

|                    |                                                                                                                                                             |
|--------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Titre :</b>     | <b>Utilisation du modèle Artémis pour développer une méthode de simulation du changement de productivité des forêts associé aux changements climatiques</b> |
| <b>Auteur(s) :</b> | Hugues Power, ing.f., Ph. D. et Isabelle Auger, stat. ASSQ, M. Sc.                                                                                          |
| <b>Date :</b>      | Novembre 2019                                                                                                                                               |

Au cours des années futures, les changements climatiques modifieront les conditions de croissance des peuplements forestiers. La planification des activités d'aménagement forestier, y compris le calcul des possibilités forestières, doit en tenir compte. Pour ce faire, les courbes qui prévoient l'évolution dans le temps du volume produit par les peuplements forestiers doivent être adaptées. Nous proposons ici une méthode, basée sur la combinaison du modèle de croissance Artémis et d'un modèle d'accroissement de la surface terrière sensible au climat, qui permet de modifier les courbes d'évolution du volume afin de tenir compte du changement anticipé des conditions climatiques.

## 1. Contexte

Les travaux du projet d'adaptation du calcul des possibilités forestières (CPF) aux changements climatiques par le Bureau du forestier en chef (BFEC) se doivent de considérer le changement de productivité des peuplements associé à l'évolution du climat. Actuellement, le BFEC utilise les modèles de croissance forestière Artémis-2014 (Power 2016) et Natura-2014 (Auger 2017) pour calculer les courbes de rendement en volume pour le CPF. Toutefois, comme ces modèles ne sont pas conçus pour simuler l'effet des changements climatiques sur la croissance des forêts, ils ne peuvent pas être utilisés tels quels pour simuler le changement de productivité dans le CPF.

D'autres modèles développés à partir de données provenant des forêts sur le territoire du Québec existent pour simuler l'effet des changements climatiques. Par exemple, celui de D'Orangeville *et al.* (2018) montre que la croissance en diamètre de différentes essences boréales changera en fonction du climat à venir. Toutefois, un tel modèle, qui simule la croissance diamétrale des arbres, ne peut pas être utilisé directement pour modifier les courbes de rendement en volume actuellement utilisées dans le CPF, puisque celles-ci sont calculées à l'échelle du peuplement et que le phénomène d'accroissement en diamètre des arbres est alors confondu avec ceux de mortalité et de recrutement dans le peuplement.

---

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

2700, rue Einstein, bureau C.1.105.1  
Québec (Québec) G1P 3W8  
Tél : 418 643-7994 poste 6514  
Télécopieur : 418 643-2165  
Courriel : [hugues.power@mffp.gouv.qc.ca](mailto:hugues.power@mffp.gouv.qc.ca)  
<http://www.mffp.gouv.qc.ca/forets/connaissances/recherche/index.jsp>

Artémis est un modèle de croissance à l'échelle de l'arbre pour les peuplements hauts de plus de 7 m qui simule, entre autres, l'accroissement en diamètre de chaque arbre. Même s'il n'est pas spécifiquement conçu pour prévoir l'effet des changements climatiques, il peut être modifié pour y être plus sensible si l'on modifie les fonctions d'accroissement en diamètre, de mortalité et de recrutement. L'objectif de ce projet était donc de développer une méthode permettant d'utiliser le modèle de D'Orangeville *et al.* (2018) en combinaison avec le modèle de croissance Artémis-2014 pour simuler le changement de productivité associé aux changements climatiques. Pour ce faire, nous avons modifié le modèle Artémis pour simuler la croissance des placettes des strates forestières de la région du Saguenay–Lac-St-Jean (région 02) sous différents scénarios de changements climatiques. À partir de ces simulations, nous avons ensuite calculé des modificateurs qui pourront être appliqués aux courbes de rendement en volume utilisées dans le CPF pour tenir compte du changement de productivité des forêts associé aux changements climatiques.

## 2. Méthodologie

### 2.1. Modèle de D'Orangeville

Le modèle de D'Orangeville *et al.* (2018) (ci-après appelé « modèle de D'Orangeville ») prévoit l'accroissement annuel en surface terrière d'un arbre en fonction de son diamètre à hauteur de poitrine (DHP, mesuré à une hauteur de 1,3 m), de la surface terrière totale de la placette (arbres avec un DHP > 1 cm), de la surface terrière des arbres plus grands que l'arbre en question, de l'âge de l'arbre, de l'âge du peuplement, de la pente, de la température annuelle maximale, de l'indice d'humidité de mai à septembre (précipitations dont on soustrait l'évapotranspiration) et de la quantité de précipitations tombée sous forme de neige. Ces auteurs ont ajusté le modèle séparément pour 6 essences (épinette noire [*Picea mariana*], épinette blanche [*Picea glauca*], sapin baumier [*Abies balsamea*], pin gris [*Pinus banksiana*], bouleau à papier [*Betula papyrifera*] et peuplier faux-tremble [*Populus tremuloides*] à l'aide des placettes-échantillons temporaires et permanentes de la Direction des inventaires forestiers (DIF) du ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs du Québec (MFFP).

### 2.2. Artémis

Artémis comprend notamment 3 modules qui simulent l'évolution, à l'échelle de l'arbre et par pas de 10 ans, de l'accroissement en DHP, de la probabilité de mortalité et du recrutement de nouveaux arbres. Le modèle est ajusté séparément pour 25 végétations potentielles et ne prend en compte que les arbres de DHP > 9 cm. Les 2 variables explicatives associées au climat incluses dans le modèle sont la température annuelle et les précipitations annuelles moyennes sur la période 1980-2010. Toutefois, elles ne sont pas présentes dans tous les modules ni pour toutes les végétations potentielles, et leur effet est généralement le même pour toutes les essences, ce qui limite la possibilité de les utiliser pour anticiper l'effet des changements climatiques.

### 2.2.1 Modification du modèle Artémis

Afin de rendre Artémis plus sensible au climat, nous avons intégré le modèle d'accroissement en surface terrière de D'Orangeville au module d'accroissement en DHP d'Artémis. Puisqu'Artémis ne prend en compte que les arbres de  $DHP > 9$  cm, nous avons ajusté de nouveau le modèle de D'Orangeville en remplaçant la surface terrière totale par la surface terrière des arbres de  $DHP > 9$  cm.

Dans cette version modifiée d'Artémis, le modèle de D'Orangeville est utilisé pour calculer, pour chaque arbre, un modificateur d'accroissement en DHP associé aux changements climatiques. Pour ce faire, nous avons utilisé le modèle de D'Orangeville pour estimer deux accroissements annuels en surface terrière (AST) à partir du DHP : l'AST<sub>Hist</sub> à partir des variables climatiques représentant le climat historique (Hist), et l'AST<sub>CC</sub> à partir des variables climatiques sous un scénario de changements climatiques (CC). Le modificateur d'accroissement en DHP associé aux changements climatiques correspond au rapport  $AST_{CC}/AST_{Hist}$ ; l'accroissement en DHP prévu par le module original d'Artémis est ajusté en le multipliant par ce modificateur. Nous avons fixé l'AST minimal prévu par les modèles de D'Orangeville à  $0,12 \text{ cm}^2/\text{an}$ , soit la valeur minimale des données de calibration du modèle, pour éviter de générer des valeurs trop grandes du modificateur.

### 2.3. Données climatiques

Le consortium Ouranos a calculé les changements anticipés de température et de précipitations associés aux changements climatiques à partir de 3 modèles généraux de circulation (MGC) pour des tuiles de  $10 \text{ km} \times 10 \text{ km}$  :

- CANESM2 : Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis (Canada);
- HADGEM2-ES : UK Meteorological Office (Royaume-Uni);
- MIROC-ESM-CHEM : National Institute for Environmental Studies (Japon).

Deux scénarios d'émissions futures de gaz à effet de serre (RCP, pour *representative concentration pathways*) ont été utilisés : soit ceux de 4,5 et de  $8,5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ . Nous avons calculé le climat historique pour chacune des combinaisons de MGC et de RCP en calculant la moyenne des valeurs des variables climatiques sur la période 1980-2010. Nous avons calculé le climat sous un scénario de changements climatiques en faisant la moyenne, pour chaque période de 10 ans entre 2020 et 2100, des variables climatiques simulées mensuellement. Cette moyenne a été calculée individuellement pour chacune des combinaisons de MGC et de RCP. Le climat après l'année 2100 a été maintenu égal à celui de la dernière période de 10 ans.

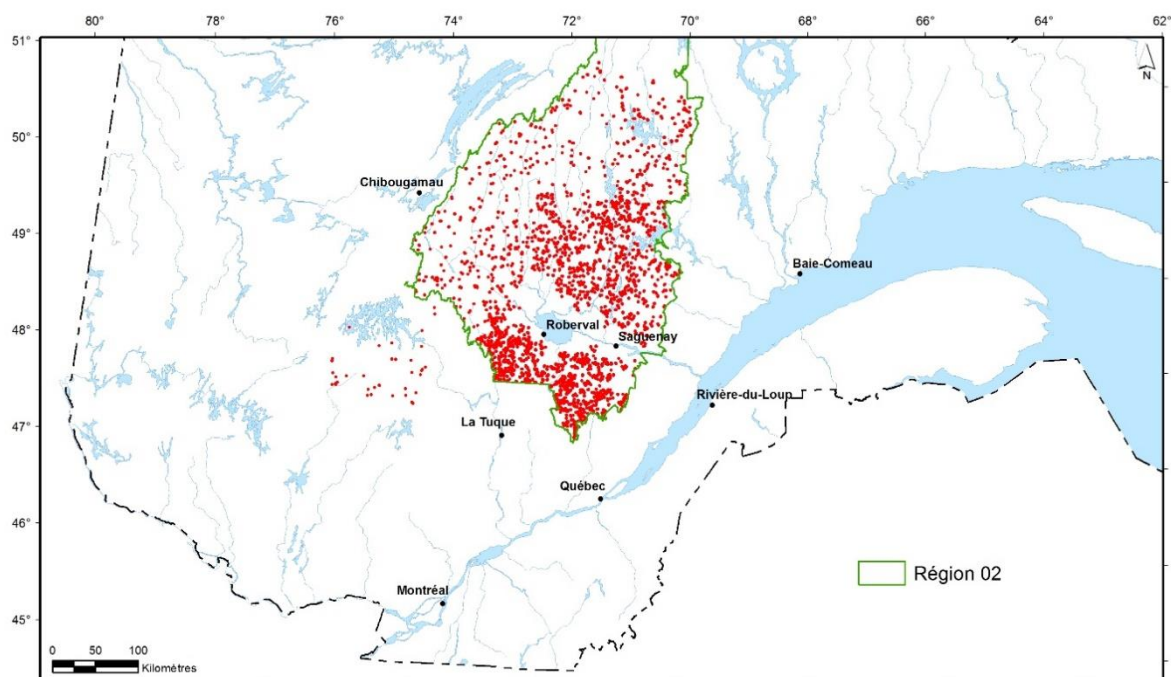
### 2.4. Implantation de la version modifiée d'Artémis

Artémis-2014 est actuellement accessible sur la plateforme de simulation Capsis (Dufour-Kowalski *et al.* 2012). Puisqu'il est complexe d'y effectuer des modifications, nous avons reprogrammé le

simulateur Artémis-2014 dans le logiciel R (R Core Team 2019) en y ajoutant le modificateur d'accroissement en DHP basé sur le modèle de D'Orangeville.

## 2.5. Territoire d'étude et données

Le territoire d'étude est celui de la région administrative du Saguenay–Lac-St-Jean (région 02, figure 1). Nous avons utilisé les 5 488 placettes-échantillons du 3<sup>e</sup> et du 4<sup>e</sup> inventaire écoforestier de la DIF situées sur ce territoire, soit les mêmes que le BFEC a utilisées pour construire les courbes de rendement pour le plus récent CPF de ce territoire (tableau 1). Pour combler le besoin du BFEC de documenter certaines strates de la région 02, nous avons aussi utilisé quelques placettes situées à l'extérieur du territoire d'étude (figure 1). Nous avons ensuite associé chacune des placettes sélectionnées à la tuile climatique qui correspond à son emplacement. Sur le territoire d'étude, la température annuelle moyenne et les précipitations totales historiques sont respectivement, en moyenne, de 0,7 °C (de -2,4 à 3,1 °C) et de 1 014 mm (de 831 à 1 356 mm). L'augmentation moyenne anticipée dans 80 ans de la température annuelle moyenne sur ce territoire (pour les trois modèles MGC confondus) est de 5,1 °C (de 4,9 à 5,4 °C) selon le scénario d'émissions RCP 4.5, et de 9,0 °C (de 8,8 à 9,3 °C) selon le scénario RCP 8.5. L'augmentation moyenne anticipée des précipitations totales est de 14,1 % (de 12,2 à 15,3 %) selon le scénario RCP 4.5, et de 21,2 % (de 17,4 à 24,3 %) selon le scénario RCP 8.5.



**Figure 1.** Territoire d'étude et répartition des placettes du projet.

**Tableau 1.** Statistiques descriptives pour le volume marchand brut (m<sup>3</sup>/ha) des placettes utilisées dans le projet (n = 5 488).

| Groupe d'essences     | Volume marchand brut (m <sup>3</sup> /ha) |         |         |         |                            |                            |
|-----------------------|-------------------------------------------|---------|---------|---------|----------------------------|----------------------------|
|                       | Moyenne                                   | Médiane | Minimum | Maximum | 10 <sup>e</sup> percentile | 90 <sup>e</sup> percentile |
| Feuillus intolérants  | 25,1                                      | 3,6     | 0       | 354,8   | 0                          | 84,1                       |
| Feuillus tolérants    | 2,1                                       | 0       | 0       | 220,6   | 0                          | 0                          |
| Résineux intolérants  | 10,0                                      | 0       | 0       | 326,4   | 0                          | 34,0                       |
| Résineux tolérants    | 46,1                                      | 30,1    | 0       | 311,5   | 0,9                        | 114,4                      |
| Sapin baumier         | 21,8                                      | 5,5     | 0       | 300,0   | 0                          | 67,0                       |
| Total toutes essences | 105,6                                     | 95,9    | 0,5     | 419,1   | 25,8                       | 196,2                      |

## 2.6. Simulations

### 2.6.1 Évolution des placettes dans les peuplements hauts de plus de 7 m

Nous avons simulé l'évolution de chaque placette 12 fois avec notre version modifiée d'Artémis, pour 15 périodes de 10 ans (de 2020 à 2170) et pour chaque combinaison de MGC et de RCP : dans une 1<sup>re</sup> étape, nous avons utilisé le climat historique et l'avons maintenu constant durant toute la simulation. Dans une 2<sup>e</sup> étape, nous avons utilisé les prévisions climatiques de chacune des combinaisons de MGC et de RCP pour la période 2020-2100, tout en gardant le climat de 2100 constant pour la période 2110-2170. Pour finir, nous avons extrait des valeurs aux 5 ans par interpolation linéaire entre deux valeurs aux 10 ans.

Dans les modules d'Artémis pour l'accroissement en DHP et le recrutement, nous avons fixé les valeurs des variables climatiques à celles du climat historique durant les 15 périodes pour les 12 simulations. Pour le module d'accroissement, cela impliquait de fixer la valeur des variables climatiques afin d'éviter d'appliquer une double correction aux prévisions, soit celle provenant du modèle de D'Orangeville et celle provenant du changement de la valeur des variables climatiques prédictives déjà incluses dans Artémis. Pour le module de recrutement, le changement de la valeur des variables climatiques durant la simulation pouvait entraîner une prévision exagérée du nombre de recrues par le modèle. Nous avons également limité le nombre de nouveaux arbres de DHP > 9 cm prédit pour chaque essence par le module de recrutement d'Artémis à un maximum de 250 arbres/ha/période, puisque des nombres irréalistes de recrues pouvaient être simulés pour les végétations potentielles MS6 et RE1. Pour le module de mortalité, les valeurs des variables climatiques explicatives incluses dans Artémis évoluaient durant les 15 périodes selon le scénario climatique choisi.

Les principales essences présentes sur le territoire de la région 02 sont celles couvertes par les modèles de D'Orangeville (en proportion de la surface terrière : 26 % de sapin baumier; 44 % d'épinette noire, 7 % de pin gris, 2 % d'épinette blanche, 14 % de bouleau à papier et 5 % de peuplier faux-tremble). Nous avons associé les essences non couvertes par le modèle de D'Orangeville (2 % de la surface terrière) à d'autres essences couvertes par le modèle (annexe 1) en nous basant sur leurs caractéristiques écologiques. Artémis ne distingue pas les épinettes noires des épinettes blanches et des épinettes rouges, et regroupe ces trois essences sous l'appellation EPX. L'épinette rouge étant absente du territoire d'étude, nous avons fait l'hypothèse que le groupe EPX n'était constitué que d'épinette noire et d'épinette blanche. Dans les simulations, nous avons donc réparti le groupe EPX entre ces deux essences selon la proportion qu'elles représentent dans le groupe de placettes à l'étude dans chacune des végétations potentielles (annexe 2). Nous avons estimé le volume des arbres avec le tarif de cubage de Fortin *et al.* (2009), et leur hauteur, avec la relation hauteur-diamètre de Auger (2016), dans laquelle nous avons fixé les valeurs des variables climatiques à celles du climat historique.

## **2.6.2 Strates forestières**

Pour modéliser l'évolution des peuplements hauts de plus de 7 m, le BFEC a regroupé les 5 488 placettes en strates forestières selon le groupement d'essences, le type de site et la structure du peuplement, entre autres. Par la suite, nous avons scindé les 54 strates pour la région 02 en classes d'âge de 20 ans (tableau 2). Cette étape était nécessaire à cause du changement graduel des conditions climatiques, puisque la différence entre la croissance en volume sous un scénario de changements climatiques et celle sous le climat historique variera en fonction de l'âge de la placette au début de la simulation, de même qu'en fonction du temps depuis le début de la simulation.

Lorsque le nombre de placettes était trop faible dans une classe d'âge pour une strate donnée, nous avons regroupé les placettes de cette classe d'âge avec celles de la classe suivante. Ainsi, à cause de leur trop faible nombre, nous avons systématiquement regroupé les placettes de la classe d'âge de 10 ans avec celles de la classe de 30 ans, et les placettes dont l'âge était supérieur à 100 ans avec celles de la classe de 90 ans. Lorsque le nombre total de placettes dans une strate était inférieur à 30, nous avons regroupé cette strate avec d'autres, en nous basant principalement sur la composition en essences et sur la similitude de la valeur estimée du modificateur du volume.

**Tableau 2.** Exemple de la fragmentation d'une strate forestière en fonction de l'âge au début de la simulation.

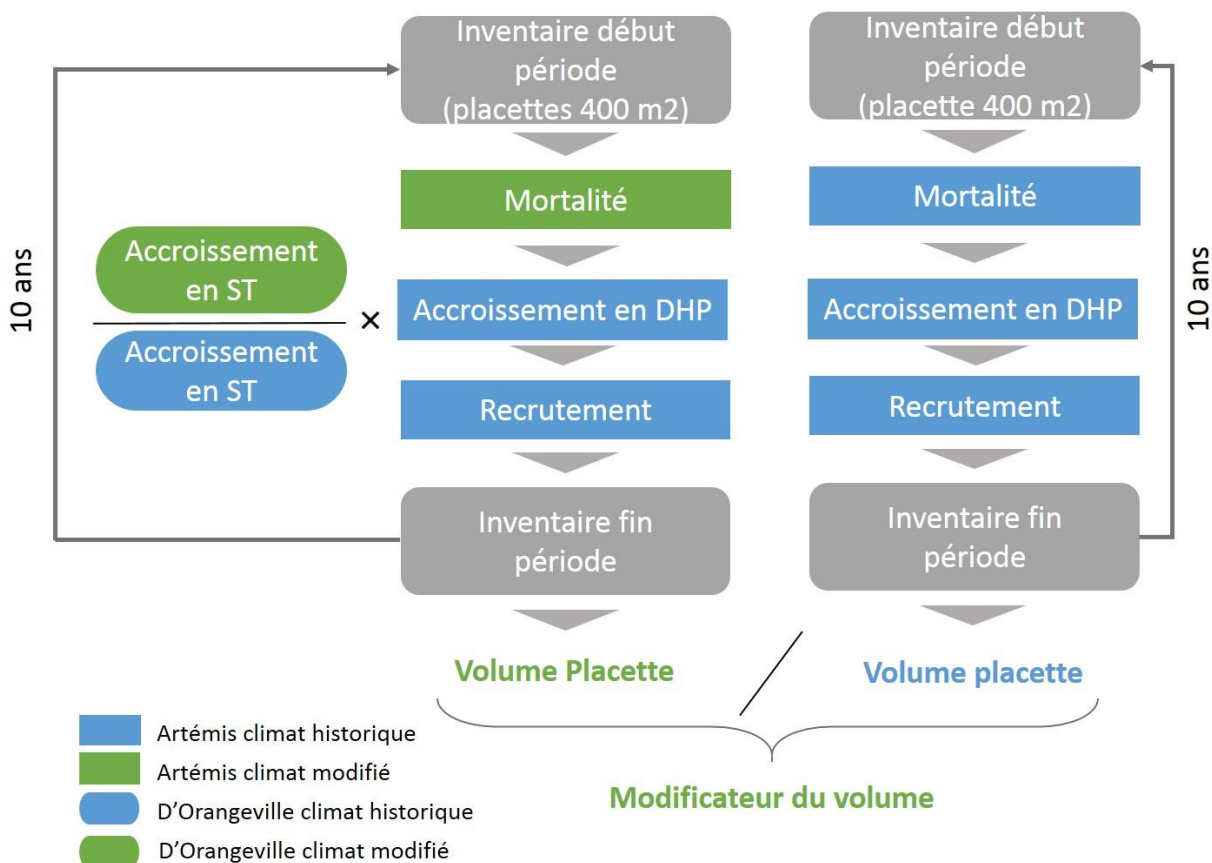
| Strate | Classe d'âge au début<br>de la simulation<br>(ans) | Limites de la<br>classe d'âge |
|--------|----------------------------------------------------|-------------------------------|
| 1      | 10                                                 | 11-20 ans                     |
| 1      | 30                                                 | 21-40 ans                     |
| 1      | 50                                                 | 41-60 ans                     |
| 1      | 70                                                 | 61-80 ans                     |
| 1      | 90                                                 | 81-100 ans                    |
| 1      | 110+                                               | 91 ans et plus                |

### 2.6.3 Simulation des strates de retour

Étant donné que le CPF s'effectue sur plusieurs décennies, il est nécessaire de prévoir la reconstitution des volumes de bois issus de peuplements qui subiront des perturbations majeures. Comme les conditions climatiques changent au cours de la période de simulation, il n'est pas possible de retourner au début de la courbe, puisque celle-ci aura changé avec le temps. Pour répondre au besoin du BFEC de simuler la reconstitution des volumes sur les superficies coupées, nous avons simulé à nouveau l'ensemble des placettes de 40 ans et moins, cette fois en faisant varier le moment du début de la simulation de 2030 à 2100 par pas de 10 ans et en utilisant le climat associé à ces périodes. Pour l'évolution des strates de retour, le BFEC a regroupé les 666 placettes de 40 ans et moins en 10 strates forestières.

### 2.7. Modificateur du volume d'une strate forestière

Nous avons obtenu la courbe de rendement en volume marchand brut (VMB) d'une strate en calculant la moyenne du volume dans les placettes concernées par année de simulation (et par classe d'âge pour les strates hautes de plus de 7 m), et ce, tant pour le volume simulé sous un scénario de changements climatiques (VMB<sub>CC</sub>) que pour celui simulé sous le climat historique (VMB<sub>Hist</sub>). Les volumes moyens ont été calculés pour l'ensemble des essences et séparément pour 5 groupes d'essences : les résineux tolérants (RT), les résineux intolérants (RI), les feuillus tolérants (FT), les feuillus intolérants (FI) et le sapin baumier (SB). Nous avons ensuite calculé un modificateur du volume pour chacune des strates, en divisant le VMB<sub>CC</sub> par le VMB<sub>Hist</sub> pour chaque période de 5 ans (figure 2).



**Figure 2.** Méthode de calcul du modificateur du volume à l'échelle de la strate.

### 3. Résultats et discussion

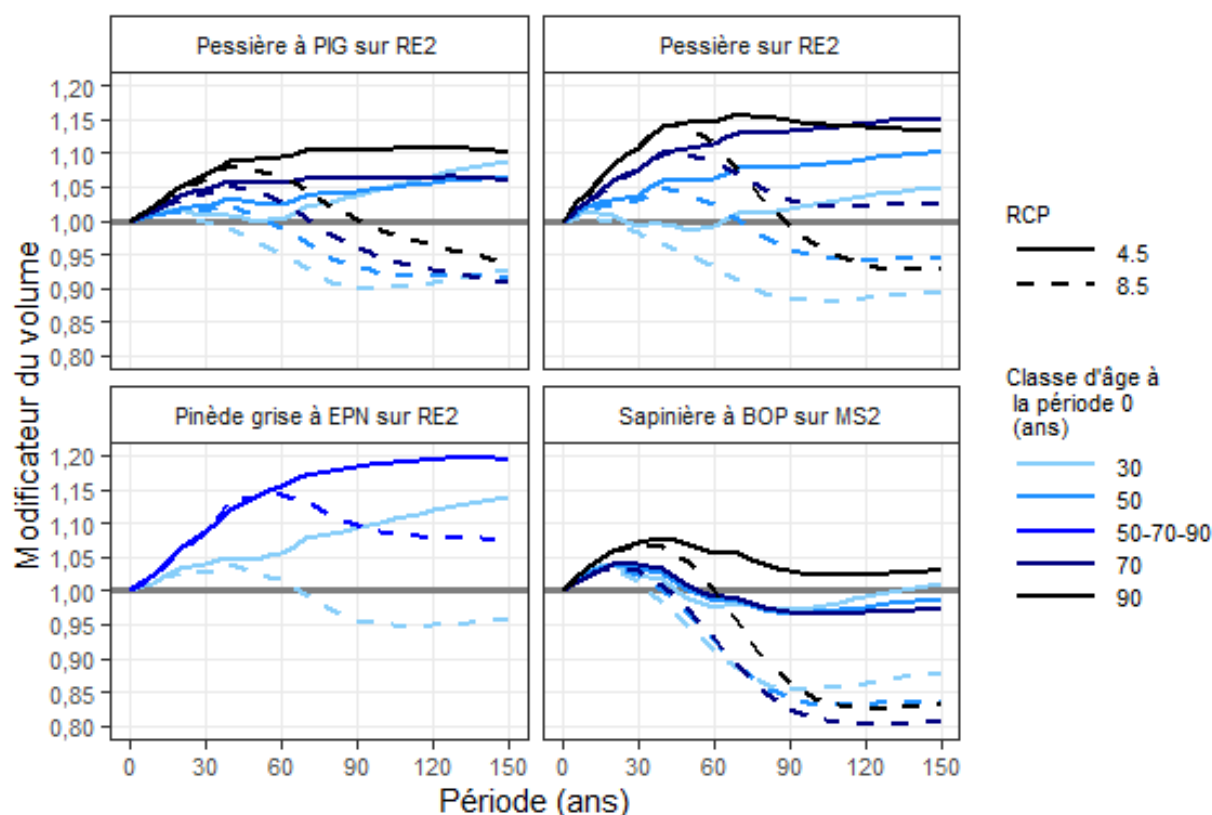
#### 3.1. Modificateur du volume dans les strates forestières hautes de plus de 7 m

Dans notre version modifiée d'Artémis, le modèle de D'Orangeville sert à calculer un modificateur d'accroissement en DHP associé aux changements climatiques pour ajuster l'accroissement en DHP prévu par le module original d'Artémis. Nous avons simulé l'évolution sur 150 ans du VMB des placettes de 54 strates de la région 02 sous 6 climats futurs différents. Nous avons dû retirer les 136 placettes sur la végétation potentielle de la pessière noire à lichens (RE1), car l'évolution de leur volume était aberrante. Nous avons ensuite calculé le rapport du volume moyen d'une strate pour une classe d'âge au début de la simulation sous un climat futur donné sur celui sous le climat historique, afin d'obtenir un modificateur du volume pour la strate.

En général, l'évolution de ce modificateur nous indique que le VMB augmente d'abord, puis diminue dans le temps, à mesure que s'intensifient les changements climatiques anticipés (figure 3). Sous le scénario d'émissions RCP 4.5, le VMB dans les trois strates résineuses présentées, toutes essences confondues, est presque toujours plus grand sous le climat anticipé que sous le climat historique, peu importe l'âge au

début de la simulation. Par contre, dans la strate de la sapinière à bouleau blanc et pour les classes d'âge de 70 ans et moins, le VMB devient plus faible sous le climat anticipé que sous le climat historique après 50 ans de simulations. Sous le scénario d'émissions RCP 8.5, pour 12 des 14 combinaisons présentées de strate et de classe d'âge, la valeur du modificateur commence par s'accroître, puis diminue et passe sous le seuil de 1 (figure 3). Le moment où le modificateur devient inférieur à 1 varie selon la strate et la classe d'âge au début de la simulation, de sorte que le VMB dans les strates, à la fin de la simulation, est généralement moins grand sous le climat futur anticipé que sous le climat historique.

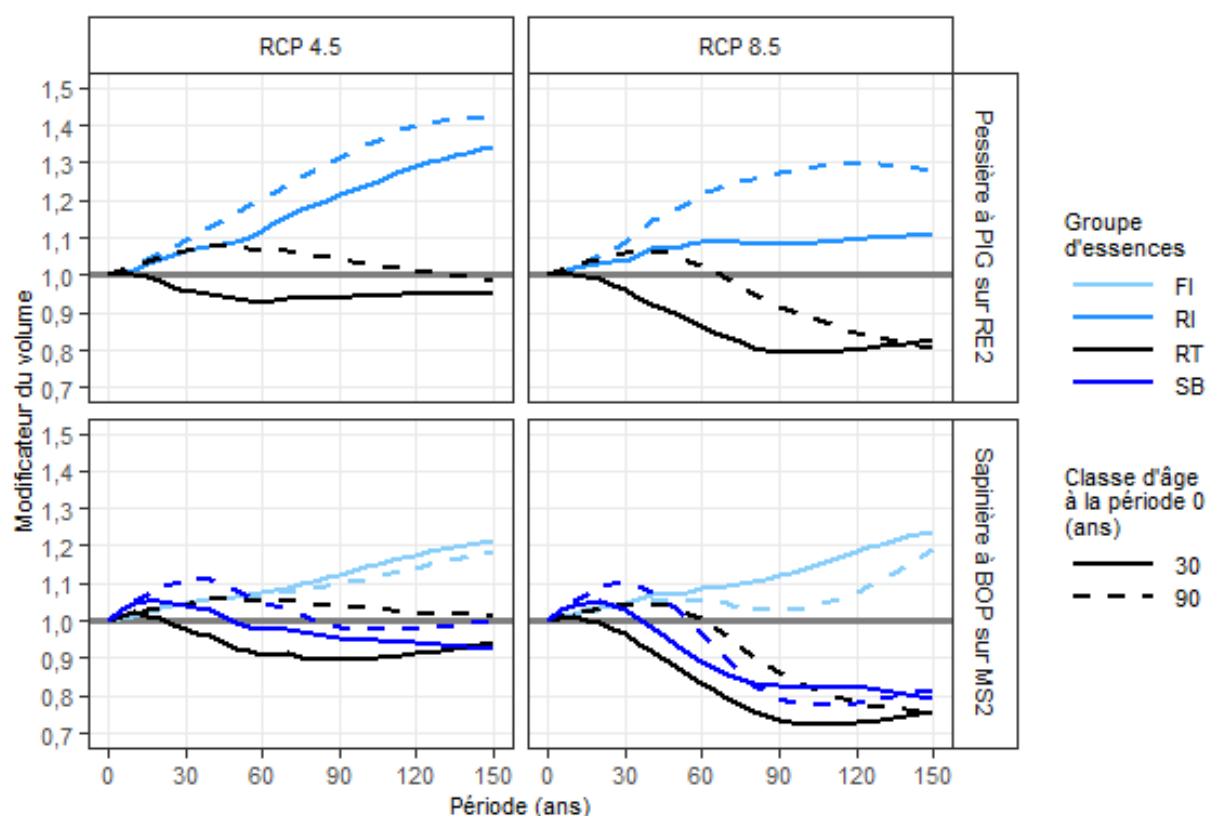
Ces résultats sont cohérents avec différents travaux (p. ex. Yang *et al.* 2015) qui prévoient que chaque essence a des conditions optimales de croissance, et que le réchauffement climatique changera l'emplacement géographique de cet optimum. Ce phénomène se reflètera généralement par un gain de croissance sur les sites dont la température se maintiendra sous l'optimum de croissance, et par une diminution de croissance sur les sites dont la température grimpera au-dessus de cet optimum.



**Figure 3.** Modificateur du volume, toutes essences confondues (moyenne des 3 MGC), en fonction de la période de simulation, par classe d'âge au début de la simulation et par scénario d'émissions de gaz à effet de serre (RCP) pour 4 strates (PIG : pin gris; EPN : épinette noire; BOP : bouleau à papier; RE2 : végétation potentielle de la pessière noire à mousses ou à éricacées; MS2 : végétation potentielle de la sapinière à bouleau blanc).

Le modificateur du volume par groupe d'essences indique que l'effet du climat futur anticipé n'est pas le même pour toutes les essences (figure 4). Par exemple, dans les pessières à pin gris sur la végétation

potentielle de la pessière noire à mousses ou à éricacées (RE2), le VMB du groupe des RI (majoritairement composé de pin gris) augmente de plus en plus sous un climat futur plus chaud par rapport au climat historique, et ce, sur tout l'horizon de simulation. Le volume du groupe des RT (majoritairement composé d'épinette noire) augmente moins avec le temps que le pin gris, et diminue même sous le climat futur par rapport au climat historique. Dans la strate de la sapinière à bouleau à papier sur la végétation potentielle de la sapinière à bouleau blanc (MS2), le groupe des FI (composé majoritairement de bouleau à papier) est le seul dont le VMB augmente à long terme sous un climat futur plus chaud (figure 4). Ces résultats semblent cohérents avec ceux de D'Orangeville *et al.* (2018; leur figure 4 : +4 °C en température annuelle maximale avec +15 % de précipitations totales), puisque sur le territoire de la région 02, leurs modèles prédisent principalement des variations de l'AST positives pour le bouleau à papier et le pin gris, et négatives pour l'épinette noire et le sapin baumier.

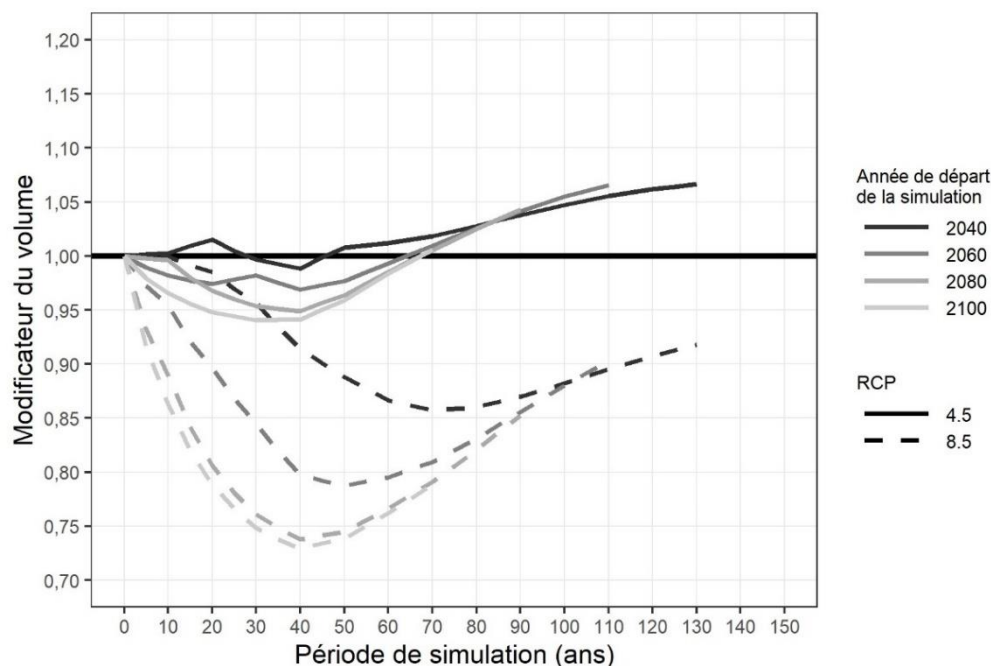


**Figure 4.** Modificateur du volume (moyenne des 3 MGC) en fonction de la période de simulation, par groupe d'essences et par classe d'âge au début de la simulation pour 4 strates et 2 scénarios d'émissions de gaz à effet de serre (RCP) (PIQ : pin gris; BOP : bouleau à papier; RE2 : végétation potentielle de la pessière noire à mousses ou à éricacées; MS2 : végétation potentielle de la sapinière à bouleau blanc).

### 3.2. Modificateur du volume pour les strates de retour

En utilisant les placettes de 40 ans et moins, nous avons obtenu des modificateurs de volume pour les strates de retour après des perturbations majeures selon l'année de départ de la simulation. Comme pour

les strates hautes de 7 m et plus, nous avons aussi retiré les 14 placettes dans la végétation potentielle RE1. Les résultats pour les 10 strates de retour sont tous relativement semblables à l'exemple présenté à la figure 5 : plus l'année de départ de la simulation s'éloigne de la période historique (année 2020) — et donc, plus la température annuelle moyenne est élevée au départ de la simulation — plus le modificateur du volume décroît rapidement. Cet effet est plus marqué sous le scénario d'émissions RCP 8.5 que sous le scénario RCP 4.5.



**Figure 5.** Modificateur du volume, toutes essences confondues (moyenne des 3 MGC), dans la strate de retour 201 (pessière à sapin) en fonction de la période de simulation, par année de départ de la simulation et par scénario d'émissions de gaz à effet de serre (RCP).

### 3.3. Améliorations

Pour cette analyse, nous n'avons pas modifié les modules d'Artémis pour la mortalité et le recrutement, mais puisque ces deux processus sont influencés par les changements de surface terrière, ils devraient être influencés indirectement par les changements climatiques par le biais du changement de surface terrière engendré par la modification du module d'accroissement en DHP. Cependant, il faudrait aussi développer une équation de mortalité plus sensible au climat afin de mieux évaluer l'effet du changement de climat sur la mortalité et modifier les prévisions de mortalité du modèle Artémis, au même titre que pour la croissance en diamètre. Présentement, l'équation de prévision de la mortalité des arbres est paramétrée individuellement pour chacune des végétations potentielles. Cette segmentation par végétation potentielle pourrait limiter l'effet du climat dans le modèle. Le fait d'enlever cette segmentation permettrait d'accroître le gradient climatique dans l'équation et de mieux saisir l'effet du climat sur la mortalité des tiges individuelles.

Le module de recrutement devra lui aussi faire l'objet de travaux visant à y intégrer directement l'effet des changements climatiques. Cette étape pourrait s'avérer plus complexe, puisqu'elle nécessitera, entre autres, de prendre en compte la répartition géographique des essences en plus du changement du climat. Entre temps, le changement à long terme de la composition associé aux changements climatiques pourrait être géré en modifiant la courbe de retour des peuplements.

#### **4. Conclusion et recommandations**

Le présent travail a permis de développer une méthode permettant de modifier les courbes de productivité utilisées pour le CPF en fonction de scénarios de changements climatiques anticipés. Nos modélisations prédisent un accroissement initial du VMB suivi de sa diminution dans le temps, à mesure que s'intensifieront les changements anticipés. Ces résultats semblent cohérents avec ce qui est avancé dans la littérature scientifique (Pedlar et McKenney 2017).

La présente méthode a l'avantage d'utiliser les courbes de productivité présentement en usage dans le CPF, ce qui rend plus directe l'évaluation des effets des changements climatiques sur la possibilité forestière. Nous recommandons donc que les résultats présentés ici soient utilisés dans le cadre du projet d'adaptation du CPF aux changements climatiques. La poursuite du développement de la méthode permettra d'élargir les possibilités d'utilisation.

#### **5. 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://mffp.gouv.qc.ca/documents/forets/connaissances/recherche/Note146.pdf>]
- Auger, I., 2017. *Natura-2014 : Mise à jour et évaluation du modèle de croissance 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. [<https://mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Auger-Isabelle/Note147.pdf>]
- Fortin, M., J. DeBlois, S. Bernier et G. Blais, 2009. *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.
- 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° 48. 68 p.

[\[https://www.mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Fortin-Mathieu/Memoire156.pdf\]](https://www.mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Fortin-Mathieu/Memoire156.pdf)

- D'Orangeville, L., D. Houle, L. Duchesne, R.P. Phillips, Y. Bergeron et D. Kneeshaw, 2018. *Beneficial effects of climate warming on boreal tree growth may be transitory*. Nature Commun. 9(3213): 10 p. [\[https://doi.org/10.1038/s41467-018-05705-4\]](https://doi.org/10.1038/s41467-018-05705-4)
- 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(2): 221-233. [\[https://doi.org/10.1007/s13595-011-0140-9\]](https://doi.org/10.1007/s13595-011-0140-9)
- Pedlar, J.H. et D.W. McKenney, 2017. *Assessing the anticipated growth response of northern conifer population to warming climate*. Sci. Rep. 7: 43881. [\[https://doi.org/10.1038/srep43881\]](https://doi.org/10.1038/srep43881)
- Power, H., 2016. *Comparaison des biais et précision des estimations de surface terrière totale, avec et sans coupe partielle, des modèles Artémis-2009 et Artémis 2014 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. [\[https://mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Power-Hugues/Note143.pdf\]](https://mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Power-Hugues/Note143.pdf)
- R Core Team, 2019. *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria. URL. [\[https://www.R-project.org/\]](https://www.R-project.org/)
- Yang, J., J.H. Pedlar, D.W. McKenney, A. Weersink, 2015. *The development of universal response functions to facilitate climate-smart regeneration of black spruce and white pine in Ontario, Canada*. For. Ecol. Manag. 339: 34-43. [\[https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.12.001\]](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.12.001)

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

Service de la sylviculture et du rendement des forêts

Isabelle Auger, stat. ASSQ, M. Sc.

Service du soutien scientifique

**Annexe 1.** Correspondance entre les groupes d'essences du modèle Artémis et les essences du modèle de D'Orangeville *et al.* (2018). Voir Fortin et Langevin (2010) pour la définition des sigles.

| Modèle  |               |
|---------|---------------|
| Artémis | D'Orangeville |
| AUT     | BOP           |
| BOG     | BOP           |
| BOJ     | BOP           |
| BOP     | BOP           |
| CET     | BOP           |
| CHX     | BOP           |
| ERP     | BOP           |
| ERR     | BOP           |
| ERS     | BOP           |
| FOR     | SAB           |
| FEU     | BOP           |
| FRA     | BOP           |
| FRN     | BOP           |
| F_0     | BOP           |
| F_1     | BOP           |
| HEG     | BOP           |
| MEL     | EPN           |
| OSV     | BOP           |
| PEU     | PET           |
| PIG     | PIG           |
| PIN     | PIG           |
| PRP     | BOP           |
| PRU     | SAB           |
| RES     | SAB           |
| SAB     | SAB           |
| SAL     | BOP           |
| SOA     | BOP           |
| THO     | SAB           |
| TIL     | BOP           |

**Annexe 2.** Proportion représentée par l'épinette blanche dans le groupe d'essences EPX dans les différentes végétations potentielles associées aux placettes du territoire d'étude.

| Code de végétation potentielle | Proportion d'épinette blanche |
|--------------------------------|-------------------------------|
| FC1                            | 1                             |
| FE1                            | 1                             |
| FE2                            | 1                             |
| FE3                            | 1                             |
| FE4                            | 1                             |
| FE5                            | 1                             |
| FE6                            | 1                             |
| FO1                            | 1                             |
| MF1                            | 1                             |
| MJ1                            | 1                             |
| MJ2                            | 0,84                          |
| MS1                            | 0,55                          |
| MS2                            | 0,40                          |
| MS6                            | 0,25                          |
| RB1                            | 1                             |
| RC3                            | 0,19                          |
| RE1                            | 0                             |
| RE2                            | 0                             |
| RE3                            | 0                             |
| RS1                            | 0,19                          |
| RS2                            | 0,02                          |
| RS3                            | 0,04                          |
| RS5                            | 0,01                          |
| RT1                            | 0,55                          |