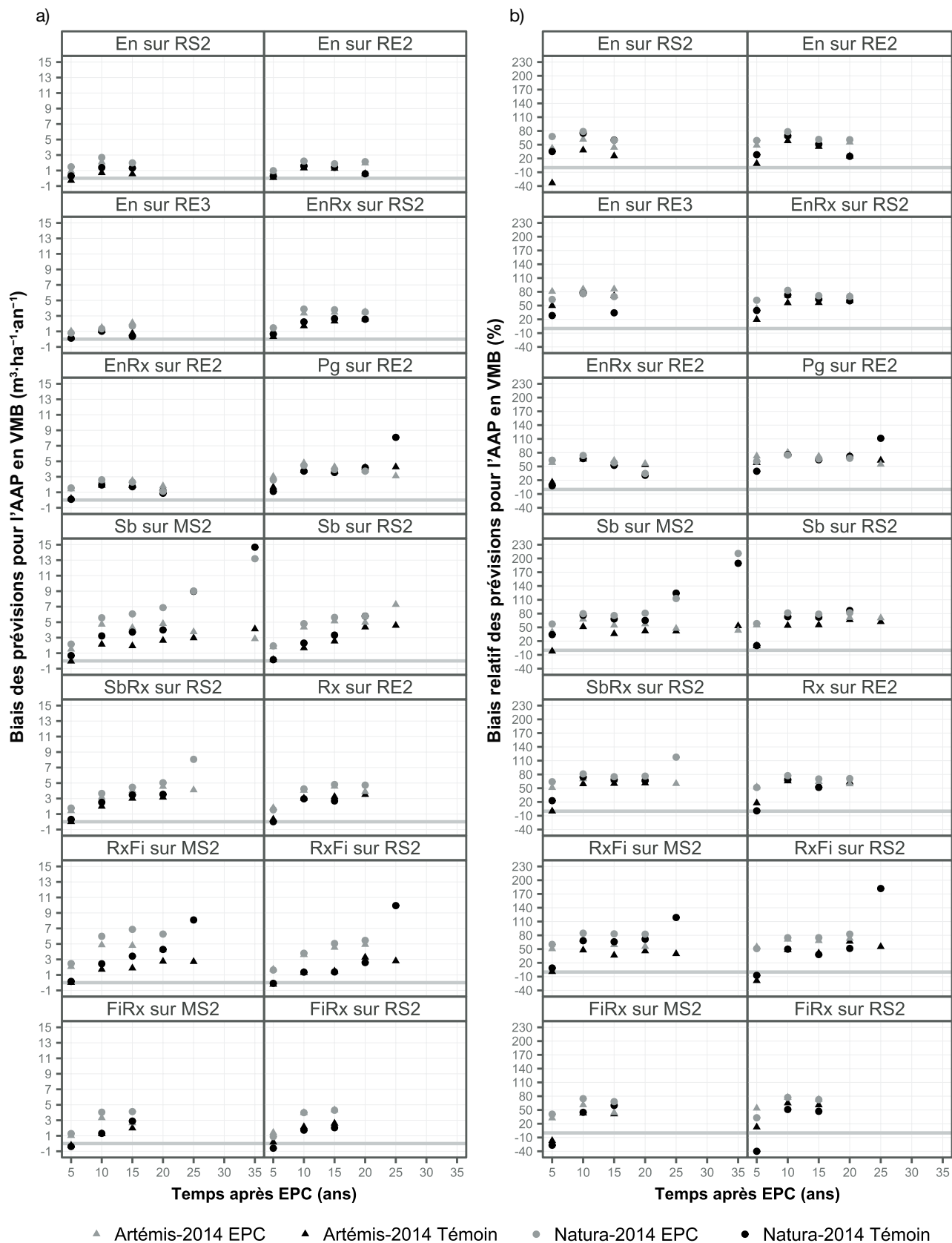
- Auger, I., 2016. *Une nouvelle relation hauteur-diamètre tenant compte de l'influence de la station et du climat pour 27 essences commerciales du Québec*. Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de la recherche forestière. Note de recherche forestière n° 146. 31 p. [<https://www.mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Auger-Isabelle/Note146.pdf>]
- Auger, I., 2017a. *Natura-2014 : Mise à jour et évaluation du modèle de croissance forestière à l'échelle du peuplement*. Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de la recherche forestière. Note de recherche forestière n° 147. 31 p. [<http://www.mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Auger-Isabelle/Note147.pdf>]
- Auger, I., 2017b. *Guide d'utilisation du simulateur de croissance forestière Natura-2014 sur Capsis*. Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de la recherche forestière. Guide Version 1.0. 38 p. [<https://mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Auger-Isabelle/GuideUtilisationNatura-2014.pdf>]
- [BFEC] Bureau du forestier en chef, 2013. *Manuel de détermination des possibilités forestières 2013-2018*. Gouvernement du Québec, Bureau du forestier en chef, Roberval, Québec. 247 p. [http://forestierenchef.gouv.qc.ca/wp-content/uploads/2013/01/MDPF_VF.pdf]
- [CCSMAF] Comité consultatif scientifique du Manuel d'aménagement forestier, 2002. *Le traitement d'éclaircie précommerciale pour le groupe de production prioritaire SEPM*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles, Direction de la recherche forestière. Avis scientifique. 125 p. [<https://mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Corporatif/Avis-scient-precom.pdf>]
- del Río, M., S. Condés et H. Pretzsch, 2014. *Analyzing size-symmetric vs. size-asymmetric and intra- vs. inter-specific competition in beech (Fagus sylvatica L.) mixed stands*. For. Ecol. Manage. 325: 90-98.
- Dixon, G.E., 2002. *Essential FVS: A user's guide to the Forest Vegetation Simulator*. U. S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Management Service Center. Internal Report. Fort Collins, CO. 226 p. (Revised: September 24, 2018). [<https://www.fs.fed.us/fmrc/ftp/fvs/docs/gtr/EssentialFVS.pdf>]
- Dufour-Kowalski S., B. Courbaud, P. Dreyfus, C. Meredieu et F. de Coligny, 2012. *Capsis: an open software framework and community for forest growth modelling*. Ann. For. Sci. 69: 221-233.

- Fortin, M. et L. Langevin, 2010. *Artémis-2009 : un modèle de croissance basé sur une approche par tiges individuelles pour les forêts du Québec*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Direction de la recherche forestière. Mémoire de recherche forestière n° 156. 48 p. [<https://mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Fortin-Mathieu/Memoire156.pdf>]
- Fortin, M. et L. Langevin, 2012. *Stochastic or deterministic single-tree models: is there any difference in growth predictions?* Ann. For. Sci. 69(2): 271-282.
- 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(5): 754-765.
- Gauthier, M.-M., F. Guillemette et S. Bédard, 2015. *On the relationship between saplings and ingrowth in northern hardwood stands*. For. Ecol. Manage. 358: 261-271
- Kuehne, C, A.R. Weiskittel, R.G. Wagner et B.E. Roth, 2016. *Development and evaluation of individual tree- and stand-level approaches for predicting spruce-fir response to commercial thinning in Maine, USA*. For. Ecol. Manage. 376: 84-95.
- Lacerte, V., G.R. Larocque, M. Woods, W.J. Parton et M. Penner, 2004. *Testing the Lake States variant of FVS (Forest Vegetation Simulator) for the main forest types of northern Ontario*. For. Chron. 80(4): 495-506.
- Lacerte, V., G.R. Larocque, M. Woods, W.J. Parton et M. Penner, 2006. *Calibration of the forest vegetation simulator (FVS) model for the main forest species of Ontario, Canada*. Ecol. Model. 199(3): 336-349.
- Laflèche, V. et S. Tremblay, 2008. *Résultats de cinq ans de la mesure des effets réels du traitement d'éclaircie précommerciale de peuplements à dominance résineuse*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Direction de la recherche forestière. Mémoire de recherche forestière n° 152. 34 p. [<http://mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Tremblay-Stephane/Memoire152.pdf>]
- [MER] Ministère de l'Énergie et des Ressources, 1979. *Guide des traitements sylvicoles*. Gouvernement du Québec, ministère de l'Énergie et des Ressources, Direction des communications. Québec, QC.
- [MER] Ministère de l'Énergie et des Ressources, 1989. *Manuel d'aménagement forestier, 1^{re} édition*. Gouvernement du Québec, ministère de l'Énergie et des Ressources. Québec, QC. 255 p.
- [MFFP] Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, 2015. *Ressources et industries forestières – Portrait statistique, édition 2015*. Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction du développement de l'industrie des produits du bois. Québec, QC. 91 p. [<https://mffp.gouv.qc.ca/wp-content/uploads/portrait-statistique-2015.pdf>]
- [MFO] Ministère des Forêts, 1992. *Manuel d'aménagement forestier, 2^e édition*. Gouvernement du Québec, ministère des Forêts. Québec, QC. 267 p.
- [MFO] Ministère des Forêts, 1993. *Ressource et industrie forestières – Portrait statistique, édition 1993*. Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, Direction des orientations et stratégies. Québec, QC. 99 p. [<https://mffp.gouv.qc.ca/wp-content/uploads/Complete1993.pdf>]
- Mitchell, K.J. 1975. *Dynamics and simulated yield of Douglas-fir*. For. Sci. Monogr. 17. 40 p.
- [MRN] Ministère des Ressources naturelles, 1996. *Ressource et industrie forestières – Portrait statistique, édition 1996*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles. Québec, QC. 142 p. [<https://mffp.gouv.qc.ca/wp-content/uploads/Complete1996.pdf>]
- [MRN] Ministère des Ressources naturelles, 1998. *Manuel d'aménagement forestier, 3^e édition*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles. Québec, QC. 122 p.
- [MRNF] Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, 2005. *Ressources et industries forestières – Portrait statistique, édition 2004*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles et de la Faune. Québec, QC. 470 p. [<https://mffp.gouv.qc.ca/wp-content/uploads/Complete2004.pdf>]
- [MRNF] Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, 2007. *Ressources et industries forestières – Portrait statistique, édition 2007*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Direction du développement de l'industrie des produits forestiers. Québec, QC. 506 p. [<https://mffp.gouv.qc.ca/wp-content/uploads/Complete2007.pdf>]

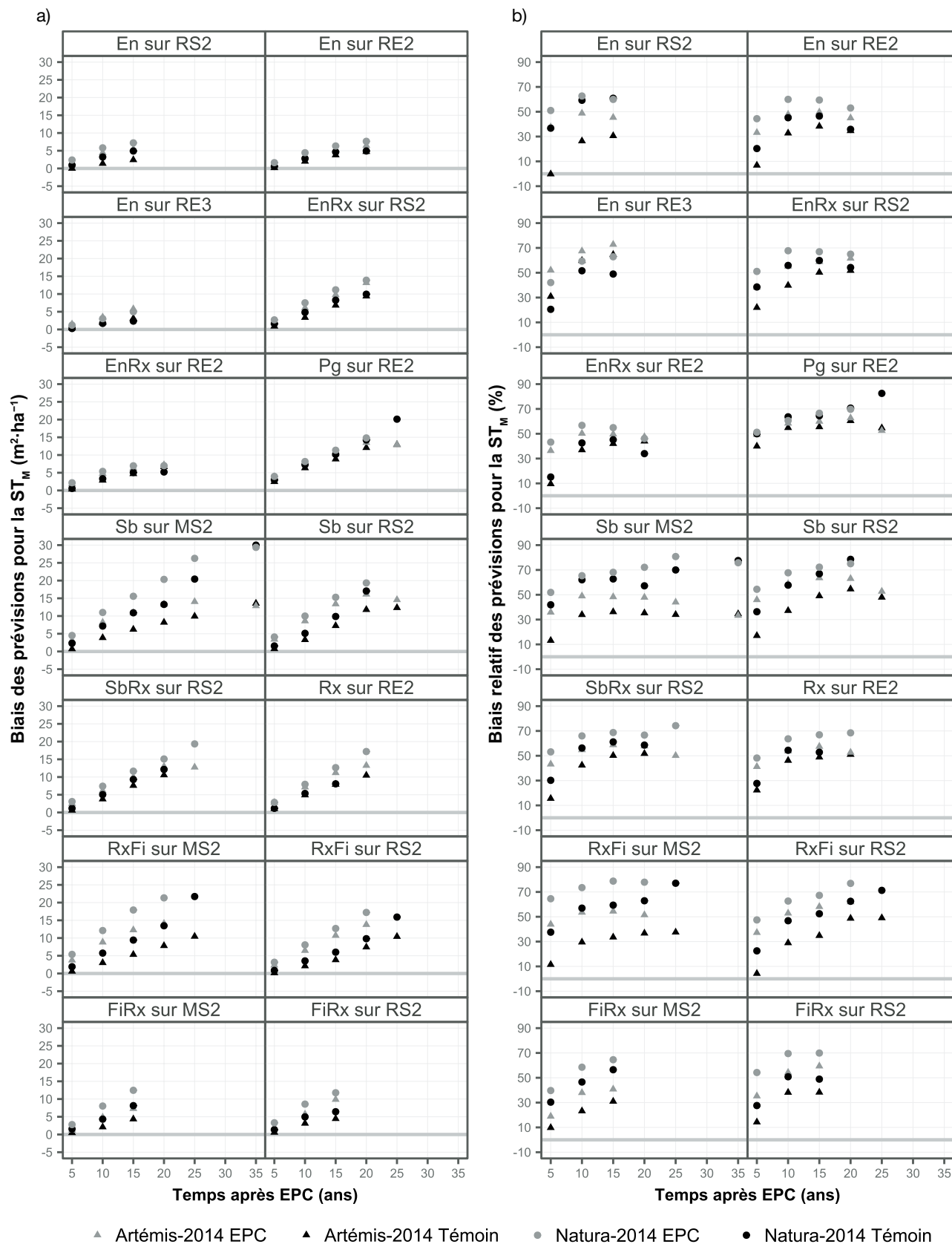
- [MRNF] Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, 2010. *Ressources et industries forestières – Portrait statistique, édition 2010*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Direction du développement de l'industrie des produits forestiers. Québec, QC. 498 p. [<https://mffp.gouv.qc.ca/wp-content/uploads/complete2010.pdf>]
- [MRNFP] Ministère des Ressources naturelles, de la Faune et des Parcs, 2003. *Manuel d'aménagement forestier, 4^e édition*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles, de la Faune et des Parcs, Direction des programmes forestiers. Québec, QC. 245 p. [<http://mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/amenagement/manuel.pdf>]
- Oliver, C.D. et B.C. Larson, 1996. *Forest stand dynamics (update edition)*. John Wiley and Sons Inc., New York, NY (États-Unis).
- 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://mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Auger-Isabelle/Memoire163.pdf>]
- Power, H., 2016. *Comparaison des biais et de la précision des estimations des modèles Artémis-2009 et Artémis-2014 pour la surface terrière totale des peuplements forestiers, avec et sans coupe partielle, sur une période de 40 ans*. Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de la recherche forestière. Note de recherche forestière n° 143. 21 p. [<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. 664 p.
- Rheault, H., 2013. « *Fascicule 1.4. Gestion de l'incertitude* ». Dans : Bureau du Forestier en chef (édit.). *Manuel de détermination des possibilités forestières 2013-2018*. Gouvernement du Québec. Roberval, QC. p. 23-27. [http://forestierenchef.gouv.qc.ca/wp-content/uploads/2013/01/023-27_MDPF_Incertitude.pdf]
- Saucier, J.P., P. Grondin, A. Robitaille et J.-F. Bergeron, 2003. *Zones de végétation et domaines bioclimatiques du Québec*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles, de la Faune et des Parcs, Direction des inventaires forestiers. Code de diffusion : 2003-3043. 2 p.
- SAS Institute Inc., 2015. *SAS/STAT® 14.1 User's guide*. SAS Institute Inc. Cary, NC (États-Unis).
- SAS Institute Inc., 2016. *SAS® 9.4 Language reference: concepts, sixth edition*. SAS Institute Inc. Cary, NC (États-Unis). 864 p.
- Tremblay, S., F. Guillemette et M. Barrette, 2013. « *Chapitre 14 — L'éclaircie précommerciale* ». Dans : Ministère des Ressources naturelles, *Le guide sylvicole du Québec, Tome 2 — Les concepts et l'application de la sylviculture*. Ouvrage collectif sous la supervision de C. Larouche, F. Guillemette, P. Raymond et J.-P. Saucier. Les Publications du Québec, p. 272-299.
- Tremblay, S., I. Auger, G. Prigent et J.-P. Saucier, 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. [<http://mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Tremblay-Stephane/Avis-technique-SSRF-09.pdf>]

Annexes

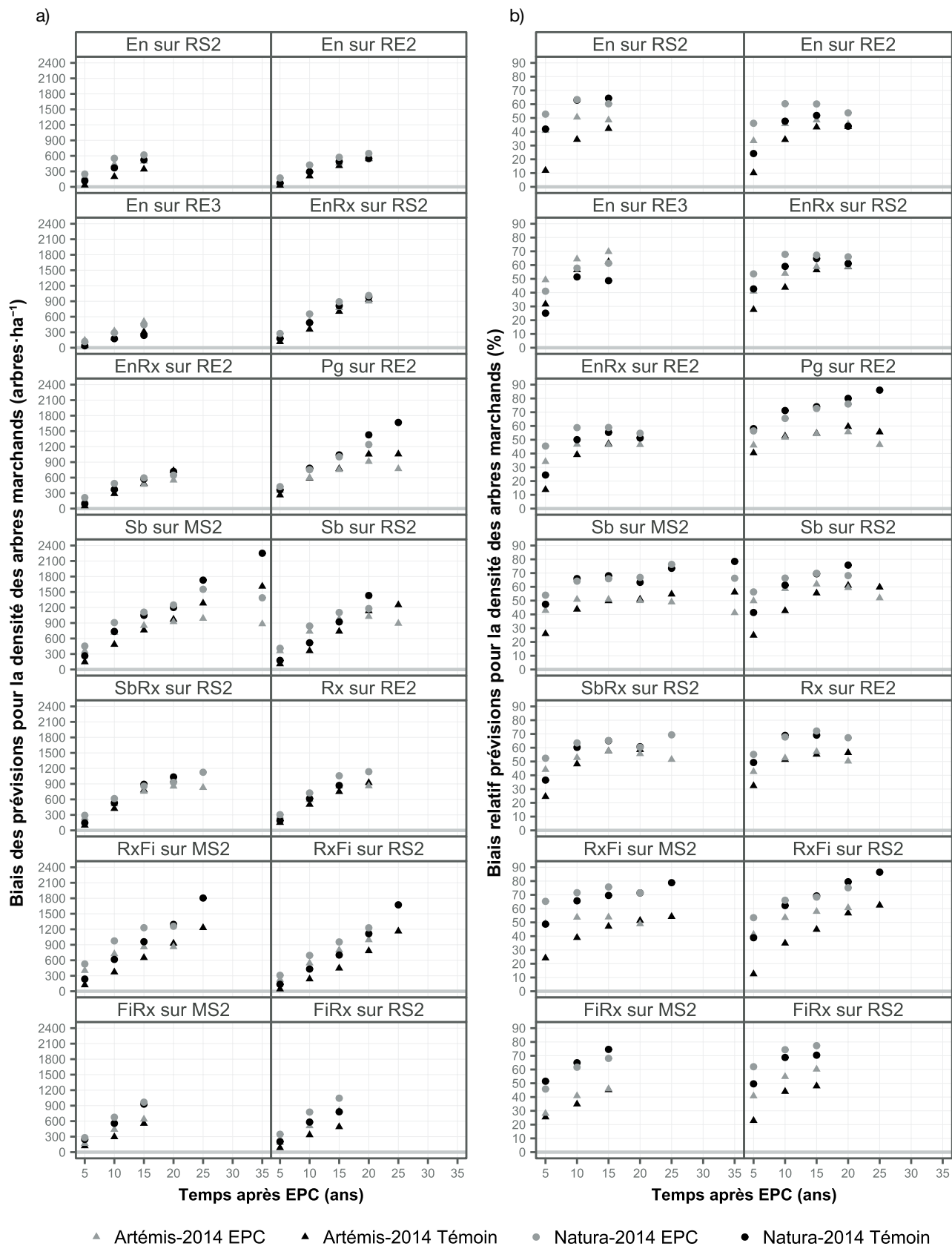
Annexe 1. Biais (a) et biais relatifs (b) des prévisions d'Artémis-2014 et de Natura-2014 pour l'accroissement annuel périodique (AAP) en volume marchand brut (VMB), toutes essences confondues, simulé à partir du premier mesurage, par traitement et par combinaison de type de forêt et de groupe de végétations potentielles (voir le tableau 2).



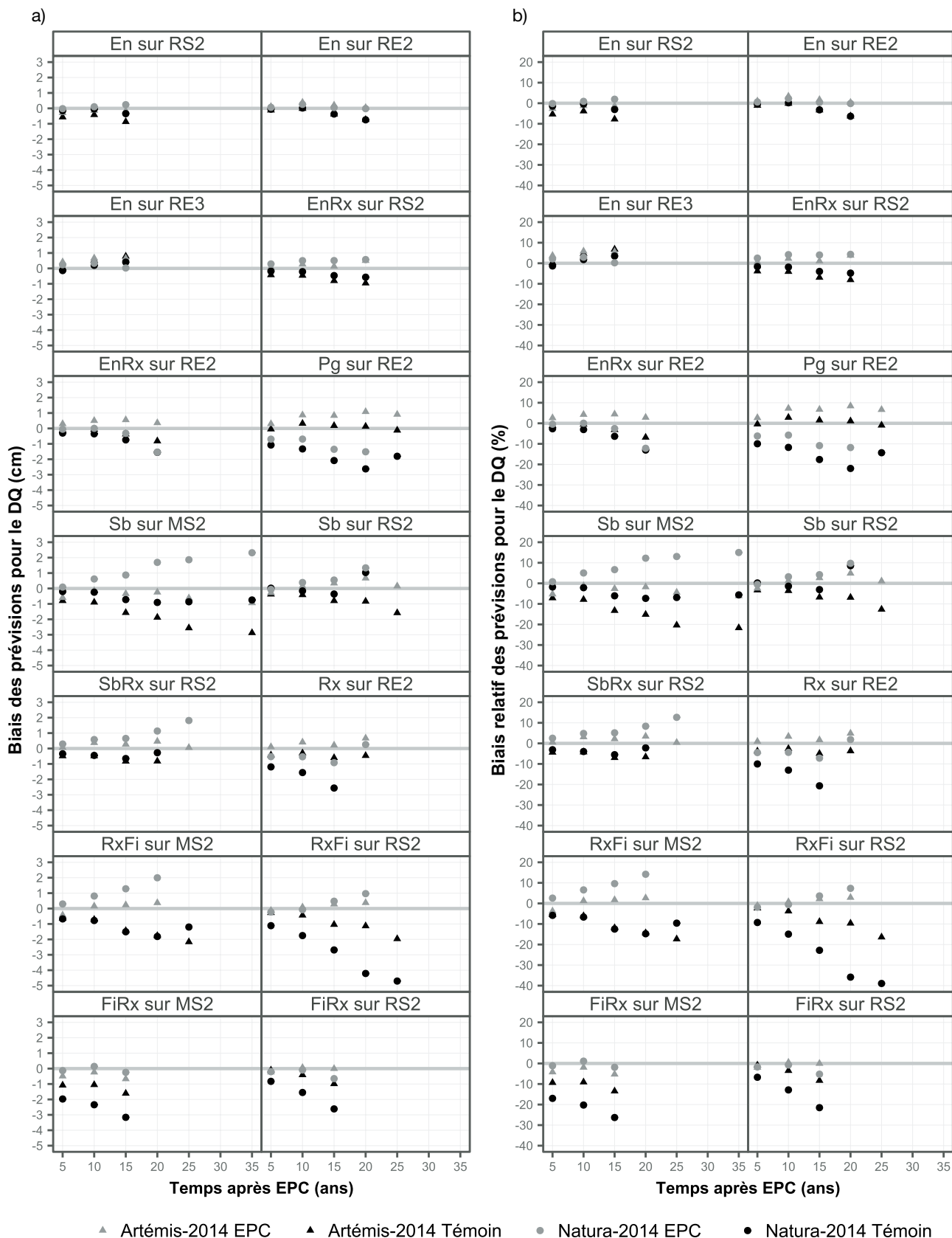
Annexe 2. Biais (a) et biais relatifs (b) des prévisions d'Artémis-2014 et de Natura-2014 pour la surface terrière marchande (ST_M), toutes essences confondues, simulée à partir du premier mesurage, par traitement et par combinaison de type de forêt et de groupe de végétations potentielles (voir le tableau 2).



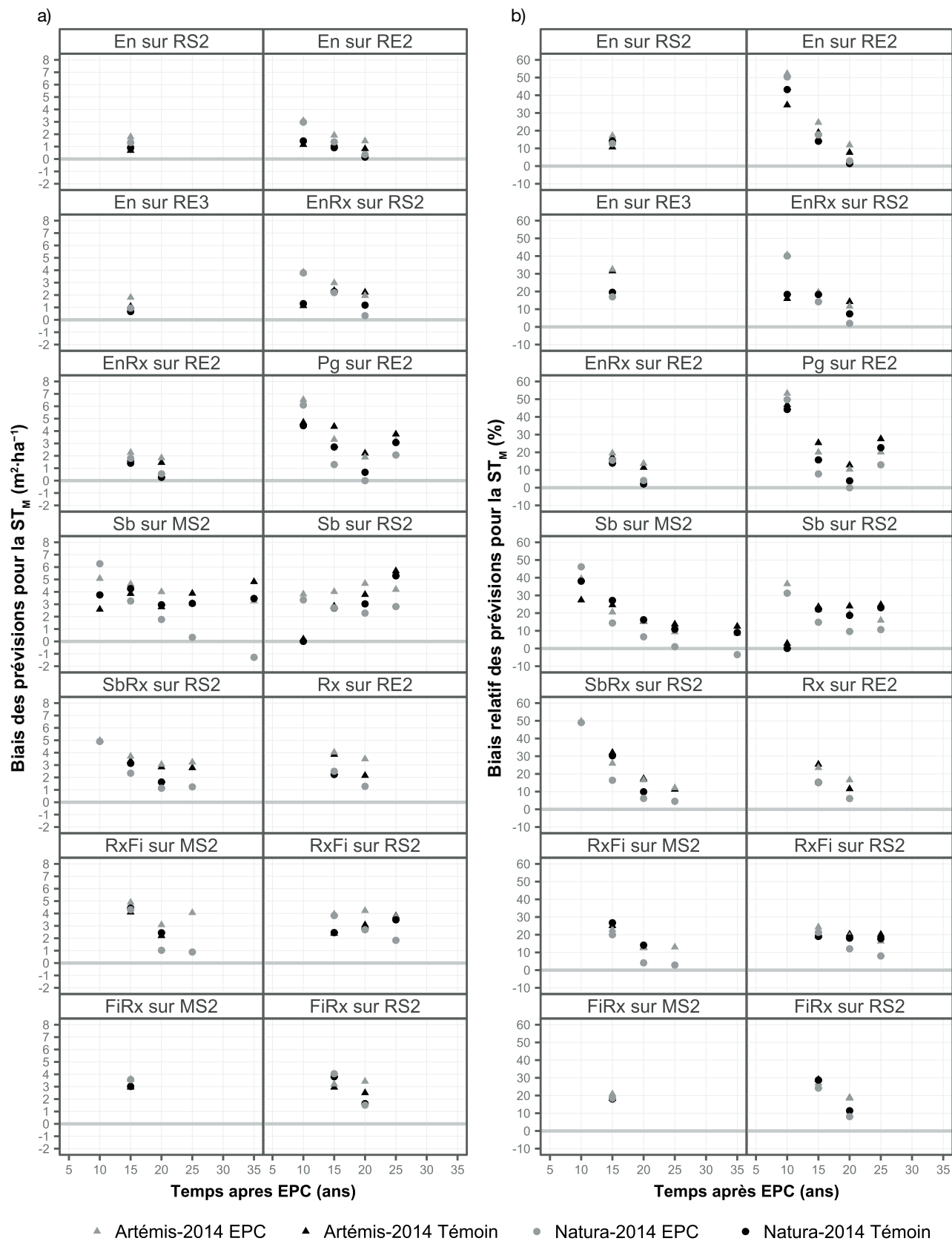
Annexe 3. Biais (a) et biais relatifs (b) des prévisions d'Artémis-2014 et de Natura-2014 pour la densité des arbres marchands, toutes essences confondues, simulée à partir du premier mesurage, par traitement et par combinaison de type de forêt et de groupe de végétations potentielles (voir le tableau 2).



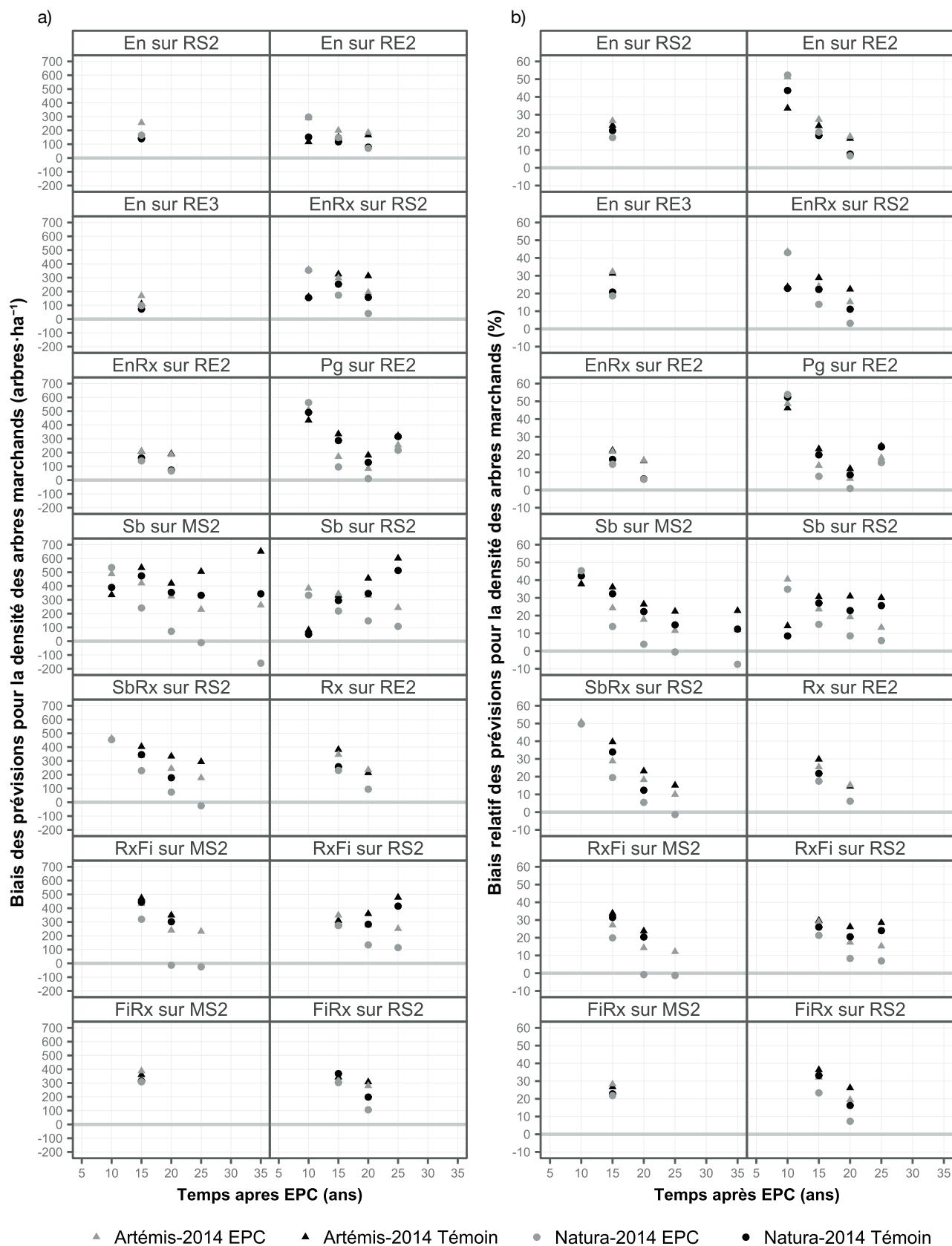
Annexe 4. Biais (a) et biais relatifs (b) des prévisions d'Artémis-2014 et de Natura-2014 pour le diamètre moyen quadratique (DQ) des arbres marchands, toutes essences confondues, simulé à partir du premier mesurage, par traitement et par combinaison de type de forêt et de groupe de végétations potentielles (voir le tableau 2).



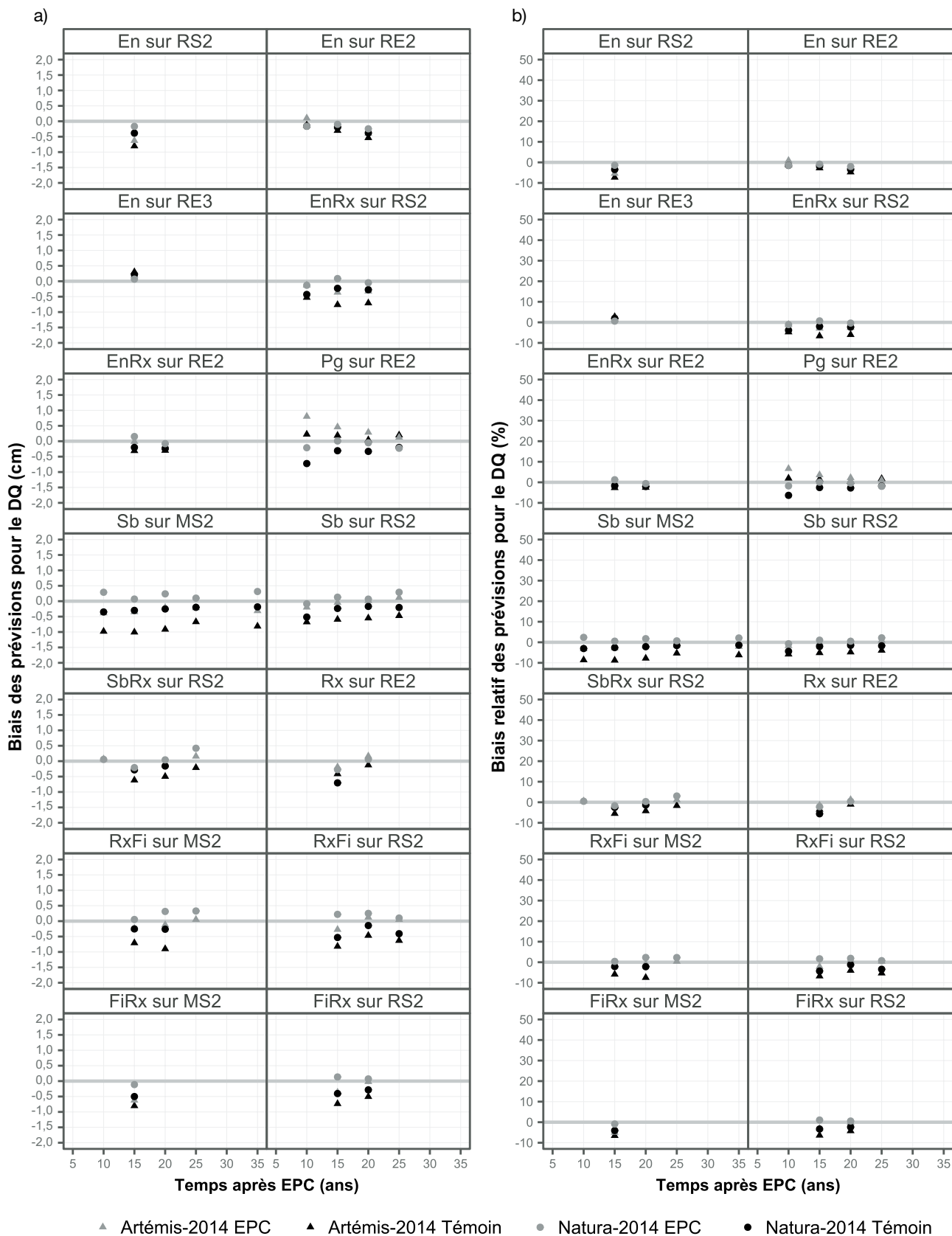
Annexe 5. Biais (a) et biais relatifs (b) des prévisions d'Artémis-2014 et de Natura-2014 pour la surface terrière marchande (ST_M), toutes essences confondues, simulée à partir de l'avant-dernier mesurage, par traitement et par combinaison de type de forêt et de groupe de végétations potentielles (voir le tableau 2).



Annexe 6. Biais (a) et biais relatifs (b) des prévisions d'Artémis-2014 et de Natura-2014 pour la densité des arbres marchands, toutes essences confondues, simulée à partir de l'avant-dernier mesurage, par traitement et par combinaison de type de forêt et de groupe de végétations potentielles (voir le tableau 2).



Annexe 7. Biais (a) et biais relatifs (b) des prévisions d'Artémis-2014 et de Natura-2014 pour le diamètre moyen quadratique (DQ) des arbres marchands, toutes essences confondues, simulé à partir de l'avant-dernier mesurage, par traitement et par combinaison de type de forêt et de groupe de végétations potentielles (voir le tableau 2).





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.

On peut citer ce texte en indiquant la référence.

Citation recommandée :

Tremblay, S., H. Power et I. Auger, 2019. *Effets réels de l'éclaircie précommerciale : évaluation des prévisions des modèles de croissance Natura-2014 et Artémis-2014 dans les peuplements de résineux propices à une éclaircie précommerciale*. Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de la recherche forestière. Note de recherche forestière n° 153. 32 p.

ISSN 0834-4833

ISBN : 978-2-550-83928-6

ISBN (pdf) : 978-2-550-83929-3

G.F.D.C. : 241--015.5 (714)

L.C. : SD 396.5

Dépôt légal 2019

Bibliothèque nationale du Québec

© 2019 Gouvernement du Québec

**Forêts, Faune
et Parcs**

Québec

