

Titre :	Solutions pour mieux simuler l'évolution des peuplements situés sur les végétations potentielles de l'érablière dans un contexte d'envahissement par le hêtre.
Auteur(s) :	Simon Bilodeau-Gauthier, ing.f., biol., Ph. D., Hugues Power, ing.f., Ph. D., François Guillemette, ing.f., M. Sc. et Steve Bédard, ing.f., M. Sc.
Date :	Juin 2021

La composition en essences des érablières québécoises est en voie de changer considérablement, car le recrutement en érable à sucre diminue alors que le recrutement en hêtre à grandes feuilles augmente. Les modèles Artémis et SaMARE, utilisés actuellement pour simuler la croissance des arbres marchands, captent peut-être mal ces changements. Après avoir comparé les données récoltées 20 ans après la coupe dans les dispositifs de suivi des effets réels de la coupe de jardinage avec celles des simulations de ces 2 modèles sur une même période, nous proposons des solutions à court terme pour pallier ces biais.

1. Contexte

Au cours des 30 à 40 dernières années, l'augmentation de l'abondance de la régénération du hêtre à grandes feuilles (*Fagus grandifolia*, HEG) au détriment de celle de l'érable à sucre (*Acer saccharum*, ERS) est devenue une menace pour le maintien de la composition des érablières. Un avis scientifique de la Direction de la recherche forestière (DRF) paru en 2017 faisait le constat, à partir des inventaires des placettes-échantillons temporaires et permanentes, que la proportion de surface terrière (ST) occupée par l'ERS avait diminué dans la majorité des sous-régions écologiques du Québec, tandis que celle du HEG avait augmenté dans la plupart d'entre elles (DRF 2017). Or, cette tendance pourrait être mal captée dans les modèles de croissance des arbres marchands (dont le diamètre à hauteur de poitrine [DHP, mesuré à 1,3 m du sol] est de plus de 9 cm), comme Artémis et SaMARE.

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

En effet, ces modèles ont été bâtis sur la base d'observations faites pour la plupart avant que l'envahissement par le HEG soit bien perceptible dans ces peuplements. Rappelons que ces modèles sont utilisés pour produire des analyses économiques, pour tester des stratégies sylvicoles et, dans le cas d'Artémis, pour développer les courbes de croissance aux fins du calcul des possibilités forestières. De plus, le Bureau du forestier en chef (BFEC) doit appliquer des hypothèses pour sélectionner des courbes de croissance après traitement selon le type de forêt (TYF). Il a donc besoin d'informations pour choisir les hypothèses les plus plausibles afin de bien capter les changements anticipés de la composition des peuplements.

Dans ce contexte, plusieurs directions du Ministère ont sollicité la DRF afin qu'elle propose des pistes de solutions pour ajuster les modèles de croissance de manière à tenir compte des phénomènes observés sur le terrain. Pour ce faire, nous avons utilisé les données prises 20 ans après traitement dans le réseau de suivi des effets réels des coupes de jardinage pratiquées de 1995 à 1999. Nous les avons comparées avec les résultats des simulations sur une même période par les modèles Artémis 2014 et SaMARE. De plus, nous avons examiné l'évolution des TYF pendant 20 ans après le traitement afin de déceler d'éventuels changements de composition. Nous proposons ensuite différentes solutions permettant d'améliorer l'adéquation entre les simulations et les observations.

2. Méthodologie

2.1. Réseau de suivi des effets réels

Le réseau de suivi des effets réels de la coupe de jardinage rassemble 233 peuplements dont l'étude a débuté de 1995 à 1999 (Guillemette *et al.* 2013). Chaque peuplement contient 1 ou 2 placettes témoins (TE) et 1 à 3 placettes traitées (TR) opérationnellement selon les modalités qui étaient pratiquées à l'époque dans les forêts publiques québécoises. Les placettes jardinées ainsi choisies satisfaisaient aux exigences du *Manuel d'aménagement forestier* (MRNFP 2003), c'est-à-dire un taux de prélèvement de 25 à 35 % de la ST, une ST résiduelle d'au moins 16 m²·ha⁻¹ et une augmentation de la proportion de la ST occupée par des arbres de qualité.

Chaque placette couvre une superficie de 400 m² (11,28 m de rayon) et contient une plus petite placette-échantillon destinée à l'inventaire des gaules (3,57 m de rayon, 40 m² de superficie). Des inventaires dendrométriques ont été menés avant la coupe, après la coupe ainsi qu'à 5, 10 et 20 ans après la coupe (plus exactement, de 18 à 21 ans après la coupe selon le peuplement, mais cette valeur a été ramenée à 20 ans aux fins des analyses). Pour ce qui est des arbres, les mesures incluaient l'état de la tige (morte, vivante, recrue), l'essence et le DHP. Dans le cas des gaules, les tiges vivantes étaient seulement dénombrées par essence et par classe de DHP (2, 4, 6 et 8 cm).

Afin d'évaluer le comportement des modèles de croissance et de dresser le portrait de l'évolution de la composition forestière dans les érablières jardinées, nous avons sélectionné un sous-ensemble des placettes de ce réseau de suivi des effets réels, soit les 159 peuplements traités par coupe de jardinage

(378 placettes-échantillons; tableau A1) situés sur la végétation potentielle de l'érablière à bouleau jaune (FE3). Ces peuplements se trouvent dans les régions écologiques 2a, 3a, 3b, 3c, 3d, 4b, 4c et 4f (figure 1). Aux fins des présentes analyses, nous avons regroupé les peuplements de certaines de ces régions écologiques pour tenir compte de leur répartition spatiale au sein des régions administratives, de manière à créer 6 groupes de régions écologiques : i) 2a et 3a de l'Outaouais (2a3a R07); ii) 3a du Témiscamingue (3a R08); iii) 3b; iv) 3c; v) 4b et 4c (4bc); et vi) 3d et 4f (3d4f).

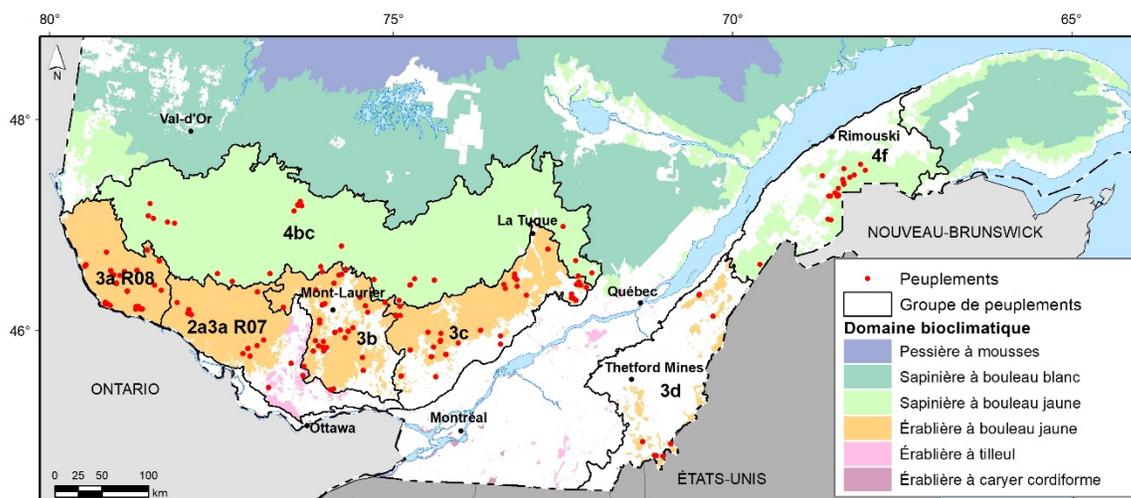


Figure 1. Carte de la répartition des peuplements à l'étude selon les groupes de régions écologiques. Les superficies colorées indiquent le territoire forestier du domaine de l'État selon les sous-domaines bioclimatiques (Saucier *et al.* 2009).

Pour chaque peuplement, nous avons compilé la ST des arbres vivants sur pied à 20 ans après traitement, par essence et pour les 3 catégories de tiges suivantes : les arbres marchands (DHP > 9,0 cm), les recrues (arbres qui ont atteint la taille marchande au cours de la période, mais qui ne l'étaient pas immédiatement après la coupe) et les gaules (soit les arbres avec un DHP compris entre 1,1 et 9,0 cm). Notons que les placettes-échantillons de trois des 159 peuplements ne contenaient pas de recrues vivantes à 20 ans, et que celles de 2 autres peuplements ne contenaient pas de gaules.

De plus, nous avons ciblé 6 essences ou groupes d'essences : le bouleau jaune (BOJ), l'érable rouge (ERR), l'ERS, le HEG, les autres feuillus (AUF), et enfin, les résineux (RES). Nous avons calculé la ST marchande totale, donc celle pour toutes les essences combinées, de même que la ST relative (proportion de la ST totale) occupée par chaque essence ou groupe d'essences.

Nous avons analysé les différences entre les catégories de tiges et entre les essences ou groupes d'essences par des modèles linéaires mixtes dont la variable réponse était soit la ST absolue, soit la ST relative. L'unité d'observation de base était le peuplement ($n = 159$). L'essence, la catégorie de tiges et l'interaction entre ces 2 facteurs ont été introduites comme effets fixes, puis le groupe de régions écologiques comme effet aléatoire. Les probabilités ont été résolues par la méthode du maximum de vraisemblance restreinte (*Restricted Maximum Likelihood*, ou REML). Les degrés de liberté ont été obtenus

par une approximation de Kenward-Roger, puis extraits par un test de Fisher de type III. Finalement, nous avons estimé le coefficient de détermination (R^2) conditionnel du modèle par la méthode de Nakagawa et Schielzeth. Ces analyses ont été effectuées à l'aide de la version 4.0.3 du logiciel R (R Core Team 2020) et des progiciels lme4, MuMIn et lmerTest (Barton 2009, Bates *et al.* 2015, Kuznetsova *et al.* 2016).

2.2. Simulations

Nous avons utilisé 2 modèles de croissance, Artémis et SaMARE, afin de simuler l'évolution de la composition forestière des érablières sur 20 ans après une coupe de jardinage. Artémis est un modèle stratégique dont les résultats entrent dans le calcul de la possibilité forestière, tandis que SaMARE est conçu pour évaluer les effets des traitements sylvicoles à l'échelle tactique. Pour répondre aux objectifs du présent avis technique, nous avons introduit dans ces modèles les données de la mesure effectuée après la coupe lors du suivi des effets réels, puis nous les avons fait évoluer sur une période de 40 ans.

Nous avons utilisé 4 versions différentes du modèle Artémis, et la dernière version disponible du modèle SaMARE :

- Artémis 2014 version 3.0.6
- Artémis 2014 version 4.1.0
- Artémis 2014 version 4.1.0 avec l'option « maladie corticale du hêtre » (MCH)
- Artémis 2014 version 4.1.0 avec l'option « tendances »
- SaMARE 2014

Le modèle Artémis 2014 v3.0.6 est la version diffusée depuis 2015. Il s'agit d'une nouvelle paramétrisation de la version originale, Artémis 2009 (Fortin et Langevin 2010), qui se base sur un jeu de données 27 % plus grand que celle-ci (Power 2016). La version 4.1.0 d'Artémis 2014 inclut, dans son jeu de données d'étalonnage, une mise à jour des paramètres de la version 3.0.6 pour les végétations potentielles FE2, FE3, MJ1 et MJ2 ainsi que les mesures du 4^e inventaire forestier décennal de la région de l'Outaouais. L'option « maladie corticale du hêtre » (MCH) d'Artémis 2014 v4.1.0 permet de modifier les paramètres du module de mortalité du hêtre par ceux présentés dans l'avis technique AT-SSRF-20 (Guillemette *et al.* 2020). Finalement, l'option « tendances » d'Artémis 2014 v4.1.0 produit un ajustement permettant de distinguer les intervalles de croissance qui se terminent avant et après 1998 (année ajustée afin de maximiser la vraisemblance du modèle). Les simulations ainsi faites sont plus susceptibles de représenter les tendances récentes en termes de croissance, de mortalité et de recrutement. De plus, avec l'option « tendances », les paramètres du module de recrutement ont été corrigés manuellement afin d'en produire une estimation non biaisée.

2.3. Biais des modèles

Afin d'évaluer la capacité des modèles à simuler adéquatement l'évolution de la composition forestière après traitement, nous avons calculé les biais en quantifiant la proportion de ST prédite par les simulations par rapport à celle observée dans les placettes. La procédure consistait à produire d'abord les biais par

groupe de régions écologiques (équation 1), ensuite à les compiler sous forme de biais moyens (équation 2), pour finalement générer des biais relatifs (équation 3).

$$\text{Biais par groupe de régions écologiques} = \text{ST observée} - \text{ST prédite} \quad [\text{éq. 1}]$$

$$\text{Biais moyen} = \frac{\sum \text{biais par groupe de régions écologiques}}{\text{nombre de peuplements}} \quad [\text{éq. 2}]$$

$$\text{Biais relatif} = \frac{\text{biais moyen}}{\text{ST moyenne observée}} \times 100 \quad [\text{éq. 3}]$$

Les biais moyens et relatifs ont été calculés à différentes échelles : (i) par essence et par groupe de régions écologiques, (ii) sur la somme des essences et par groupe de régions écologiques, (iii) par essence et à l'échelle de la province, puis (iv) sur la somme des essences et à l'échelle de la province. Ainsi, dans l'équation 3, la ST observée était celle correspondant à l'échelle appropriée.

2.4. Types de forêts

Afin de documenter les changements de composition, nous avons attribué à chaque peuplement un type de forêt (TYF) d'après le système de classification utilisé par le BFEC (tableau 1). Cet exercice a été effectué à la fois sur les données avant la coupe et celles de 20 ans après la coupe. L'objectif était ainsi de documenter quels TYF de retour après traitement sont observés dans le réseau de suivi des effets réels

Tableau 1. Composition en essences des principaux types de forêts (TYF) de feuillus présents dans le réseau de suivi des effets réels de la coupe de jardinage.

Abréviation	TYF Nom	Nombre de peuplements	Composition (proportion de la surface terrière des feuillus occupée par essence; %)		
			ERS	HEG	BOJ
Es	Érablières à sucre	68	≥ 75	—	—
EsBj	Érablières à bouleaux jaunes	15	≥ 50	< 15	≥ 25
EsFx	Érablières à feuillus	22	≥ 50	< 15	< 25
EsHg	Érablières à hêtres	16	≥ 50	≥ 15	< 25
EsFx_Fx	Érablières à feuillus sans dominance d'érable à sucre	19	< 50	< 15	< 25
EsHg_Fx	Érablières à hêtres sans dominance d'érable à sucre	19	< 50	≥ 15	< 25

Nous avons appliqué cette procédure aux arbres marchands, mais aussi aux recrues et aux gaules. Dans ces 2 derniers cas, le TYF considéré avant la coupe était celui des arbres marchands, tandis que le TYF à

20 ans était celui de l'une ou l'autre des 2 autres catégories de tiges. Ce choix nous a permis d'estimer si l'évolution après traitement du TYF différait entre les 3 catégories de tiges du peuplement, et d'obtenir un aperçu des changements potentiels à long terme de la composition forestière. De plus, nous avons posé l'hypothèse qu'un changement de composition observé dans les étages inférieurs du peuplement (les gaules ou les recrues) conduira éventuellement à un changement de composition comparable dans le couvert supérieur (les arbres marchands).

3. Résultats

3.1. Composition des catégories de tiges

Vingt ans après une coupe de jardinage, la composition en essences varie significativement entre les arbres marchands, les recrues et les gaules, particulièrement pour l'ERS et le HEG (modèle global : $R^2 = 0,68$ et $p < 0,0001$). On observe aussi des différences notables entre les régions (figure 2, tableau A1).

La ST relative en ERS dans les groupes de régions écologiques 3a R08, 2a3a R07, 3b et 3c est de 2 à 4 fois moins grande parmi les recrues (de 13 à 33 %) que pour les arbres marchands (de 55 à 62 %) (figure 2, tableau A1). À l'opposé, la proportion de HEG parmi les recrues (de 26 à 50 %) y est environ le double de celle parmi les arbres marchands (de 15 à 27 %). Dans les érablières des groupes 4bc et 3d4f, le HEG est assez marginal, et les recrues proviennent beaucoup plus des résineux, qui sont environ 4 fois plus abondants dans cette catégorie de tiges que parmi les arbres marchands. Dans le groupe 3d4f, la ST relative de l'ERS est plus faible parmi les recrues que parmi les arbres marchands (respectivement 63 et 39 %), alors que dans le groupe 4bc, ces valeurs sont similaires.

Pour ce qui est des gaules et des recrues, la composition de la ST suit à peu près les mêmes tendances que pour les recrues en ce qui concerne le BOJ, le HEG et les AUF (figure 2, tableau A1). Dans les régions 3a R08, 2a3a R07, 3b et 3c, alors que l'ERS était l'essence dominante parmi les arbres marchands, il est remplacé ou se trouve à égalité avec le HEG parmi les gaules et les recrues. Dans la région 4bc, celui-ci est beaucoup plus présent parmi les gaules que parmi les recrues (7 % contre 2 %). À l'inverse, les RES sont moins présents parmi les gaules (de 2 à 14 %, selon le groupe de régions écologiques) que parmi les recrues (de 6 à 30 %). Notons finalement que la proportion d'ERS est généralement semblable entre les gaules et les recrues, sauf dans le groupe 4bc, où elle est plus grande parmi les premières (55 % contre 39 %).

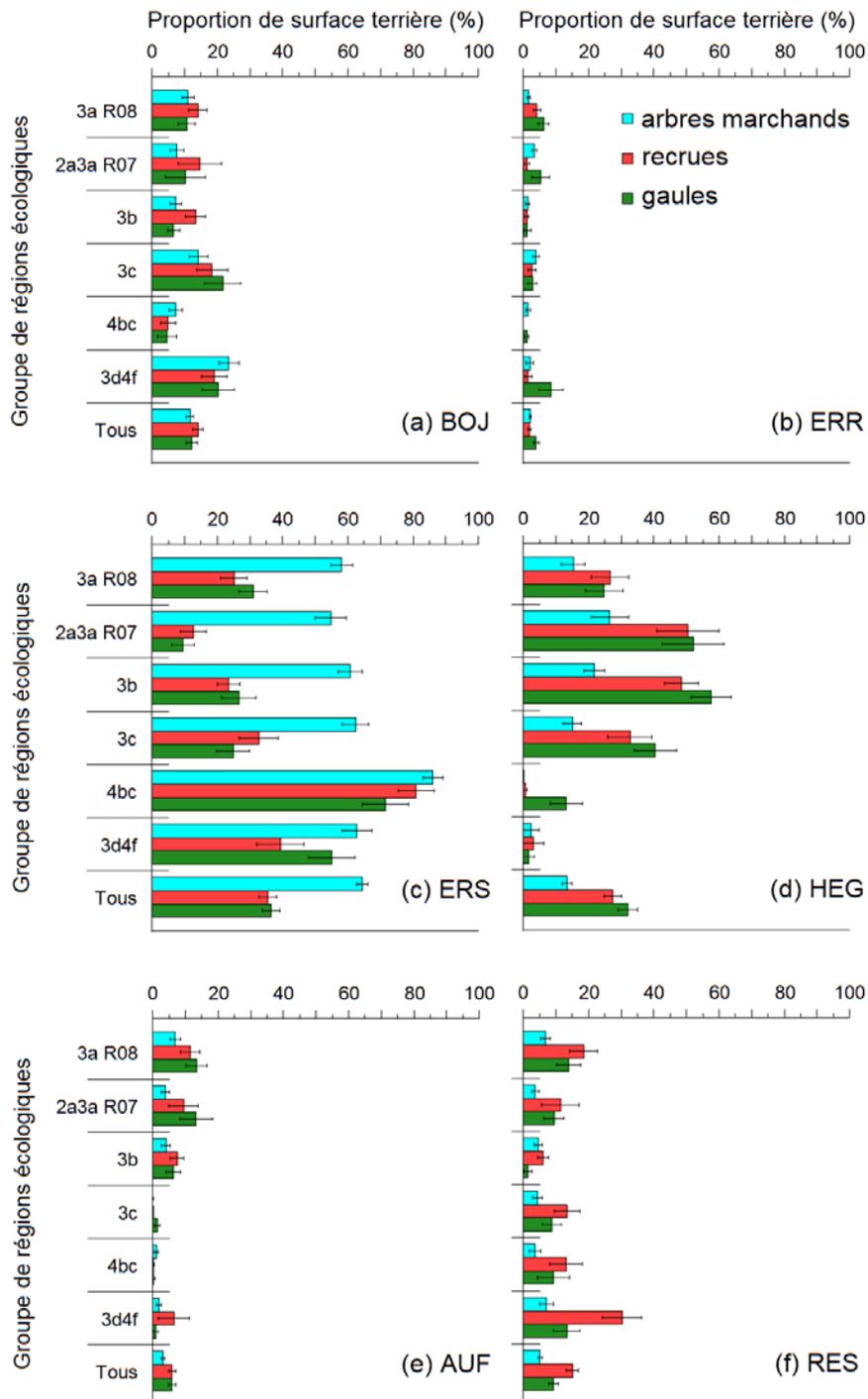


Figure 2. Proportion de surface terrière observée par essence ou groupe d'essences, par catégorie de tiges (arbres marchands, recrues, gaules) et par groupe de régions écologiques, 20 ans après coupe de jardinage. BOJ = bouleau jaune; ERR = érable rouge; ERS = érable à sucre; HEG = hêtre à grandes feuilles; AUF = autres feuillus; RES = résineux.

3.2. Répartition des recrues par classe de DHP

En examinant la répartition des recrues parmi les classes de DHP 20 ans après traitement, nous constatons qu'elles apparaissent principalement dans les classes de DHP de 10 à 16 cm, ou jusqu'à 18 cm pour l'ERR (figure 3). Les classes de DHP de 10 et 12 cm rassemblent de 80 à 100 % de la ST des recrues de chaque essence ou groupe d'essences, qui sont graduellement plus rares dans les classes de DHP plus grands. Toutefois, le HEG présente encore une forte proportion de recrues parmi les tiges de 14 cm (70 %). Finalement, l'ERS fait aussi figure d'exception, car une bonne proportion des tiges de 10 et 12 cm ne sont pas des recrues (15 et 50 %, respectivement) et étaient donc présentes avant la coupe de jardinage. Il y a également très peu (< 20 %) de recrues d'ERS dans les classes de DHP de 14 cm et plus.

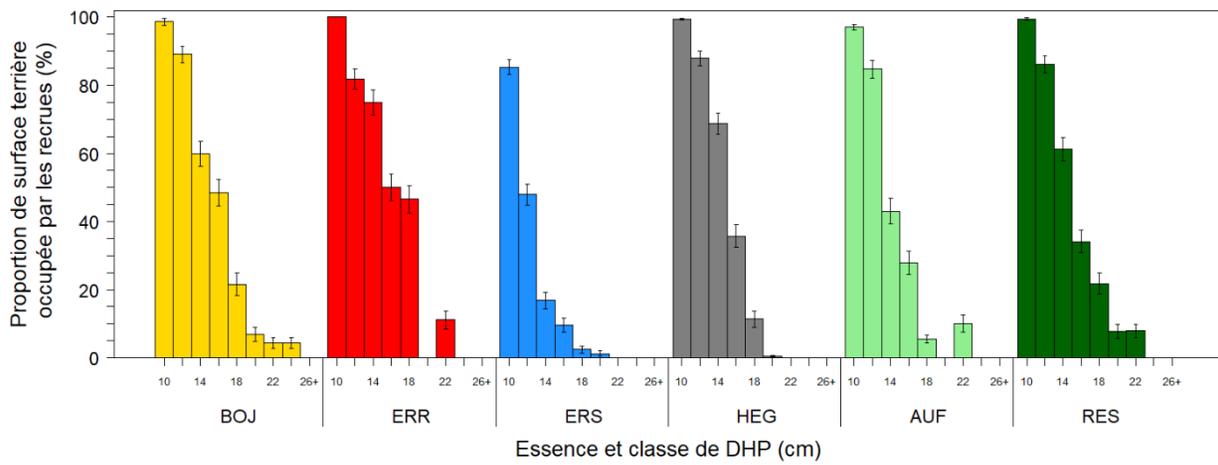


Figure 3. Proportion de la surface terrière observée des arbres marchands occupée par des recrues 20 ans après traitement, par essence (ou groupe d'essences) et par classe de DHP (moyennes \pm erreurs types; $n = 159$). BOJ = bouleau jaune; ERR = érable rouge; ERS = érable à sucre; HEG = hêtre à grandes feuilles; AUF = autres feuillus; RES = résineux.

3.3. Biais des modèles de croissance

3.3.1. Parmi les arbres marchands

Globalement, les modèles prédisent à 20 ans des valeurs de ST totale assez proches de celles observées (figures 4 et 5, tableau A2). Par exemple, la ST totale des peuplements présente, à l'échelle provinciale, des biais moyens de +0,8 à +1,7 $m^2 \cdot ha^{-1}$ et des biais relatifs de 3 à 7 %, selon les modèles (tableau A2). Notons qu'un biais positif correspond à une sous-estimation du modèle et un biais négatif, à une surestimation. Pour les 2 principales essences d'intérêt de cet exercice, l'ERS et le HEG, les biais moyens à l'échelle provinciale par modèle varient, respectivement, de -0,2 à +0,9 $m^2 \cdot ha^{-1}$ et de +0,3 à +1,1 $m^2 \cdot ha^{-1}$. On peut noter ici que les valeurs de biais moyens les plus élevées pour le HEG correspondent à la version d'Artémis 2014 incluant l'option « MCH », ce qui s'expliquerait par le fait que cette mortalité n'a pas encore eu lieu dans les peuplements observés; le biais relatif est d'ailleurs de 34 % à l'échelle de l'ensemble des régions écologiques. Quant à l'ERS, les biais moyens les plus élevés sont obtenus avec la version d'Artémis 2014 comprenant l'option « tendances ». Néanmoins, le biais relatif demeure faible (+5 %).

Les biais moyens par essence et par groupe de régions écologiques varient de $-1,9$ à $+2,8 \text{ m}^2\cdot\text{ha}^{-1}$ (moyenne générale de $+0,2 \text{ m}^2\cdot\text{ha}^{-1}$; écart-type de $0,7 \text{ m}^2\cdot\text{ha}^{-1}$). Les biais relatifs, quant à eux, sont beaucoup plus grands (de $-1\ 049\ %$ à $+45\ %$; moyenne générale de $-45\ %$; écart-type de $196\ %$). Cela est normal étant donné la manière dont ils sont calculés et parce que les valeurs absolues de ST observées sont assez faibles pour certaines essences.

Malgré une assez bonne performance des différents modèles étudiés, il y a des variations notables entre essences et entre groupes de régions écologiques. Notamment, le HEG est sous-estimé par tous les modèles dans la plupart des groupes, à l'exception du groupe 3d4f dans lequel tous les modèles le surestiment, et du groupe 4bc pour lequel les modèles diffèrent entre eux, mais où les biais sont plus faibles que dans les autres groupes. Pour l'ERS, ça dépend de la région : il est parfois sous-estimé (2a3a R07, 3b, 3d4f), parfois surestimé (3a R08, 3c). Dans le groupe 4bc, la direction de la prédiction varie selon le modèle, comme c'était le cas avec le HEG, mais souvent à l'inverse : les modèles qui surestiment l'ERS sous-estiment le HEG, et vice-versa.

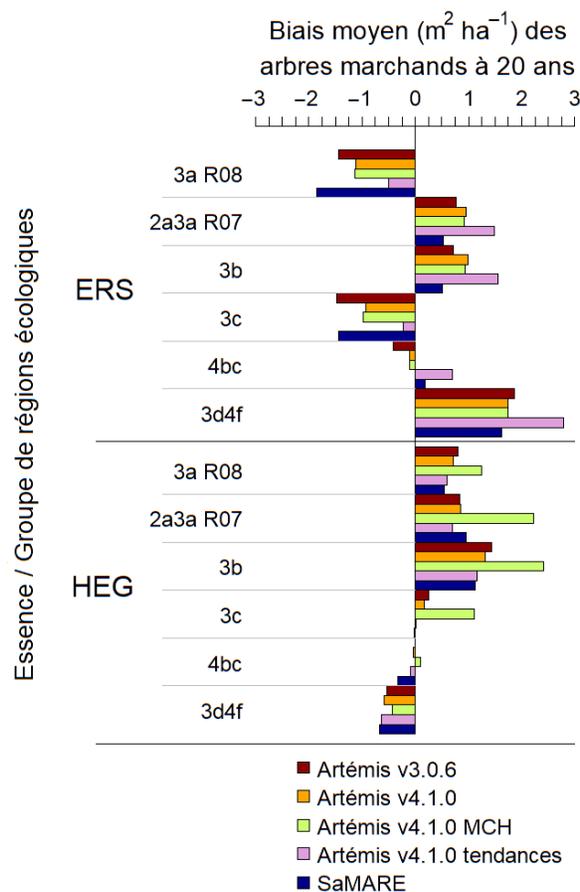


Figure 4. Biais moyens des 5 simulations de la surface terrière des arbres marchands sur 20 ans après traitement, pour l'érable à sucre (ERS) et le hêtre à grandes feuilles (HEG), par groupe de régions écologiques. Rappelons qu'un biais négatif indique une surestimation par le modèle, tandis qu'un biais positif indique une sous-estimation.

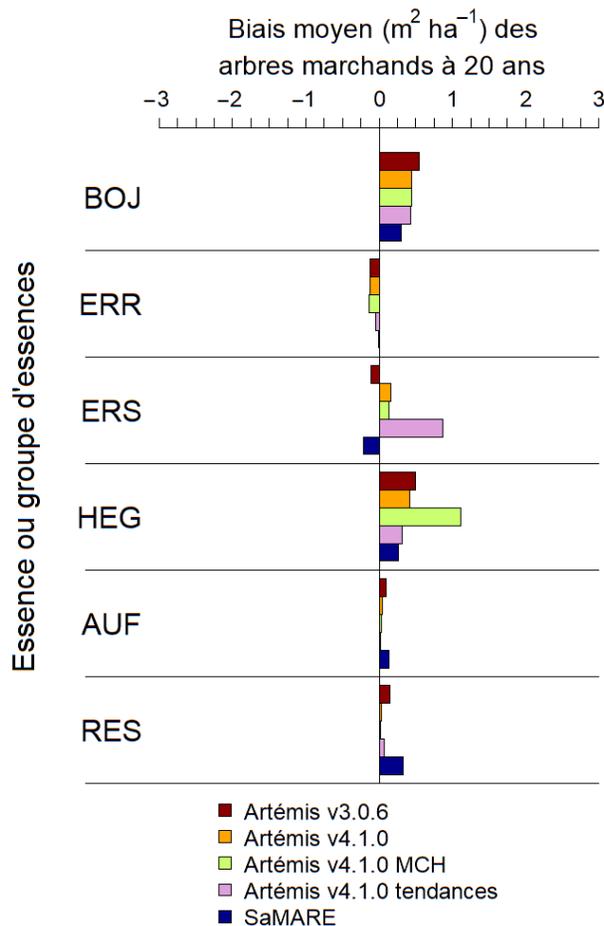


Figure 5. Biais moyens des 5 simulations à l'échelle de la province de la surface terrière des arbres marchands sur 20 ans après traitement, pour les 6 essences ou groupes d'essences. BOJ = bouleau jaune; ERR = érable rouge; ERS = érable à sucre; HEG = hêtre à grandes feuilles; AUF = autres feuillus; RES = résineux.

Pour ce qui est des différences plus fines entre les modèles, on peut relever, par exemple, que les biais obtenus avec la version 4.1.0 d'Artémis 2014 sont souvent plus faibles que ceux obtenus avec Artémis 2014 v3.0.6, notamment en ce qui a trait à l'ERS dans la région 3c (figure 4, tableau A2). Par contre, lorsque l'option « MCH » est ajoutée à la v4.1.0, le modèle sous-estime beaucoup le HEG en comparaison avec les placettes du réseau de suivi des effets réels, dans lesquelles cette maladie n'a pas encore causé beaucoup de dommages. SaMARE se comporte de manière assez semblable aux différentes versions d'Artémis, avec certaines variations spécifiques selon la combinaison d'essence et de groupe de régions écologiques.

3.3.2. Parmi les recrues

Les biais des simulations sur 20 ans des modèles étudiés montrent une surestimation du recrutement de l'ERS dans tous les groupes de peuplements (figures 6 et 7, tableau A3). Pour le HEG, les modèles surestiment légèrement le recrutement dans les groupes 4bc et 3d4f, et le sous-estiment dans les groupes 3a R08, 2a3a R07, 3b et 3c. À l'échelle provinciale, les valeurs des biais moyens par modèle se situent entre $-0,4$ et $+0,2$ $m^2 \cdot ha^{-1}$ pour l'ERS et entre $-0,1$ et $+0,2$ $m^2 \cdot ha^{-1}$ pour le HEG. Ces 2 essences

présentent d'ailleurs les plus importants biais moyens parmi les 6 essences ou groupes d'essences, mais d'autres, notamment ERR et RES, montrent parfois des biais relatifs plus élevés (tableau A3). Toutefois, la version 4.1.0 d'Artémis 2014 avec l'option « tendances » est celle qui montre les plus faibles biais pour le recrutement en ERS et en HEG. SaMARE présente des biais inférieurs à ceux des autres versions d'Artémis 2014, sauf pour ce qui du HEG dans les groupes de peuplements 4bc et 3d4f.

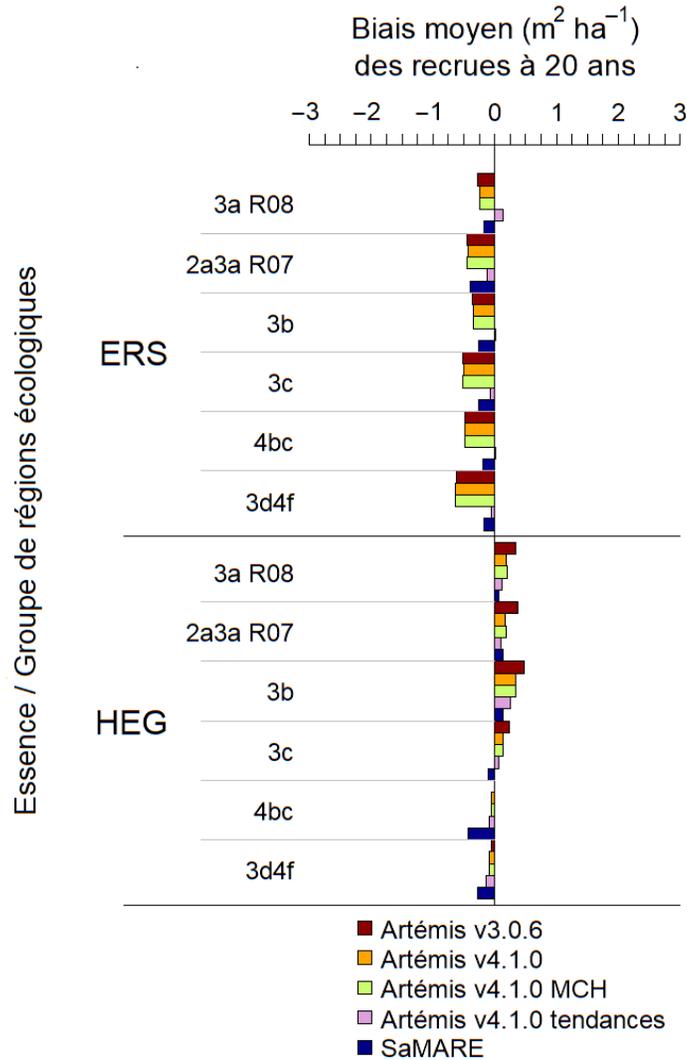


Figure 6. Biais moyens des 5 simulations de la surface terrière des recrues sur 20 ans après traitement, pour l'érable à sucre (ERS) et le hêtre à grandes feuilles (HEG), par groupe de régions écologiques.

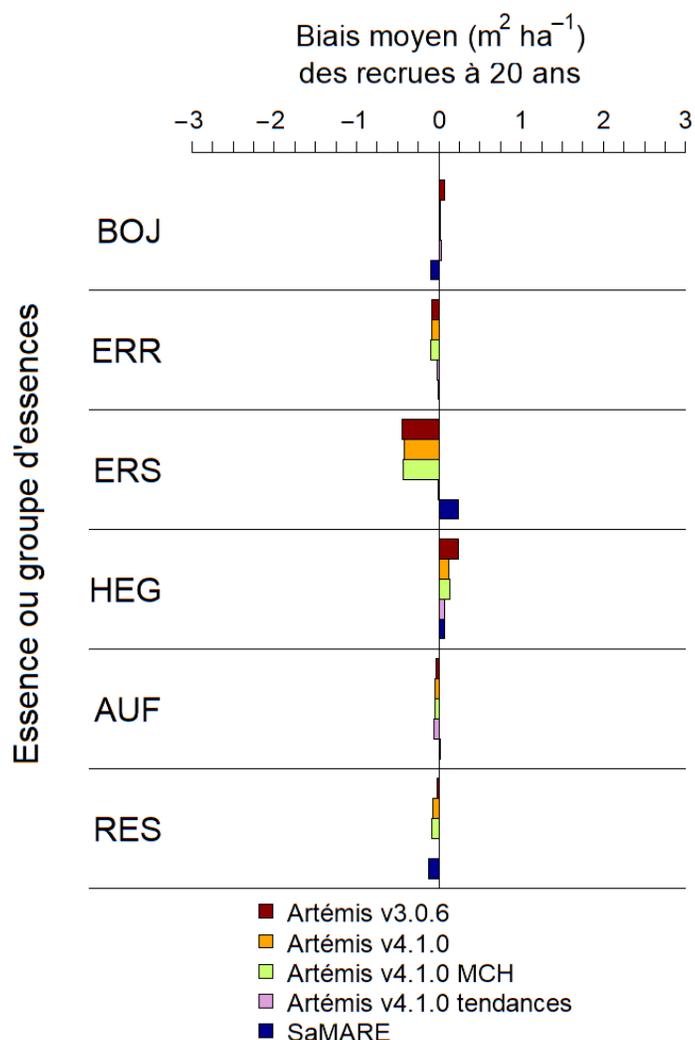


Figure 7. Biais moyens des 5 simulations à l'échelle de la province de la surface terrière des recrues sur 20 ans après traitement, pour les 6 essences ou groupes d'essences. BOJ = bouleau jaune; ERR = érable rouge; ERS = érable à sucre; HEG = hêtre à grandes feuilles; AUF = autres feuillus; RES = résineux.

3.4. Évolution du type de forêt

Les 2 principaux TYF associés au HEG, soit EsHg et EsHg_Fx, sont ceux dont l'occurrence augmente le plus en 20 ans après traitement dans ce réseau (tableau 2). En effet, pour les arbres marchands, le nombre de peuplements de type EsHg passe de 16 à 22, et celui des peuplements de type EsHg_Fx passe de 19 à 25. Parmi ces deux TYF, on observe une tendance à l'augmentation du HEG puisque 9 des 16 EsHg d'avant traitement reviennent en EsHg_Fx, ce qui équivaut à une proportion de 56 %. Parmi les peuplements qui étaient déjà EsHg_Fx avant traitement, près des trois quarts le sont demeurés (74 %, 14/19).

Tableau 2. Nombre de peuplements par type de forêt (TYF) pour chaque catégorie de tiges, 20 ans après la coupe de jardinage, selon le TYF des arbres marchands avant la coupe. Les cellules en jaune mettent en relief les TYF avec $\geq 15\%$ de HEG et celles en grisé, les comparaisons où le TYF de départ était le même que celui de retour. Les chiffres en rouge font ressortir certains cas pertinents pour le sujet du présent avis (Es, EsHg, et EsHg_Fx).

Catégorie de tiges	TYF de départ	Total par TYF de départ	TYF de retour					
			Es	EsBj	EsFx	EsHg	EsHg_Fx	Autres
Arbres marchands	Es	68	50	2	7	8	0	1
	EsBj	15	5	5	4	0	0	1
	EsFx	22	6	4	4	6	1	1
	EsHg	16	1	1	0	4	9	1
	EsHg_Fx	19	0	0	0	3	14	2
	Autres	19	1	5	0	1	1	11
	Total par TYF à 20 ans*	159	63	17	15	22	25	17
Recrues	Es	66	14	4	5	3	15	25
	EsBj	15	2	2	2	0	1	8
	EsFx	21	2	0	0	1	8	10
	EsHg	16	1	0	0	0	12	3
	EsHg_Fx	19	1	0	0	1	16	1
	Autres	19	4	2	0	0	2	11
Total par TYF à 20 ans*	156	24	8	7	5	54	58	
Gaules	Es	67	16	3	11	3	19	15
	EsBj	15	5	1	2	2	0	5
	EsFx	22	3	2	0	0	12	5
	EsHg	16	0	0	0	1	15	0
	EsHg_Fx	19	0	0	0	1	16	2
	Autres	18	4	0	1	1	2	10
Total par TYF à 20 ans*	157	28	6	14	8	64	37	

* Trois des 159 peuplements n'avaient pas de recrues vivantes à 20 ans, et 2 autres peuplements n'avaient pas de gaules, ce qui explique que les valeurs des totaux par TYF à 20 ans diffèrent entre les catégories de tiges.

Cette tendance d'évolution vers les EsHg_Fx est encore plus forte si on s'attarde aux recrues et aux gaules à 20 ans (tableau 2). Rappelons que pour cet aspect de l'analyse, nous avons utilisé les arbres marchands avant traitement comme TYF de départ, puis les recrues ou les gaules comme TYF de retour. Ainsi, de 19 peuplements dont le TYF était EsHg_Fx avant traitement, on atteint respectivement 54 et 64 peuplements de ce type à 20 ans selon que l'on classifie en fonction des recrues ou des gaules, respectivement. Cela s'explique parce que plusieurs peuplements dont le TYF avant traitement correspondait à Es, EsFx ou EsHg reviennent en EsHg_Fx si l'on classifie en fonction des recrues ou des gaules. De surcroît, la dynamique de transformation des EsHg en EsHg_Fx s'accroît lorsque la classification du TYF de retour est effectuée avec les recrues ou les gaules, par rapport au résultat avec les arbres marchands. En effet, la proportion des peuplements de type EsHg qui reviennent vers le type EsHg_Fx s'élève à 70 % (12/16) si l'on utilise les recrues pour déterminer le TYF de retour, et à 94 % (15/16) si l'on utilise les gaules.

Dans le cas du type Es, c.-à-d. le TYF correspondant à une forte dominance d'ERS (> 75 % de la ST des feuillus), on observe une baisse généralisée de fréquence sur 20 ans après traitement (tableau 2). Ainsi, si l'on prend les arbres marchands pour définir le TYF de retour, seulement 74 % (50 sur 68) des peuplements qui se classaient Es avant traitement correspondaient au même TYF, 20 ans plus tard. Cette baisse est beaucoup plus marquée lorsque le TYF de retour est déterminé en fonction des recrues ou des gaules, tout comme l'était l'augmentation des TYF avec HEG, ci-dessus. En effet, seulement 21 % (14/66) des peuplements qui étaient des Es avant traitement avaient une composition des recrues de ce même TYF après 20 ans. Notons finalement que certains peuplements qui étaient de type Es avant traitement montrent un TYF « autre » à 20 ans sur la base des recrues (25 sur 66; tableau 2). Ces « autres » TYF de retour pour les peuplements qui étaient des Es au départ sont de compositions variées, principalement des peuplements feuillus à dominance de BOJ ou des peuplements mixtes.

Les données confirment que la grande majorité des EsHg_Fx restent bel et bien de ce type. Par contre, plus de la moitié des EsHg évoluent vers des EsHg_Fx si l'on se base sur les arbres marchands, et c'est le cas de la quasi-totalité lorsque la classification est basée sur les recrues ou les gaules. Autre fait notable : une bonne part des Es (environ 10 à 33 %, selon le groupe de tiges considéré) revient en EsHg ou EsHg_Fx après 20 ans. Cela dénote une régression de la présence de l'ERS et une augmentation de celle du HEG.

Notons que ces tendances ne sont pas uniques aux peuplements traités du réseau de suivi des effets réels, puisqu'elles s'observent également dans les peuplements témoins du même réseau ainsi que dans le réseau des placettes-échantillons permanentes de la Direction des inventaires forestiers du Ministère (données non présentées).

3.5. Changement de composition parmi les arbres marchands sur 40 ans dans les modèles de simulations

Nous avons aussi simulé la ST des arbres marchands et des recrues sur une période de 40 ans, donc au-delà de la période couverte par les données du réseau de suivi des effets réels. Pour cette analyse, nous n'avons donc pas calculé de biais et ne présentons que les valeurs de ST.

Dans le cas des arbres marchands, tous les modèles testés tendent à produire des valeurs de ST très similaires (figure 8). Deux d'entre eux se distinguent toutefois pour l'ERS et le HEG. Dans le cas de l'ERS, Artémis 2014 v4.1.0 avec l'option « tendances » présente des valeurs légèrement inférieures à celles des autres modèles, tandis que pour le HEG, les valeurs produites par la version d'Artémis 2014 v4.1.0 avec l'option « MCH » sont inférieures à celles produites par les autres modèles.

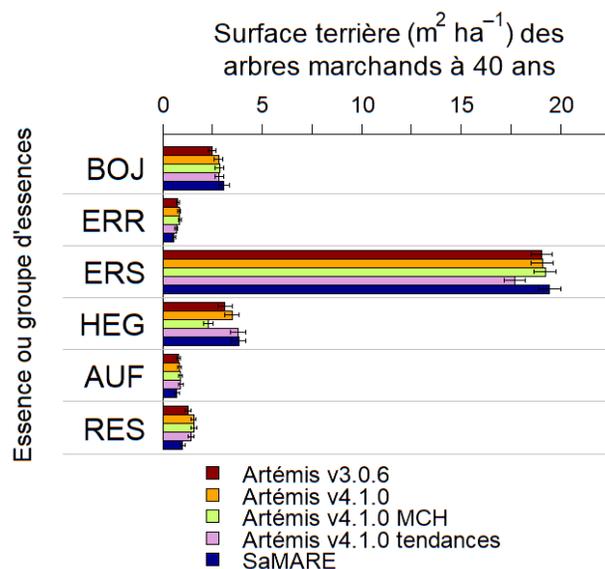


Figure 8. Surface terrière simulée à 40 ans après traitement parmi les arbres marchands (tiges de DHP > 9 cm) avec 4 versions d'Artémis 2014 et avec SaMARE 2014, par essence ou groupe d'essences (moyennes provinciales des 159 grappes ± erreurs types). BOJ = bouleau jaune; ERR = érable rouge; ERS = érable à sucre; HEG = hêtre à grandes feuilles; AUF = autres feuillus; RES = résineux.

Pour ce qui est des recrues (figure 9), il est d'abord notable qu'Artémis 2014 avec l'option « tendances » montre les valeurs de ST les plus faibles pour le recrutement en ERS. Cela est satisfaisant, puisque cette option a été justement conçue pour corriger le biais associé au recrutement de cette essence. Ensuite, pour ce qui est du HEG, la version 3.0.6 d'Artémis 2014 donne les valeurs les plus faibles, tandis que la v4.1.0 d'Artémis 2014 avec l'option « tendances » et le modèle SaMARE présentent les valeurs les plus élevées.

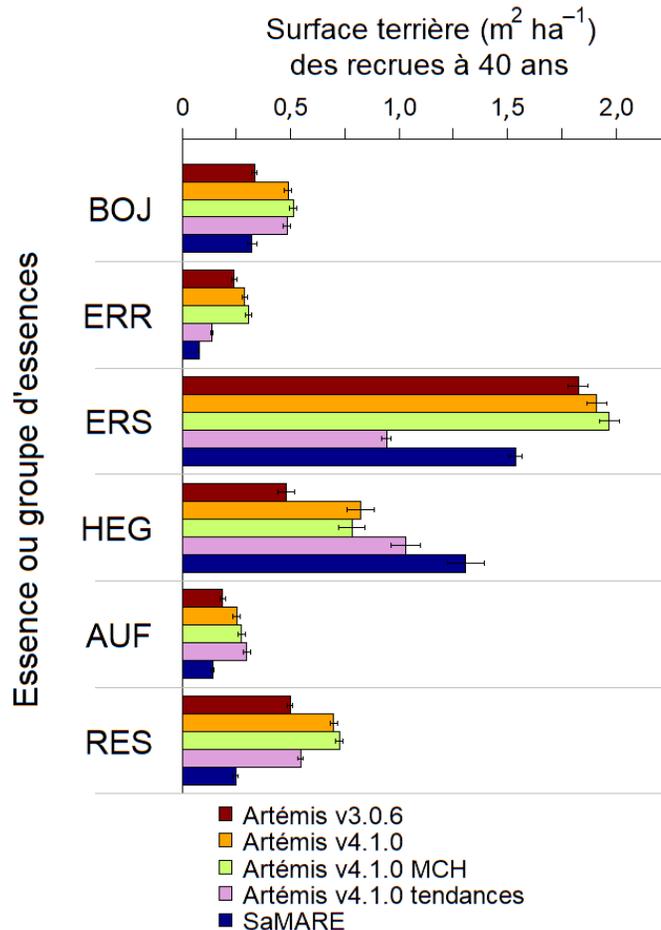


Figure 9. Surface terrière des recrues simulée à 40 ans après traitement avec 4 versions d'Artémis 2014 et avec SaMARE 2014, par essence ou groupe d'essences (moyennes provinciales des 159 grappes ± erreurs types). BOJ = bouleau jaune; ERR = érable rouge; ERS = érable à sucre; HEG = hêtre à grandes feuilles; AUF = autres feuillus; RES = résineux.

4. Conclusions sommaires

4.1. *Évolution temporelle de la composition en essences dans les placettes du réseau de suivi des effets réels*

Les tendances de diminution de la présence de l'ERS et d'augmentation de celle du HEG qui sont de plus en plus observées au Québec apparaissent clairement dans les données observées 20 ans après traitement dans le réseau de suivi des effets réels de la coupe de jardinage. De plus, la comparaison de l'évolution des 3 catégories de tiges (arbres marchands, recrues, et gaules) porte à croire que ces tendances iront en s'accroissant.

4.2. *Recrues par essence et par classe de DHP*

Vingt ans après la coupe de jardinage, les recrues sont présentes surtout parmi les classes de petits DHP (16 cm et moins). De plus, pour la plupart des essences, les plus petits arbres (DHP de 10 et 12 cm) sont presque tous des recrues. L'ERS fait toutefois exception : pour cette essence, les classes de petits DHP contiennent un fort pourcentage d'arbres qui ne sont pas des recrues, mais plutôt des petits arbres qui étaient déjà présents dans ces mêmes classes de DHP avant le traitement et qui n'ont pas crû davantage au cours de la période de 20 ans.

4.3. *Biais des modèles*

Dans l'ensemble, les modèles que nous avons testés simulent la ST de manière satisfaisante, mais moins précisément dans certains groupes de régions écologiques. Les résultats des modèles sont relativement semblables. Il est néanmoins notable que la plus récente version d'Artémis 2014 (v.4.1.0) performe généralement mieux que la précédente (v.3.0.6). La version d'Artémis 2014 v.4.1.0 avec l'option « MCH » se comporte différemment des autres versions en ce qui a trait au HEG. En particulier, pour les simulations à plus long terme (40 ans), elle semble atteindre son but, soit de simuler une mortalité accrue des HEG (et ce, même si une telle mortalité due à la MCH ne ressort pas encore dans les données observées jusqu'en 2018). La version d'Artémis 2014 v.4.1.0 avec l'option « tendances », quant à elle, produit les valeurs de recrutement en ERS qui sont les plus proches des valeurs observées, tandis que toutes les autres versions surestiment le recrutement en ERS. SaMARE offre généralement de bonnes performances, souvent meilleures qu'Artémis 2014 v.3.0.6, mais pas aussi bonnes qu'Artémis 2014 v.4.1.0 avec l'option « tendances » pour le recrutement.

4.4. *TYF de retour après traitement dans les placettes du réseau de suivi des effets réels*

Les TYF de retour montrent eux aussi une tendance à l'inversion de la dominance entre l'ERS et le HEG. Selon les simulations, de nombreux peuplements qui étaient de type Es ou EsHg avant la coupe deviendraient respectivement des EsHg ou des EsHg_Fx 20 ans plus tard. Les recrues et les gaules laissent présager une forte diminution de la présence de l'ERS et une forte augmentation de celle du HEG dans les peuplements qui sont présentement classés comme des érablières.

5. Recommandations

Rappelons d'abord que le présent avis technique a été rédigé dans le but de contribuer à améliorer l'évolution des prévisions de la composition des peuplements par les modèles de croissance Artémis 2014 et SaMARE, dans le contexte où l'abondance du HEG augmente dans les érablières. Soulignons ensuite que cet avis s'est concentré sur les peuplements correspondant à la végétation potentielle de l'érablière à bouleau jaune (FE3), et donc que les recommandations qui suivent s'appliquent principalement aux peuplements FE3. Cela dit, considérant les multiples observations faites au cours des dernières décennies au sujet de la dynamique du HEG dans le nord-est de l'Amérique du Nord (Bose *et al.* 2017, DRF 2017), il serait raisonnable de supposer que des peuplements contenant du HEG, mais situés sur d'autres végétations potentielles de l'érablière, pourraient se comporter de la même manière que ceux visés par le présent avis technique.

En bref, les résultats démontrent que les modèles de croissance étudiés performant assez bien, mais qu'en général, ils sous-estiment le recrutement en HEG et surestiment celui en ERS.

Un de nos objectifs était de trouver des solutions pouvant être utilisées immédiatement pour pallier le manque de sensibilité des modèles de croissance à ces changements de composition. En ce sens, nos recommandations se situent à 2 niveaux :

- A. Pour le **calcul des possibilités forestières**, nous recommandons de poursuivre l'utilisation de la plus récente version d'Artémis 2014 (v4.1.0) pour créer les courbes de croissance, puis de poser les hypothèses suivantes après la réalisation d'une coupe partielle :
 - a. Changer les EsHg en EsHg_Fx.
 - b. Changer une portion des Es en EsHg ou EsHg_Fx.
 - c. Maintenir les EsHg_Fx telles quelles.

- B. Pour des **simulations de croissance** effectuées de manière directe avec ces modèles, ou de manière indirecte avec l'outil MÉRIS, nous recommandons différents choix de modèles selon l'objectif poursuivi :
 - a. Pour des simulations visant à prédire les rendements à l'échelle du peuplement, utiliser Artémis 2014 v4.1.0, qui est la plus robuste des versions d'Artémis.
 - b. Lorsque l'évolution de la composition est d'intérêt, utiliser l'option « tendances » d'Artémis 2014 v4.1.0, qui simule mieux le recrutement en ERS que les autres versions.
 - c. Lorsque la simulation s'attarde à l'évolution des propriétés des tiges telles que la priorité de récolte, la qualité ou la vigueur, utiliser SaMARE. Notons que si, à des fins exploratoires, on souhaitait ajuster les taux de recrutement obtenus avec ce modèle, il serait possible de comparer les pourcentages de recrues provenant des modèles avec les valeurs observées,

par classe de DHP pour chaque essence, puis d'ajuster en conséquence. Par exemple, on pourrait remplacer l'essence de la moitié des plus petits ERS par du HEG dans les résultats de simulations obtenus après 20 à 40 ans. Il faudrait le faire pour les classes de DHP de 10 à 12 cm pour modéliser la croissance sur 20 ans, puis appliquer le même principe (peut-être aussi sur les tiges des diamètres suivants) pour une période de croissance plus longue.

6. Références bibliographiques

Barton, K., 2009. *MuMIn: Multi-model inference. R Package, version 1.43.17.*

<https://cran.r-project.org/package=MuMIn>

Bates, D., M. Maechler, B. Bolker et S. Walker, 2015. *Fitting linear mixed-effects models using lme4.* J. Stat. Soft. 67(1): 1-48. <https://doi.org/10.18637/jss.v067.i01>

Bose, A.K., A. Weiskittel et R.G. Wagner, 2017. *Occurrence, pattern of change, and factors associated with American beech-dominance in stands of the northeastern USA forest.* For. Ecol. Manage. 392: 202-212. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.03.003>

[DRF] Direction de la recherche forestière, 2017. *Expansion du hêtre à grandes feuilles et déclin de l'érable à sucre au Québec : portrait de la situation, défis et pistes de solution.* Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de la recherche forestière. Avis scientifique. 146 p.

<https://mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/AvisScientHEG-ERS.pdf>

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>

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

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

Guillemette, F., H. Power et S. Bédard, 2020. *Effets appréhendés de la maladie corticale du hêtre à l'échelle du calcul des possibilités forestières 2023-2028.* Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de la recherche forestière. Avis technique SSRF-20. 16 p.

https://mffp.gouv.qc.ca/documents/forets/recherche/AT_SSRF-20.pdf

Kuznetsova, A., P.B. Brockhoff et R.H.B. Christensen, 2016. *lmerTest: Tests in linear mixed effects models*. R Package, version 2.0-33.

<https://cran.r-project.org/web/packages/lmerTest/>

Majcen, Z., Y. Richard, M. Ménard et Y. Grenier, 1990. *Choix des tiges à marquer pour le jardinage d'érablières inéquiennes. Guide technique*. Gouvernement du Québec, ministère de l'Énergie et des Ressources (Forêts), Direction de la recherche et du développement. Mémoire de recherche forestière n° 96. 96 p.

<https://mffp.gouv.qc.ca/documents/forets/connaissances/recherche/Memoire96.pdf>

[MFFP] Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, 2020. *Classification des tiges d'essences feuillues, 3^e édition*. Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Secteur des forêts, Direction des inventaires forestiers. Normes techniques. 92 p.

<https://mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/classif-tiges-essence-feuillues-6.pdf>

[MRNFP] Ministère des Ressources naturelles, de la Faune et des Parcs, 2003. *Manuel d'aménagement forestier*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles, de la Faune et des Parcs, Direction de la planification et des communications. 245 p.

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.

<https://mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Power-Hugues/Note143.pdf>

R Core Team, 2020. *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing. Vienne (Autriche). <https://www.R-project.org>

Saucier, J.-P., A. Robitaille et P. Grondin, 2009. « *Cadre bioclimatique du Québec* » dans « *Écologie forestière* ». Manuel de Foresterie, 2^e édition. Ordre des ingénieurs forestiers du Québec. Éditions MultiMondes. Québec, QC. p. 186-205.

Simon Bilodeau-Gauthier, ing.f, biol., Ph. D.

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

François Guillemette, ing.f., M. Sc.

Steve Bédard, ing.f., M. Sc.

Service de la sylviculture et du rendement des forêts

7. Annexes

Tableau A1. Surfaces terrières (ST) relatives et absolues observées à 20 ans dans le réseau de suivi des effets réels de la coupe de jardinage, par groupe de régions écologiques, par essence et par catégorie de tiges.

Groupe de régions écologiques	Nombre de peuplements (nombre de placettes)	Essence	Catégorie de tiges					
			Arbres marchands		Recrues		Gaules	
			ST absolue (m ² ·ha ⁻¹)	ST relative (%)	ST absolue (m ² ·ha ⁻¹)	ST relative (%)	ST absolue (m ² ·ha ⁻¹)	ST relative (%)
3a R08	34 (95)	BOJ	2,8	11	0,3	14	0,4	11
		ERR	0,4	2	0,1	4	0,2	6
		ERS	12,8	58	0,5	25	1,0	31
		HEG	3,4	15	0,2	11	0,8	25
		AUF	1,6	7	0,6	27	0,6	13
		RES	1,7	7	0,5	19	0,4	14
		Total	22,7	100	2,1	100	3,4	100
2a3a R07	16 (42)	BOJ	2,4	8	0,2	15	0,1	10
		ERR	1,0	3	0,0	1	0,2	5
		ERS	14,5	55	0,2	13	0,3	10
		HEG	6,7	27	0,2	9	1,4	52
		AUF	1,0	4	0,7	50	0,6	13
		RES	1,0	4	0,2	11	0,3	9
		Total	26,5	100	1,5	100	2,9	100
3b	31 (73)	BOJ	1,9	7	0,3	13	0,2	7
		ERR	0,3	1	0,02	1	0,04	1
		ERS	15,7	61	0,4	24	0,8	27
		HEG	5,4	22	0,2	7	1,8	58
		AUF	1,2	4	0,7	49	0,2	6
		RES	1,2	5	0,1	6	0,1	2
		Total	25,7	100	1,6	100	3,1	100
3c	30 (68)	BOJ	3,4	14	0,4	18	0,5	22
		ERR	1,0	4	0,1	3	0,1	3
		ERS	15,3	62	0,4	33	0,6	25
		HEG	0,01	0,1	0,002	0,1	1,3	40
		AUF	3,8	15	0,4	33	0,03	1
		RES	1,3	4	0,2	13	0,3	9
		Total	24,8	100	1,4	100	2,7	100
4bc	21 (52)	BOJ	5,9	24	0,3	19	0,5	20
		ERR	0,4	2	0,1	2	0,3	9
		ERS	14,9	63	0,5	39	1,1	55
		HEG	0,4	2	0,1	7	0,04	2
		AUF	0,4	2	0,1	3	0,03	1
		RES	1,7	7	0,6	30	0,6	13
		Total	23,8	100	1,7	100	2,6	100

Groupe de régions écologiques	Nombre de peuplements (nombre de placettes)	Essence	Catégorie de tiges					
			Arbres marchands		Recrues		Gaules	
			ST absolue (m ² ·ha ⁻¹)	ST relative (%)	ST absolue (m ² ·ha ⁻¹)	ST relative (%)	ST absolue (m ² ·ha ⁻¹)	ST relative (%)
3d4f	27 (48)	BOJ	2,0	7	0,03	5	0,1	5
		ERR	0,4	2	0	0	0,02	1
		ERS	24,7	86	0,5	81	1,1	72
		HEG	0,1	0,2	0,01	0,3	0,3	13
		AUF	0,3	1	0,002	1	0,01	0,3
		RES	0,9	4	0,1	13	0,1	9
		Total	28,4	100	0,6	100	1,6	100
Tous FE3	159 (378)	BOJ	3,0	12	0,2	14	0,3	12
		ERR	0,6	2	0,05	2	0,1	4
		ERS	16,3	64	0,4	36	0,8	36
		HEG	3,2	13	0,4	27	1,0	32
		AUF	0,8	3	0,1	6	0,2	6
		RES	1,3	5	0,3	15	0,3	9
		Total	25,2	100	1,5	100	2,8	100

Tableau A2. Biais moyens et relatifs associés aux prévisions de la surface terrière des arbres marchands sur 20 ans après traitement, entre les données du réseau de suivi des effets réels de la coupe de jardinage et 4 différentes simulations d'Artémis 2014 et une de SaMARE 2014, par groupe de régions écologiques et par essence.

Groupe de régions écologiques	Essence	Biais moyens (m ² ·ha ⁻¹)					Biais relatifs (%)				
		Artémis v3.0.6	Artémis v4.1.0	Artémis v4.1.0 « MCH »	Artémis v4.1.0 « tendances »	SaMARE	Artémis v3.0.6	Artémis v4.1.0	Artémis v4.1.0 « MCH »	Artémis v4.1.0 « tendances »	SaMARE
3a R08	BOJ	0,6	0,5	0,5	0,5	0,3	21	17	17	13	11
	ERR	-0,3	-0,3	-0,3	-0,2	-0,1	-65	-65	-66	-63	-31
	ERS	-1,4	-1,1	-1,1	-0,5	-1,9	-11	-9	-9	-6	-15
	HEG	0,8	0,7	1,3	0,6	0,5	24	21	37	15	16
	AUF	0,1	0,1	0,1	0,02	0,2	9	4	4	0	13
	RES	0,6	0,5	0,5	0,5	0,6	36	27	27	19	38
	Total	0,4	0,3	0,8	0,9	-0,3	2	1	4	1	-1
2a3a R07	BOJ	0,7	0,6	0,5	0,5	0,4	28	23	22	20	18
	ERR	0,1	0,1	0,1	0,2	0,3	15	15	14	16	29
	ERS	0,8	1,0	0,9	1,5	0,5	5	7	6	9	4
	HEG	0,8	0,9	2,2	0,7	1,0	12	13	33	8	14
	AUF	0,3	0,2	0,2	0,1	0,2	30	19	18	14	23
	RES	-0,1	-0,2	-0,2	-0,1	0,2	-5	-15	-16	-27	18
	Total	2,3	2,6	3,8	3,0	2,6	9	10	14	9	10
3b	BOJ	0,4	0,4	0,3	0,3	0,4	22	19	18	15	18
	ERR	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,01	-49	-46	-48	-42	-5
	ERS	0,7	1,0	0,9	1,6	0,5	5	6	6	8	3
	HEG	1,4	1,3	2,4	1,2	1,1	27	24	45	20	21
	AUF	0,4	0,3	0,3	0,3	0,4	30	25	24	23	30
	RES	-0,2	-0,3	-0,3	-0,3	-0,02	-16	-28	-29	-40	-2
	Total	2,6	2,5	3,5	3,0	2,3	10	10	14	9	9

Groupe de régions écologiques	Essence	Biais moyens (m ² ·ha ⁻¹)					Biais relatifs (%)				
		Artémis v3.0.6	Artémis v4.1.0	Artémis v4.1.0 « MCH »	Artémis v4.1.0 « tendances »	SaMARE	Artémis v3.0.6	Artémis v4.1.0	Artémis v4.1.0 « MCH »	Artémis v4.1.0 « tendances »	SaMARE
3c	BOJ	0,4	0,4	0,4	0,4	0,1	13	13	12	10	4
	ERR	-0,01	0,01	0,005	0,07	0,02	-1	1	0	2	2
	ERS	-1,5	-0,9	-1,0	-0,2	-1,4	-10	-6	-6	-4	-9
	HEG	0,2	0,2	1,1	-0,05	-0,03	6	4	29	-1	-1
	AUF	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-662	-850	-880	-914	-523
	RES	0,2	0,2	0,2	0,2	0,5	17	14	14	18	36
	Total	-0,7	-0,3	0,6	0,3	-0,9	-3	-1	3	1	-4
4bc	BOJ	1,5	1,2	1,2	1,2	0,7	25	21	21	20	13
	ERR	-0,1	-0,2	-0,2	-0,1	0,04	-29	-36	-36	-15	8
	ERS	-0,4	-0,1	-0,1	0,7	0,2	-3	-1	-1	5	1
	HEG	0,01	-0,03	0,1	-0,1	-0,3	1	-6	23	-18	-74
	AUF	0,02	-0,04	-0,04	-0,1	0,1	5	-8	-8	-12	17
	RES	0,6	0,4	0,4	0,5	0,7	33	25	25	29	42
	Total	1,5	1,3	1,4	2,2	1,4	6	6	6	9	6
3d4	BOJ	0,0	-0,1	-0,1	-0,1	0,03	-1	-6	-6	-6	1
	ERR	-0,2	-0,2	-0,2	-0,2	-0,1	-39	-50	-50	-39	-23
	ERS	1,9	1,8	1,7	2,8	1,6	8	7	7	11	7
	HEG	-0,5	-0,6	-0,4	-0,6	-0,7	-821	-921	-669	-1 000	-1 049
	AUF	-0,1	-0,2	-0,2	-0,2	-0,02	-34	-56	-56	-57	-8
	RES	-0,3	-0,5	-0,5	-0,4	-0,02	-35	-56	-56	-51	-3
	Total	0,8	0,2	0,3	1,3	0,8	3	1	1	4	3
Tous FE3	BOJ	0,6	0,4	0,4	0,4	0,3	19	15	15	15	10
	ERR	-0,1	-0,1	-0,1	-0,05	-0,01	-21	-22	-23	-9	-2
	ERS	-0,1	0,2	0,1	0,9	-0,2	-1	1	1	5	-1
	HEG	0,5	0,4	1,1	0,3	0,3	15	13	34	10	8
	AUF	0,1	0,04	0,03	0,02	0,1	13	5	4	2	16
	RES	0,2	0,03	0,02	0,1	0,3	12	2	2	6	25
	Total	1,1	1,0	1,6	1,7	0,8	4	4	6	7	3

Tableau A3. Biais moyens et relatifs associés aux prévisions de la surface terrière des recrues sur 20 ans après traitement, entre les données du réseau de suivi des effets réels de la coupe de jardinage et les résultats de 4 différentes simulations d'Artémis 2014 et une de SaMARE 2014, par groupe de régions écologiques et par essence.

Groupe de régions écologiques	Essence	Biais moyens (m ² ha ⁻¹)					Biais relatifs (%)				
		Artémis v3.0.6	Artémis v4.1.0	Artémis v4.1.0 « MCH »	Artémis v4.1.0 « tendances »	SaMARE	Artémis v3.0.6	Artémis v4.1.0	Artémis v4.1.0 « MCH »	Artémis v4.1.0 « tendances »	SaMARE
3a R08	BOJ	0,1	0,06	0,06	0,07	0,2	38	20	20	23	52
	ERR	-0,1	-0,1	-0,1	0,02	0,05	-85	-86	-89	18	54
	ERS	-0,3	-0,2	-0,2	0,1	-0,2	-56	-47	-48	27	-35
	HEG	0,3	0,2	0,2	0,1	0,1	60	34	35	22	12
	AUF	0,00	-0,04	-0,04	-0,07	0,07	0	-18	-21	-35	34
	RES	0,2	0,1	0,1	0,2	0,3	36	20	19	40	68
	Total	0,3	0,0	0,0	0,5	0,5	12	0	-1	22	23
2a3a R07	BOJ	0,0	0,0	0,0	0,004	0,07	25	0	-3	2	42
	ERR	-0,1	-0,1	-0,1	-0,04	-0,01	-418	-395	-415	-128	-29
	ERS	-0,5	-0,4	-0,4	-0,1	-0,4	-251	-236	-243	-68	-221
	HEG	0,4	0,2	0,2	0,1	0,1	50	23	24	15	17
	AUF	0,0	0,0	0,0	-0,05	0,06	3	-14	-19	-34	34
	RES	-0,1	-0,2	-0,2	-0,1	0,05	-51	-94	-98	-45	26
	Total	-0,3	-0,6	-0,6	-0,2	-0,1	-18	-39	-41	-13	-7
3b	BOJ	0,1	0,1	0,1	0,07	0,1	42	26	23	27	52
	ERR	-0,1	-0,1	-0,1	-0,04	-0,02	-639	-605	-636	-216	-108
	ERS	-0,4	-0,3	-0,3	0,01	-0,3	-100	-94	-98	2	-74
	HEG	0,5	0,3	0,3	0,26	0,1	64	45	46	35	18
	AUF	0,02	0,01	-0,0001	-0,01	0,03	13	7	0	-5	21
	RES	-0,2	-0,3	-0,3	-0,2	-0,1	-221	-291	-300	-196	-76
	Total	-0,1	-0,3	-0,3	0,1	-0,1	-5	-19	-21	7	-3

Groupe de régions écologiques	Essence	Biais moyens (m ² ha ⁻¹)					Biais relatifs (%)				
		Artémis v3.0.6	Artémis v4.1.0	Artémis v4.1.0 « MCH »	Artémis v4.1.0 « tendances »	SaMARE	Artémis v3.0.6	Artémis v4.1.0	Artémis v4.1.0 « MCH »	Artémis v4.1.0 « tendances »	SaMARE
3c	BOJ	0,2	0,1	0,1	0,1	0,2	48	37	36	39	56
	ERR	-0,03	-0,04	-0,04	0,02	0,02	-52	-59	-64	26	28
	ERS	-0,5	-0,5	-0,5	-0,1	-0,3	-144	-137	-141	-19	-71
	HEG	0,2	0,1	0,1	0,1	-0,1	60	34	35	17	-25
	AUF	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-4 321	-4 315	-4 492	-4 790	-5 406
	RES	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	0,03	-51	-70	-73	-32	19
	Total	-0,3	-0,5	-0,5	0,0	-0,2	-23	-35	-37	0	-16
4bc	BOJ	0,1	0,001	0,0002	0,004	0,01	20	0	0	1	3
	ERR	-0,1	-0,1	-0,1	-0,01	0,01	-130	-156	-156	-14	10
	ERS	-0,5	-0,5	-0,5	0,02	-0,2	-89	-89	-89	4	-35
	HEG	-0,002	-0,05	-0,05	-0,1	-0,4	-3	-71	-68	-136	-613
	AUF	-0,04	-0,1	-0,1	-0,1	-0,04	-44	-53	-53	-71	-41
	RES	0,3	0,2	0,2	0,3	0,4	45	35	35	49	67
	Total	-0,3	-0,4	-0,4	0,2	-0,2	-15	-27	-27	10	-13
3d4f	BOJ	-0,1	-0,2	-0,2	-0,2	-0,1	-462	-587	-588	-581	-283
	ERR	-0,1	-0,1	-0,1	-0,04	-0,04	NA	NA	NA	NA	NA
	ERS	-0,6	-0,6	-0,6	-0,1	-0,2	-137	-139	-139	-13	-38
	HEG	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,3	-2 394	-4 132	-4 006	-5 955	-12 059
	AUF	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-1 013	-1 078	-1 079	-1 225	-1 689
	RES	-0,2	-0,2	-0,2	-0,1	-0,03	-163	-198	-198	-135	-32
	Total	-1,1	-1,2	-1,2	-0,6	-0,7	-186	-208	-208	-102	-117
Tous FE3	BOJ	0,1	0,02	0,02	0,03	-0,09	28	10	8	11	-38
	ERR	-0,1	-0,1	-0,1	-0,01	-0,003	-178	-183	-190	-29	-7
	ERS	-0,4	-0,4	-0,4	-0,003	0,2	-108	-103	-104	-1	56
	HEG	0,2	0,1	0,1	-0,1	0,1	56	30	31	15	16
	AUF	-0,03	-0,04	-0,05	0,1	0,02	-27	-40	-45	-59	15
	RES	-0,02	-0,1	-0,1	0,01	-0,12	-7	-28	-29	2	-43
	Total	-0,3	-0,5	-0,5	0,02	0,1	-18	-32	-33	1	7