

**Guide d'utilisation du simulateur de croissance forestière
Artémis-2014 sur Capsis
(Version préliminaire 3.1)**

par

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

**Gouvernement du Québec
Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs
Direction de la recherche forestière
Janvier 2015**

Résumé

Artémis est un modèle de croissance forestière fonctionnant à l'échelle de l'arbre paramétré pour les forêts du Québec. Artémis prévoit entre autres l'accroissement diamétral, le risque de mortalité, ainsi que le recrutement de nouveaux arbres. Artémis est intégré à la plateforme Capsis, élaborée par l'Institut National de Recherche en Agronomie de France et ses partenaires (<http://capsis.cirad.fr/capsis>). Ce logiciel générique permet d'implanter différents modèles sous une même application, d'effectuer plusieurs simulations dans une même session et de comparer plusieurs scénarios sylvicoles. Capsis permet aussi de visualiser les résultats de simulation et de les exporter sous forme de tableaux. Ce guide fournit les informations nécessaires à l'utilisation du modèle Artémis sur la plateforme Capsis. Il fournit des informations concernant les étapes à effectuer, de l'importation du fichier d'inventaire à l'exportation des simulations, et présente les différentes options et fonctionnalités disponibles.

Mots-clés : modèle de croissance, simulation, logiciel, forêt

Table des matières

Résumé.....	iii
Liste des tableaux.....	vii
Liste des figures	vii
Liste des annexes.....	vii
1. Description du modèle	1
2. Capsis	6
3. Initialisation du modèle	6
3.1 Données	6
3.2 Année de départ de la simulation	9
3.3 Fonctionnement du modèle en mode déterministe ou stochastique.....	9
3.4 Peuplements ou strates résiduels	10
3.5 Options de changements climatiques	10
4. Paramètres d'évolution	11
4.1 Horizon de simulation	11
4.2 Simulation des épidémies de tordeuse des bourgeons de l'épinette.....	12
4.3 Simulation de la maladie corticale du hêtre	13
5. Module de prélèvement	14
6. Évolution de la qualité.....	15
7. Sorties du modèle.....	15
8. Utilisation en mode « Script »	19
9. Biais	19
10. Peuplements en régénération	19
11. Références bibliographiques.....	21

Liste des tableaux

Tableau 1. Description des végétations potentielles supportées par Artémis-2014	3
Tableau 2. Description du fichier de données initiales	7
Tableau 3. Description des sorties d'Artémis	17

Liste des figures

Figure 1. Fonctionnement schématique d'Artémis sur une période de 10 ans.	2
Figure 2. Fonctionnement d'Artémis basé sur un procédé itératif pour les projections de plus de 10 ans.	2

Liste des annexes

Annexe 1. Regroupement d'espèces Artémis 2014	24
--	----

1. Description du modèle

Artémis est un modèle de croissance à l'échelle de l'arbre qui est indépendant des distances. Deux versions du modèle Artémis sont disponibles soit Artémis-2009 et Artémis-2014. Artémis-2009 est la version originale du modèle alors que la version 2014 consiste en une reparamétrisation du modèle de 2009 à la suite d'un ajout d'environ 6 000 mesures de placettes échantillons permanentes (sur 21 500). Les deux versions du modèle partagent la même structure, à l'exception de quelques nouvelles fonctionnalités qui ont été ajoutées à la version 2014.

Artémis est constitué de cinq modules dynamiques qui simulent la probabilité de mortalité, l'accroissement diamétral, la probabilité de recrutement, le nombre de recrues et le diamètre des recrues. Il comporte aussi quatre modules statiques, soit un module d'estimation de la hauteur des arbres, un module d'estimation du volume marchand brut des arbres, un module d'estimation du volume de billons ou de produits dans un arbre et un module de prélèvement. La figure 1 présente un schéma de l'ensemble des modules.

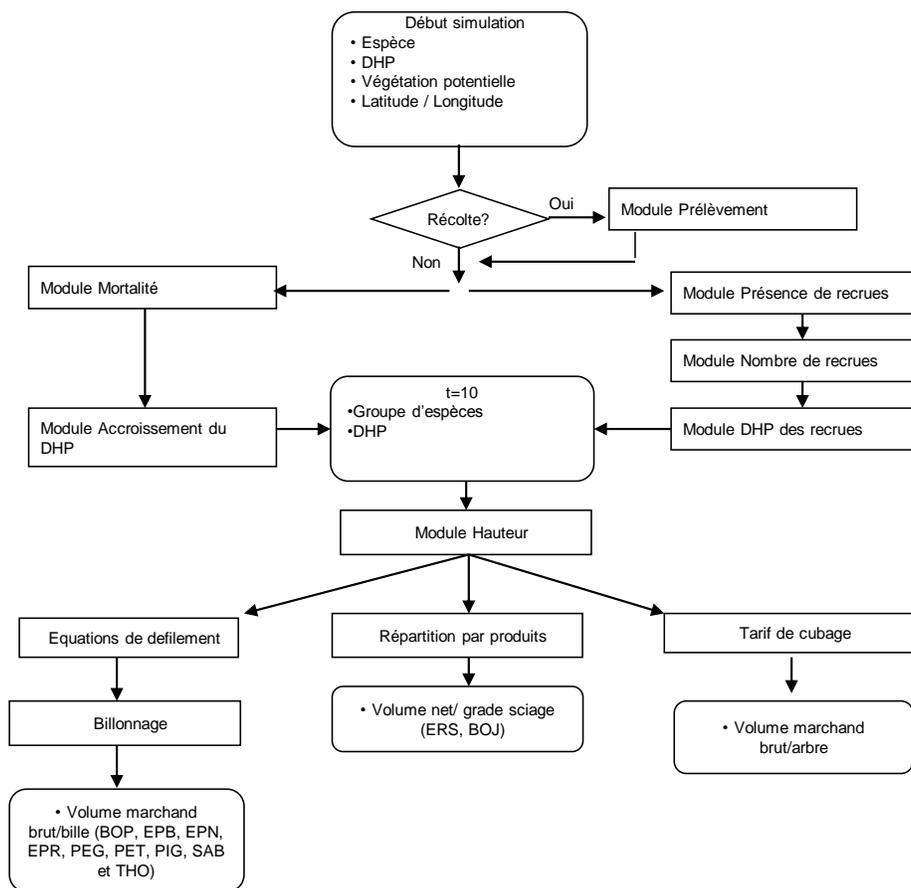


Figure 1. Fonctionnement schématique d'Artémis sur une période de 10 ans.

Le modèle simule individuellement la croissance des arbres d'une placette échantillon de 400 m² ainsi que leur probabilité de mortalité. Le recrutement de nouvelles tiges quant à lui est simulé sur la base du groupe d'espèces (Annexe 1). Le modèle, étant indépendant des distances, ne tient pas compte du positionnement de chacune des tiges à l'intérieur de la placette échantillon. Artémis utilise des variables dendrométriques, écologiques et climatiques afin de prédire l'évolution des arbres et des peuplements forestiers.

Le modèle Artémis fonctionne par pas de simulation. Ces pas ont une durée de 10 ans. Lors du premier pas, l'utilisateur doit fournir des données d'inventaire forestier. Le modèle fait évoluer ces données sur une période de 10 ans. Pour les étapes suivantes, le modèle utilise les résultats de l'étape de simulation précédente comme point de départ de la prochaine période de simulation (Figure 2).

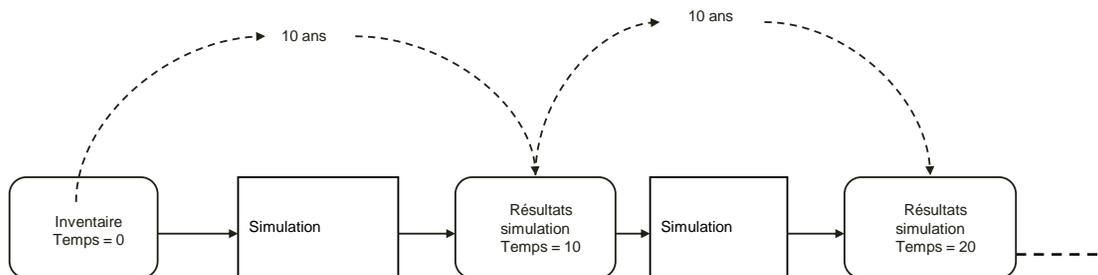


Figure 2. Fonctionnement d'Artémis basé sur un procédé itératif pour les projections de plus de 10 ans.

Le modèle de croissance Artémis est basé sur la végétation potentielle, une unité de classification écologique du territoire québécois (Grondin *et al.* 2013, Saucier *et al.* 1998). Artémis est paramétré pour 25 végétations potentielles parmi les plus fréquentes du territoire québécois (Tableau 1). Chacune de ces 25 végétations potentielles possède son propre groupe de paramètres. Les différences entre les végétations potentielles se situent tant au niveau des variables explicatives utilisées par le modèle qu'au niveau de la valeur des paramètres affectant ces variables explicatives. Cette caractéristique implique que 2 placettes échantillons possédant les mêmes caractéristiques dendrométriques et climatiques, mais étant situées sur des végétations potentielles différentes auront des résultats de simulation différents. Cet élément permet de prendre en compte la dynamique forestière propre à chacune des végétations potentielles.

Tableau 1. Description des végétations potentielles supportées par Artémis-2014

Végétation potentielle*	Groupes d'espèces*	Densité minimum (tiges/ha)*	Densité maximum (tiges/ha)*	Surface terrière minimum (m ² /ha)	Surface terrière maximum (m ² /ha)	Biais relatif (%) en surface terrière / groupe d'espèces**
FC1	CHX, ERR, FEU, RES	150	1350	4	37	NA
FE1	ERS, F0R, F_1, OSV	200	1200	7	29	NA
FE2	BOJ, BOP, CET, EPX, ERP, ERR, ERS, F0R, FRA, F_1, HEG, OSV, PEU, PRP, PRU, SAB, TIL	200	1250	7	39	ERS : 1,8 HEG : -3,8 ERR : -0,5
FE3	BOJ, BOP, CET, CHX, EPX, ERP, ERR, ERS, F0R, FRA, FRN F_1, HEG, OSV, PEU, PRP, PRU, SAB, THO, TIL	100	1300	8	38	ERS : 4,5 BOJ : 1,3 ERR : 3,6
FE4	AUT, ERS, HEG	100	1300	8	35	NA
FE5	ERR, ERS, F_0, F_1, HEG, OSV, RES, SAB	300	1350	8	39	ERS : 6,6 OSV : 1,7 HEG : -12,7
FE6	AUT, BOJ, BOP, CHX, EPX, ERR, ERS, HEG, OSV, PEU, PIN, SAB	350	1400	10	36	CHX : -5,4 ERS : 7,2 ERR : 10,6
FO1	F_0, F_1, RES	200	1300	1	38	NA
MF1	AUT, BOJ, BOP, EPX, ERR, FRN, PEU, SAB	200	1400	2	41	FRN : -1,2 SAB : -15,2 BOJ : 6,3
MJ1	BOG, BOJ, BOP, CHX, EPX, ERP, ERR, ERS, F0R, FRN, F_1, HEG, PEU, PIN, PRP, PRU, SAB, THO	150	1600	6	39	BOJ : 3,9 SAB : 2,7 ERR : 4,6
MJ2	BOJ, BOP, EPX, ERP, ERR, ERS, F0R, FRN, F_1, PEU, PIN, PRP, PRU, SAB, SOA, THO	150	1600	5	38	SAB : -14,0 BOJ : 6,9 BOP : 5,3
MS1	BOJ, BOP, EPX, ERP, ERR, ERS, F_0, F_1, PEU, PRP, RES, SAB, SOA, THO	100	2050	4	39	SAB : -11,2 BOP : 12,8 BOJ : 5,9

Tableau 1. (Suite)

Végétation potentielle*	Groupes d'espèces*	Densité minimum (tiges/ha)*	Densité maximum (tiges/ha)*	Surface terrière minimum (m ² /ha)	Surface terrière maximum (m ² /ha)	Biais relatif (%) en surface terrière / groupe d'espèces**
MS2	BOG, BOJ, BOP, EPX, ERR, FEU, PEU, PIG, PIN, PRP, RES, SAB, SAL, SOA, THO	50	2450	3	43	SAB : -12,1 BOP : 9,5 EPX : -4,9
MS6	BOP, EPX, ERR, FEU, PEU, PRP, RES, SAB	200	2100	1	41	SAB : -5,9 PEU : 6,2 BOP : 9,2
RB1	EPX, FEU, RES, SAB	150	1750	1	39	SAB : -10,2 EPX : -0,5
RC3	AUT, BOJ, BOP, EPX, ERR, FRN, PEU, SAB, THO	250	2350	3	52	THO : 3,5 EPX : 6,1 SAB : -3,5
RE1	AUT, EPX, MEL, PIG, SAB	50	1600	1	22	EPX : -2,4 PIG : 5,9 SAB : -1,9
RE2	AUT, BOP, EPX, ERR, MEL, PEU, PIG, PIN, SAB, SAL	150	2400	1	38	EPX : -2,2 PIG : 2,3 SAB : -3,9
RE3	BOP, EPX, FEU, MEL, PIG, RES, SAB	50	2050	1	33	EPX : 0,2 MEL : -0,2 SAB : 8,7
RP1	BOP, EPX, ERR, F_0, F_1, PEU, PIN, RES, SAB	250	1450	7	46	PIN : 5,0 PEU : 6,4 EPX : 0,5
RS1	BOJ, BOP, EPX, ERR, FRN, F_0 F_1 PEU, RES, SAB, THO	250	2100	6	48	SAB : -15,4 EPX : -6,0 THO : 6,1
RS2	AUT, BOP, EPX, ERR, MEL, PEU, PIG, PIN, PRP, SAB, SAL, THO	200	2200	4	39	EPX : -0,1 SAB : 1,5 BOP : 9,0

Tableau 1. (Suite et fin)

Végétation potentielle*	Groupes d'espèces*	Densité minimum (tiges/ha)*	Densité maximum (tiges/ha)*	Surface terrière minimum (m²/ha)	Surface terrière maximum (m²/ha)	Biais relatif (%) en surface terrière / groupe d'espèces**
RS3	AUT, BOP, EPX, ERR, MEL, SAB, SAL, THO	100	2000	1	36	EPX : -6,3 SAB : -8,3 BOP : 20,7
RS5	BOG, BOP, EPX, ERR, FEU, PEU, RES, SAB	350	2050	4	44	EPX : 1,0 SAB : -0,8 ERR : -9,8
RT1	BOJ, ERR, ERS, FEU, HEG, PRU, RES, SAB	350	1600	4	52	PRU : -3,5 ERR : 9,0 SAB : -18,0

* Les peuplements simulés avec Artémis devraient au départ de la simulation avoir une densité et une surface terrière, composées d'arbres de plus de 9,1 cm de DHP, situées à l'intérieur des limites présentées dans ce tableau.

** Les végétations potentielles pour lesquelles les biais ne sont pas rapportés comportaient moins de 30 placettes échantillons.

Artémis utilise dans plusieurs de ses modules le groupe d'espèces arborescentes comme variable explicative. Cette caractéristique entraîne des résultats de simulation différents selon le groupe d'espèces auquel appartient chacun des arbres simulés. Étant donné le relativement grand nombre d'espèces présent sur chacune des végétations potentielles du Québec et étant donné que certaines de ces espèces sont peu fréquentes, un regroupement a été fait pour chacune des végétations potentielles. Au terme de ce processus, les espèces arborescentes fréquentes sur une végétation potentielle se retrouvent généralement dans des groupes formés d'une seule espèce, tandis que les moins fréquentes se retrouvent dans des groupes comptant plusieurs espèces. Les détails concernant la méthode de regroupement des espèces du modèle Artémis peuvent être consultés dans la publication Fortin et Langevin (2010). La liste des groupements d'espèces par végétation potentielle pour la version 2014 de Artémis est présentée au tableau 1.

L'utilisateur qui désire connaître la liste des groupements d'espèces pour chacune des végétations potentielles pour la version 2009 de Artémis ou connaître de manière détaillée le fonctionnement du modèle Artémis peut se référer à la publication de Fortin et Langevin (2010).

2. Capsis

Artémis est implanté sur la plateforme CAPSIS. CAPSIS supporte plusieurs modèles dont la caractéristique commune est d'être des modèles simulant l'évolution d'arbres ou de peuplements forestiers. CAPSIS fournit un environnement convivial à l'utilisateur. Pour plus d'informations au sujet de la plateforme CAPSIS, l'utilisateur peut consulter l'adresse Web suivante : <http://capsis.cirad.fr/capsis/home>

3. Initialisation du modèle

3.1 Données

Afin de commencer une simulation à l'aide du modèle Artémis, l'utilisateur doit fournir une liste d'arbres enregistrée dans un fichier de données de départ. Ce fichier doit être sous format .csv ou .dbf. Il comprend différents champs dont certains sont obligatoires alors que d'autres sont facultatifs. Le tableau 2 présente la liste des champs du fichier de données utilisées par Artémis.

Tableau 2. Description du fichier de données initiales

Nom	Facultatif / Obligatoire	Type de champ	Description
Identifiant de strate	Facultatif	Texte	Identifiant unique pour un groupe de placettes (strate). Si un identifiant de strate est présent, le modèle fournira des résultats combinant les résultats de simulation de chacune des placettes d'une même strate.
Identifiant de placette	Obligatoire	Texte	Unité de base de regroupement des arbres.
Latitude	Obligatoire	Numérique	Latitude de la placette (degrés décimaux).
Longitude	Obligatoire	Numérique	Longitude de la placette (degrés décimaux).
Altitude	Obligatoire	Numérique	Altitude de la placette (m).
Région écologique	Obligatoire	Texte	Code de deux caractères identifiant la région écologique (ex. 5d). Ce code réfère à la région écologique telle que définie dans le Système hiérarchique de classification écologique du territoire du MFFP.
Type écologique	Obligatoire	Texte	Code composé de deux lettres et deux chiffres (ex. FE32) référant aux types écologiques définis dans le Système hiérarchique de classification écologique du territoire du MFFP.
Classe de drainage	Obligatoire	Texte	Classe de drainage composée d'un chiffre tel que défini dans la Norme de stratification forestière du MFFP.
Poids de la placette	Facultatif	Numérique	Facteur de pondération qui permet d'attribuer une importance différente à chacune des placettes regroupées au sein d'une même strate. Par défaut cette valeur est établie à un.
Précipitations annuelles moyennes en mm	Facultatif	Numérique	Valeur normale des précipitations annuelles moyennes (mm) pour la période 1981-2010. Si aucune valeur n'est présente dans le fichier de données, elle sera évaluée à l'aide du programme BioSIM (Régnière et St-Amand 2007) développé par le Service canadien des forêts.
Température annuelle moyenne en degrés Celsius	Facultatif	Numérique	Valeur normale de la température annuelle moyenne (°C) pour la période 1981-2010. Si aucune valeur n'est présente dans le fichier de données, elle sera évaluée à l'aide du programme BioSIM développé par le Service canadien des forêts.
Code de l'essence de l'arbre	Obligatoire	Texte	Code de trois lettres représentant l'essence de l'arbre, tel qu'utilisé par le MFFP (ex. ERS).
Code d'état de l'arbre	Obligatoire	Texte	Code constitué de deux chiffres distinguant les arbres vivants des autres dans les placettes échantillons. Le code d'état est celui utilisé par le MFFP.
Diamètre à hauteur de poitrine de l'arbre	Obligatoire	Numérique	Diamètre de l'arbre (cm) mesuré à 1,3 m de hauteur (DHP).

Tableau 2. (Suite et fin)

Nom	Facultatif / Obligatoire	Type de champ	Description
Fréquence de l'arbre	Obligatoire	Numérique	Nombre d'arbres représenté par chaque ligne du fichier de données. Plutôt que de créer plusieurs entrées dans le fichier pour des arbres de la même placette partageant la même espèce et le même diamètre, ceux-ci peuvent être regroupés à l'aide du champ fréquence.
Hauteur de l'arbre	Facultatif	Numérique	Hauteur de l'arbre (m). Si cette information est omise, Artémis l'estimera à l'aide d'une relation allométrique reliant le DHP à la hauteur.
Volume de l'arbre	Facultatif	Numérique	Volume marchand brut de l'arbre (m ³). Si cette information est omise, Artémis l'estimera à l'aide d'un tarif de cubage général reliant le DHP et la hauteur au volume marchand brut de l'arbre.
Classe de qualité de la tige	Facultatif	Texte	Valeur nominale de qualité (A, B, C ou D) attribuée aux espèces feuillues dont le DHP est supérieur à 23,0 cm. La définition des classes de qualité est celle du MFFP.
Priorité de récolte de l'arbre (MSCR)	Facultatif	Texte	Valeur nominale de la priorité de récolte (M, S, C ou R) attribuée à tous les arbres d'essence commerciale.
Peuplements ou strates résiduels	Facultatif	Numérique	Variable binaire qui identifie si le peuplement au moment du départ de la simulation a subi une coupe partielle dans les 10 années précédant le départ de la simulation (1 = peuplement ayant subi une coupe partielle, 0 = peuplement sans coupe partielle).
Temps moy. de la dernière tbe	Facultatif	Numérique	Temps moyens depuis la dernière série de quatre années consécutives de défoliation sévère attribuable à la tordeuse des bourgeons de l'épinette.

3.2 Année de départ de la simulation

L'utilisateur peut choisir l'année de départ de la simulation qu'il désire effectuer. Le premier pas de simulation sera associé à l'année de départ additionnée de 10 ans. Le choix de l'année de départ de la simulation peut avoir une certaine importance dans le cas de l'application de l'option de changements climatiques (voir section 3.5). Il n'affecte aucun autre module de Artémis.

3.3 Fonctionnement du modèle en mode déterministe ou stochastique

L'utilisateur peut choisir d'utiliser Artémis en mode déterministe ou en mode stochastique. Le mode déterministe utilise la valeur moyenne des paramètres de chacun des modules afin de réaliser les simulations. Le mode déterministe permet une simulation rapide, par contre, l'erreur associée aux prédictions ne peut être estimée. Le mode de fonctionnement stochastique permet quant à lui d'estimer l'erreur associée aux prédictions. Lors d'une simulation en mode stochastique, le modèle fait varier la valeur des paramètres aléatoirement selon leur distribution statistique. Afin d'obtenir une estimation fiable de l'erreur associée à la prédiction, le modèle doit procéder à plusieurs itérations. Lors de chacune des itérations, le modèle choisit une valeur pour chacun des paramètres de chacun des modules, cette valeur est différente à chacune des itérations. Il est recommandé d'effectuer 1 000 itérations afin d'obtenir une estimation fiable de l'erreur associée aux prédictions du modèle. Le calcul de l'erreur associée aux prédictions peut se faire à l'aide de la moyenne et l'écart type des prédictions de l'ensemble des itérations effectuées. Il est possible de calculer un intervalle de confiance pour la prédiction et pour la moyenne des prédictions à l'aide, respectivement, des équations 1 et 2. Il est également possible d'estimer l'intervalle de confiance sur la prédiction en ordonnant les résultats des simulations selon leur valeur prédite (ex. surface terrière). Dans le cas d'un intervalle de confiance incluant 95 % des prédictions, la borne inférieure de cet intervalle de confiance sera représentée par la prédiction localisée au 2,5^e percentile de la distribution des prédictions alors que la borne supérieure sera égale à la valeur localisée au 97,5^e percentile de la distribution des prédictions.

$$\text{Eq.1} \quad X_{pred} = \bar{X} \pm t_{\alpha/2} s$$

$$\text{Eq.2} \quad X_{moy} = \bar{X} \pm t_{\alpha/2} \frac{s}{\sqrt{n}}$$

où X_{pred} est soit la valeur supérieure, soit la valeur inférieure de l'intervalle de confiance associée à la prédiction, X_{moy} est soit la valeur supérieure, soit la valeur inférieure de l'intervalle de confiance associée à la moyenne des prédictions, \bar{X} est la moyenne des prédictions, $t_{\alpha/2}$ est la

valeur t de la loi de Student pour la probabilité α choisie, s est l'écart type des prédictions et n est la taille de l'échantillon (nombre d'itérations effectuées).

3.4 Peuplements ou strates résiduels

Le modèle Artémis permet de distinguer les peuplements qui ont subi des coupes partielles durant la période de 10 ans précédant le début de la simulation. En sélectionnant l'option « Peuplements ou strates résiduels », l'utilisateur indique que le peuplement ou la strate en question a subi une coupe partielle moins de 10 ans avant le début de la simulation. Artémis 2014 permet également d'identifier les peuplements ayant subi une coupe partielle dans les 10 années précédant le début de la simulation lors de lecture du fichier d'inventaire à l'aide du champ « Peuplements ou strates résiduels ». Lorsque cette option est sélectionnée, Artémis modifie, selon la végétation potentielle, l'estimation de la probabilité de mortalité, de l'accroissement diamétral ou du nombre de recrues. Si l'information est disponible, l'utilisateur devrait actionner l'option « Peuplements ou strates résiduels » lorsqu'il désire simuler des peuplements ayant subi des coupes partielles moins de 10 ans avant le début de la période de simulation.

3.5 Options de changements climatiques

Artémis permet de modifier la valeur des variables climatiques « Température annuelle moyenne » et « Précipitations annuelles moyennes » en fonction de 3 scénarios de changements climatiques, soit une augmentation de 2, 4 ou 6 °C au cours du 21^e siècle. Les scénarios offerts par Artémis se basent sur les prévisions du Groupe d'experts intergouvernemental sur les changements climatiques (2001). Selon les différents scénarios, la température annuelle moyenne utilisée par Artémis augmente linéairement à partir de l'année 2000 pour atteindre, selon le scénario choisi, 2, 4 ou 6 °C de plus que la température annuelle moyenne de la période 1971-2000 en 2100. Chacun de ces scénarios s'accompagne d'une augmentation des précipitations annuelles moyennes de respectivement 5, 10 ou 15 % par rapport à la période de référence 1971-2000. L'année de départ de la simulation influence donc les valeurs de température annuelle moyenne et de précipitation lorsque l'option changements climatiques est activée. Ainsi une simulation ayant pour point de départ l'année 2050 aura une température moyenne annuelle plus élevée de 1 °C et une quantité de précipitations annuelles de 2,5 % plus élevée qu'une simulation de la même placette débutant à l'année 2000 lorsque l'option d'augmentation de température de 2 °C au cours du 21^e siècle est sélectionnée.

L'impact des changements climatiques sur la croissance de la forêt est complexe et Artémis possède des fonctionnalités limitées afin de répondre à ces questions. Premièrement, il est à noter qu'Artémis n'est pas un modèle de croissance de type physiologique qui intègre des

relations de cause à effet entre la croissance et les conditions climatiques. Cette observation implique que d'autres éléments qui ont un impact sur la croissance ou la mortalité des arbres (par exemple le type de sol) peuvent être confondus avec l'effet des variables climatiques. De plus, le modèle ne tient pas compte de l'effet de l'augmentation de la concentration en CO₂ qui accompagne le réchauffement climatique. L'augmentation de la concentration en CO₂ peut également avoir un impact sur la croissance des arbres. Un autre point non négligeable réside dans le fait que les variables « température annuelle moyenne » et « précipitations annuelles moyennes » ne sont pas utilisées par tous les modules de toutes les végétations potentielles. Pour certaines végétations potentielles, aucun effet significatif de la température annuelle moyenne ou des précipitations annuelles moyennes n'a été détecté. L'application de l'option des changements climatiques sur ces végétations potentielles n'aura donc aucun effet, ce qui bien évidemment ne signifie pas que le changement de climat n'aura pas d'effets sur les arbres de ces végétations potentielles. Une autre limitation à l'utilisation d'Artémis pour simuler l'effet des changements climatiques est liée aux types de variables climatiques utilisées par Artémis. Les moyennes annuelles ne tiennent pas compte des événements climatiques extrêmes ou de variations ponctuelles dans le climat qui peuvent avoir un effet important sur la croissance et la mortalité des arbres (Girard *et al.* 2014).

L'ensemble de ces considérations fait que les prédictions de l'option de changements climatiques d'Artémis devraient être interprétées prudemment et validées à l'aide, par exemple, de simulations effectuées par d'autres modèles plus aptes à saisir le lien de cause à effet entre le climat et la croissance ou la mortalité des arbres ou, de connaissances tirées de travaux scientifiques sur la réaction des arbres et des peuplements forestiers aux changements climatiques.

4. Paramètres d'évolution

4.1 Horizon de simulation

Le modèle Artémis permet d'effectuer des simulations sur un horizon de temps allant jusqu'à 200 ans. Cependant, compte tenu de la disponibilité des données permettant sa validation, le modèle n'a pu être validé sur une période excédant 40 ans. Le comportement du modèle à long terme a été testé et ses prédictions sur un horizon de 100 ans sont cohérentes. Il n'est cependant pas possible d'affirmer qu'elles ne sont pas biaisées. Pour ces raisons, il n'est pas recommandé d'utiliser le modèle sur un horizon de simulation dépassant 60 ans.

4.2 Simulation des épidémies de tordeuse des bourgeons de l'épinette

Artémis permet de simuler l'effet d'une défoliation sévère attribuable à la tordeuse des bourgeons de l'épinette (tbe). Les observations de défoliation effectuées par la Direction de la protection des forêts (DPF) du ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs depuis 1968 ont été utilisées à cette fin. Les placettes échantillons permanentes (PEP) ayant subi pendant au moins quatre années consécutives une défoliation sévère due à la tbe ont été identifiées. Le seuil de quatre années consécutives de défoliation sévères a été établi en se basant sur l'étude de Pothier et Mailly (2006). Une variable binaire affectant les sapins et les épinettes indiquant que ce seuil est atteint ou se maintient entre deux mesurages d'une PEP a été créée afin de modifier les équations prédisant la probabilité de mortalité, l'accroissement diamétral et la probabilité de recrutement de ces deux espèces.

L'utilisateur qui désire simuler plus de 3 années consécutives de défoliation sévère due à la tbe doit cocher la case « Défoliation de la tordeuse des bourgeons de l'épinette » dans la boîte de dialogue « Paramètres d'évolution ». L'utilisateur doit à ce moment porter attention à la valeur inscrite dans la case « Nombre de décennies » de la boîte de dialogue. En effet, le modèle considérera que toutes les étapes de simulations prévues dans les paramètres d'évolution seront affectées par des défoliations sévères dues à la tbe. Conséquemment, si l'utilisateur désire simuler l'évolution d'un groupe de placettes sur un horizon de 50 ans pour lequel plus de 3 années consécutives de défoliation sévère surviennent entre la première et la 10^e année, il devra d'abord simuler l'évolution du groupe de placettes sur une période de 10 ans en activant la case « Défoliation de la tordeuse des bourgeons de l'épinette ». Ensuite, il utilisera les résultats de cette première étape pour simuler, sans activer la case « Défoliation de la tordeuse des bourgeons de l'épinette », le peuplement résiduel sur une période de 40 ans.

L'activation de la case « Défoliation de la tordeuse des bourgeons de l'épinette » entraîne des modifications du comportement du modèle tant pour la période de 10 ans au cours de laquelle la défoliation survient que pour la période de 10 ans suivant la défoliation. Ces modifications n'affectent directement que les arbres des groupes d'espèces sapins et épinettes.

Il est également possible que l'utilisateur du modèle ait à débiter une simulation avec des placettes ayant récemment subi une défoliation sévère due à la tbe. Les placettes situées dans des peuplements ayant subi une défoliation sévère sur une période de plus de 3 années consécutives et dont la période d'années consécutives avec défoliation sévère s'est terminée moins de 10 ans avant le début de la simulation devraient être traitées de manière particulière. Au moment de l'importation des données, le champ « Temps moyen depuis la dernière tbe » de Artémis 2014 permet d'indiquer au modèle la période écoulée depuis la fin des défoliations sévères. Si l'utilisateur entre dans ce champ une valeur inférieure à 10, le modèle ajustera la

simulation pour prendre en compte que le peuplement a récemment subi une série de 4 années ou plus de défoliations sévères.

Il est à noter que les effets de l'épidémie de tordeuse des bourgeons de l'épinette inclus dans Artémis se basent grandement sur l'épidémie ayant eu lieu dans les années 1970 et 1980. Si la dynamique des épidémies devait changer (changement d'hôtes, mortalité plus hâtive, défoliation plus ou moins intense à cause des changements climatiques, etc.) le modèle serait incapable de s'ajuster à cette nouvelle dynamique jusqu'à ce que de nouvelles données viennent permettre la simulation dans ces nouvelles conditions. Il est également à noter que les peuplements expérimentant des défoliations sévères d'une durée inférieure à quatre ans ou des défoliations légères ne sont pas traités différemment des peuplements non touchés par les épidémies de la tordeuse des bourgeons de l'épinette.

4.3 Simulation de la maladie corticale du hêtre

La maladie corticale du hêtre est une maladie d'origine européenne qui affecte le hêtre à grandes feuilles. Les premières apparitions de la maladie au Québec ont été rapportées dans la région du lac Témiscouata vers 1965 (Lachance 1982). Depuis, la maladie progresse vers l'ouest bien que les hivers froids du Québec limitent sa progression (Kasson et Livingston 2011). La maladie évolue en trois phases distinctes, soit la phase initiale (qui peut durer plusieurs années), la phase de mortalité et la phase de forêt résiduelle (McCullough *et al.* 2005).

Artémis-2014 est pourvu d'une fonction de simulation de la maladie corticale du hêtre. Cette fonction ajuste le taux de mortalité des hêtres afin qu'il corresponde au taux de mortalité de la moyenne des peuplements affectés par la maladie. La fonction de la maladie corticale a été paramétrée à l'aide de données recueillies dans les dispositifs expérimentaux de la DRF. Ces données ont été récoltées entre 1989 et 2013 dans 163 placettes réparties dans 32 secteurs localisés à travers l'aire de distribution du hêtre à grandes feuilles. Les mesures des placettes à l'intérieur desquelles au moins un arbre a montré des symptômes de maladie corticale du hêtre ont été identifiées. Lors du processus de modélisation, une variable catégorique a été attribuée à ces mesures ce qui a permis de paramétrer une fonction de mortalité qui tient compte de la présence de la maladie corticale du hêtre dans la placette au moment de la mesure.

Les résultats montrent une augmentation de la probabilité de mortalité du hêtre dans les peuplements affectés comparés aux arbres de mêmes dimensions localisés dans des peuplements non affectés. Cette augmentation est pratiquement nulle pour les hêtres de 10 cm de DHP et atteint plus de 71 % pour des hêtres de 60 cm de DHP. Cependant, compte tenu de la faible présence dans la base de données de peuplements de hêtres affectés par la maladie depuis plusieurs années, nous ne recommandons pas d'utiliser la fonction de maladie corticale

d'Artémis-2014 afin de prédire le comportement à long terme des peuplements de hêtres affectés par la maladie corticale. L'utilisation de cette fonction devrait être limitée à une période de simulation de 10 ans. Les prévisions à long terme devraient quant à elles se baser sur la littérature scientifique documentant l'effet de la maladie corticale du hêtre à long terme jusqu'à ce que des données permettant de documenter à long terme l'effet de la maladie puissent être utilisées afin de modifier le modèle.

5. Module de prélèvement

Artémis peut être utilisé avec le module « Coupes automatisées pour les forêts du Québec », un module de prélèvement qui permet de simuler les principaux types de coupes partielles pratiquées en forêt publique au Québec. Ce module est accessible via le menu « Étape/Intervention » de CAPSIS.

Le module de prélèvement calcule pour chacun des arbres de la placette la probabilité qu'il soit récolté. Cette probabilité est propre à chacun des traitements et varie en fonction du diamètre à hauteur de poitrine de l'arbre (DHP), de son espèce et de la densité du peuplement. Artémis utilise une régression logistique segmentée afin d'établir la probabilité qu'un arbre soit récolté (Fortin 2014). L'utilisation de la régression logistique segmentée permet d'avoir des trajectoires de courbes différentes à travers la distribution des DHP. Ainsi, le modèle prévoit une diminution de la probabilité de récolte avec l'augmentation du DHP pour les arbres de 10 à 23 cm (cette tendance observée pourrait être attribuée au bris de petites tiges par l'opération de récolte), puis une augmentation de la probabilité de récolte pour les arbres de plus de 23 cm. Lors de l'application du traitement, Artémis utilise l'équation 4 afin de calculer le nombre d'arbres résiduels.

$$\text{Eq.4} \quad N_{\text{residuel}} = N_{\text{initial}}(1 - P_{\text{récolte}})$$

où, pour les arbres d'une placette qui partagent la même espèce et le même DHP, N_{residuel} correspond au nombre d'arbres après intervention, N_{initial} correspond au nombre d'arbres initial et $P_{\text{récolte}}$ correspond à la probabilité de récolte estimée par le modèle.

Il est possible de moduler l'intensité de prélèvement de -80 % jusqu'à 160 %. La modulation permet d'augmenter ou de diminuer l'intensité de prélèvement. Le pourcentage de modulation du traitement s'applique à la probabilité de récolte ($P_{\text{récolte}}$) et conserve les critères de sélection des arbres.

Lorsque le module de coupe est utilisé, Artémis effectue le prélèvement au début de la période de simulation et identifie le peuplement comme étant un peuplement résiduel. Tout comme pour

la tordeuse des bourgeons de l'épinette, l'effet de la coupe partielle sur le comportement de la simulation peut s'étendre sur 2 périodes de simulation (20 ans).

6. Évolution de la qualité

Artémis-2014 permet de faire évoluer la classe de qualité des tiges d'essences feuillues de plus de 23 cm. La classe de qualité utilisée par Artémis, répartit les tiges d'essences feuillues commerciales de plus de 23 cm de DHP en 4 classes de qualité soit les classes A, B, C et D (MRN 2013). L'évolution de la qualité se fait sur la base de l'essence de l'arbre. Ainsi l'utilisateur devra fournir au modèle dans son fichier de données la classe de qualité des arbres feuillus de plus de 23 cm. Advenant le cas où l'utilisateur ne fournit pas de valeur de qualité, deux situations peuvent s'appliquer. Soit l'utilisateur fourni le code de priorité de récolte (MSCR, Boulet 2007) à ce moment, la classe de qualité sera estimée à partir du code de priorité de récolte de l'arbre. Si ni la qualité ou la priorité de récolte des arbres ne sont connues de l'utilisateur, le modèle procédera à la simulation sans utiliser ou faire évoluer la qualité.

Pour les arbres qui, au début de la simulation, avaient moins de 23,1 cm et qui atteignent cette dimension en cours d'évolution, une classe de qualité leur est attribuée par le modèle . Cependant, pour ce faire, l'essence initiale de l'arbre devra être connue. Si l'essence initiale de l'arbre n'est pas connue, ce qui est le cas lorsque l'arbre est une recrue qui appartient à un groupe d'espèces qui contient plusieurs essences (voir Annexe 1), la qualité de l'arbre ne sera pas prise en charge par Artémis-2014.

Lorsque la qualité d'un arbre est connue ou estimée, Artémis-2014 utilise cette variable afin d'effectuer la distribution des produits entre les différents grades de sciage de bouleau jaune et d'érable à sucre (voir section 7).

7. Sorties du modèle

Le modèle Artémis offre plusieurs options d'exportation des résultats. Les champs produits par les différentes sorties d'Artémis sont présentés au tableau 3. Les options d'exportation se distinguent d'abord par leur niveau d'intégration hiérarchique. Le niveau de base à partir duquel toutes les exportations sont créées est le niveau de l'arbre. Artémis effectuant ses simulations à l'échelle de l'arbre, l'exportation des résultats à cette échelle se fait directement à partir des résultats de la simulation. L'utilisateur peut choisir d'inclure, ou non, la classe de qualité des feuillus de plus de 23 cm dans la sortie à l'échelle de l'arbre.

Lors de la création des résultats d'exportation à l'échelle de la placette, le module d'exportation d'Artémis effectue soit la sommation (pour le nombre de tiges, la surface terrière et le volume à l'hectare) ou une moyenne (pour le diamètre quadratique et la hauteur dominante) des résultats

de simulation des arbres de la placette par groupe d'espèces ainsi que pour l'ensemble des groupes d'espèces. Dans le cas d'une exportation à l'échelle de la strate, la moyenne des peuplements, corrigée en fonction d'un facteur de pondération (optionnel), est utilisée. L'exportation à l'échelle de la strate peut être effectuée en deux formats soit le groupe d'espèces ordonné situé sur des lignes différentes ou soit le groupe d'espèces situé dans des colonnes différentes.

Les sorties à l'échelle du billon sont différentes puisqu'elles font appel à des modules de billonnage dans lesquelles plus d'une catégorie de produits peut être spécifiée. Ainsi, pour chaque arbre ou chaque placette (selon l'échelle choisie), une ligne par produit sera générée dans le fichier sortie. Afin de réaliser l'exportation à l'échelle du billon pour les espèces : BOP, EPB, EPN, EPR, PEG, PET, PIG, SAB et THO, Artémis utilise une équation de défilement propre à chacune de ces espèces (Schneider *et al.* 2013a,b) en combinaison avec des spécifications de billonnage.

Tableau 3. Description des sorties d'Artémis

Champ	Échelle*	Commentaires
ACCMort	S	Mortalité annuelle exprimée en surface terrière (m ² /ha/an). Cette valeur est seulement produite pour la somme de tous les groupes d'espèces.
ACCRrecr	S	Recrutement annuel en surface terrière (m ² /ha/an). Cette valeur est seulement produite pour la somme de tous les groupes d'espèces.
AACSurv	S	Accroissement annuel en surface terrière (m ² /ha/an) des arbres survivants. Cette valeur est seulement produite pour la somme de tous les groupes d'espèces.
Année	S, P, A, B, BP	Année de fin de la période de simulation.
ArbreID	A, B	Identifiant de l'arbre.
Bill_dm3	B, BP	Volume de la bille ou du produit (dm ³).
DHPcm	A, B	Diamètre à hauteur de poitrine (cm).
DMQ	S, P	Diamètre moyen quadratique en cm du groupe d'espèces pour une placette ou pour une strate donnée.
Espèce	A, B	Code d'espèce de l'arbre. Une valeur est attribuée à ce champ lorsque l'arbre est présent dans le fichier initial de données ou lorsque l'arbre est une recrue et dont le groupe d'espèces ne compte qu'une seule espèce.
Etat	P, A, B	Vivant ou mort.
Grade	B, BP	Grade de la bille ou du produit.
GrEspece	S, P, A, B, BP	Code de regroupement d'espèces, spécifique à chacune des végétations potentielles.
Hautm	A, B	Hauteur de l'arbre (m). Si une valeur est attribuée dans le fichier initial de données, cette valeur est rapportée pour l'année du début de la simulation, sinon la hauteur est estimée à l'aide d'une relation statistique.
HDom	S, P	Hauteur moyenne (m) des quatre plus gros arbres d'un groupe d'espèces pour une placette ou pour une strate donnée.
IterMC	P, A, B, BP	Numéro de l'itération de Monte-Carlo. Pour chacune des itérations, la sortie présente les résultats de la simulation. Lorsque le modèle est utilisé en mode déterministe, une valeur de 0 est attribuée à ce champ.
NbPlac	S	Nombre de placettes regroupées dans la strate.
nbTi_HA	S, P	Nombre de tiges à l'hectare du groupe d'espèces pour une placette ou pour une strate donnée.
Nombre	A, B	Nombre d'arbres associés à la ligne du fichier.
PlacetteID	P, A, B, BP	Identifiant de la placette.
Poids	P, A, B, BP	Facteur de pondération attribué à la placette, si celui-ci est présent dans le fichier de données.
Residuel	S, P, A, B, BP	Variable indicatrice qui prend la valeur de 1 lorsqu'une intervention (coupe) est effectuée lors de la période de simulation. Lorsqu'il n'y a pas d'intervention, sa valeur est de 0.
StrateID	S, P, A, B, BP	Identifiant de la strate. Lorsqu'il n'y a pas de valeurs attribuées à la strate, ce champ n'apparaît pas dans la sortie.
ST_HA	S, P	Surface terrière en m ² /ha du groupe d'espèces pour une placette ou pour une strate donnée.
ST_m2	A, B	Surface terrière de l'arbre (m ²). La valeur de la surface terrière n'est pas affectée par la valeur du champ « Nombre » mais seulement par la valeur du champ « DHP ».

Tableau 3. (Suite et fin)

Champ	Échelle*	Commentaires
Vol_dm3	A, B	Volume en dm ³ de l'arbre. Si une valeur est incluse dans le fichier initial, celle-ci est utilisée au début de la simulation et par la suite, les valeurs provenant du tarif de cubage de Fortin <i>et al.</i> 2007 seront corrigées à l'aide d'un facteur de correction. Le facteur de correction appliqué correspond au ratio entre le volume initial de la tige et celui prédit par le tarif de cubage de Fortin <i>et al.</i> 2007. Tout comme la surface terrière de l'arbre, cette valeur n'est pas affectée par le nombre d'arbres.
Vol_HA	S, P, BP	Volume en m ³ /ha du groupe d'espèces pour une placette ou pour une strate donnée.

*S = strate, P = placette, A = arbre, B = bille, BP = bille agrégé à l'échelle de la placette

Les spécifications de billonnage doivent d'abord mentionner, pour chacun des produits à considérer, la longueur des billes et leur diamètre minimal sous écorce au fin bout. L'utilisateur doit ensuite classer les produits en ordre de priorité. Artémis divise la tige en sections de 24,5 cm de longueur en débutant à la hauteur de souche (15 cm) et garde en mémoire le diamètre sous écorce au fin bout de chacune des sections. Le modèle vérifie d'abord, en débutant par le bas de la tige et à l'aide de la longueur et du diamètre minimum spécifié, si le produit de première priorité (classement de l'utilisateur) peut être créé. Si le diamètre de la section de 25 cm correspondant au fin bout du produit de première priorité est inférieur au diamètre minimum du produit en question, Artémis essaie de produire le produit de deuxième priorité et ainsi de suite jusqu'à ce que le diamètre de la tige ne permette plus de produire aucun produit. Le volume de chacune des sections est calculé à l'aide de l'équation de Smalian et le volume de chacun des produits est calculé en faisant la somme du volume de chacune des sections de 24,5 cm contenue dans le produit.

Le module de billonnage d'Artémis permet également de traiter les volumes des érables à sucre et des bouleaux jaunes de forte dimension (> 23 cm de DHP). Contrairement aux espèces résineuses et feuillues intolérantes dont la qualité du sciage n'est pas traitée, le module de billonnage de l'érable à sucre et du bouleau jaune distribue le volume à travers différentes classes de qualité de sciage. Si la qualité de l'arbre est connue, le modèle utilise une équation qui tient compte de la qualité de l'arbre pour distribuer le volume à travers les différentes classes de qualité de sciage. Si la qualité est inconnue, Artémis utilise alors une équation qui ne tient pas compte de la qualité afin de distribuer le volume de l'arbre à travers les différentes catégories de sciage. Pour plus de détails au sujet de la distribution du volume de ces deux espèces à travers une gamme de produits de différentes qualités, l'utilisateur peut se référer à la publication de Fortin *et al.* (2009b).

Il est à noter que la somme des volumes de chacune des billes et des produits de la sortie à l'échelle du billon ne correspond pas exactement à la valeur du volume à l'échelle de l'arbre rapportée dans la même sortie. Cette particularité est attribuable au fait que le volume de l'arbre en entier provient d'un tarif de cubage général (Fortin *et al.* 2007) alors que les volumes séparés par bille ou par produit ont des origines différentes (Schneider *et al.* 2013a,b pour les billes et Fortin *et al.* 2009b pour les produits).

8. Utilisation en mode « Script »

Artémis peut être utilisé en mode script afin de simuler, une à la suite de l'autre, l'évolution strates de placettes. Ce mode d'utilisation du modèle est particulièrement utile afin de faire des simulations de fichier comportant plusieurs strates avec un même scénario d'aménagement. Afin de réaliser une simulation en mode script, l'utilisateur doit d'abord préparer un scénario de simulation. Le scénario de simulation se prépare en réalisant d'abord une simulation à l'aide d'une placette sur l'horizon désiré et avec les interventions à réaliser. À cette étape, il n'est pas nécessaire de réaliser la simulation avec les mêmes données qui seront ensuite utilisées en mode script. Une fois le patron de simulation réalisé, l'utilisateur doit le sauvegarder en utilisant l'outil d'exportation et en choisissant le format d'exportation « Scénario ». Une fois le patron de simulation sauvegardé, l'utilisateur démarre un nouveau projet et lors de l'initialisation il choisit le bouton « Utiliser le mode script assisté ».

9. Biais

Le modèle Artémis produit, pour un horizon de temps variant de 20 à 40 ans selon la végétation potentielle, des prédictions de la surface terrière non biaisées pour le total des groupes d'espèces. Cependant, les prédictions à l'échelle du groupe d'espèces peuvent parfois être biaisées. Le tableau 1 montre les biais associés aux prédictions pour les 3 principaux groupes d'espèces de chacune des végétations potentielles d'Artémis-2014. En ce qui concerne Artémis-2009, l'utilisateur peut se référer à la publication de Fortin et Langevin 2010.

10. Peuplements en régénération

Artémis simule l'évolution d'arbres dont le diamètre à hauteur de poitrine (DHP, 1,3 m) est supérieur ou égal à 9,1 cm. Pour débiter la simulation, l'utilisateur doit fournir un fichier contenant une liste d'arbres dont le DHP est supérieur à 9 cm. Au minimum, un arbre est nécessaire afin d'effectuer une simulation. Par contre, nous recommandons d'effectuer des simulations sur des peuplements naturels ou des peuplements ayant subi des coupes partielles ou des perturbations légères ou moyennes dont la densité est comprise dans l'intervalle présenté au tableau 1. Dans les cas de peuplements ayant subi une coupe totale ou une perturbation

d'origine, nous recommandons que la perturbation ou la coupe ait eu lieu il y a plus de 20 ans et que la placette compte au moins 20 tiges marchandes (500 tiges/ha). Le modèle Artémis n'est pas adapté pour simuler les peuplements en régénération. Pour ce faire, l'utilisation d'un modèle de succession est suggérée. Le modèle Succès, qui fonctionne également sur la plateforme CAPSIS, est d'ailleurs distribué et supporté par la Direction de la recherche forestière. Les résultats du modèle Succès peuvent par la suite être utilisés par Artémis.

Un cas particulier concernant les peuplements en régénération est celui des peuplements ayant subi une éclaircie précommerciale (EPC). À la suite d'une comparaison entre des simulations à l'aide du modèle Artémis et des mesurages de peuplements ayant été traités par EPC, il a été remarqué que les peuplements traités en EPC se développaient de manière différente des peuplements de même densité, mais n'ayant pas fait l'objet d'EPC. En effet, le modèle avait tendance à surestimer la croissance des peuplements traités. L'utilisation d'Artémis afin de simuler la croissance de peuplements ayant récemment fait l'objet d'éclaircie précommerciale pourrait donc mener à une surestimation du rendement de ces peuplements. Conséquemment, nous ne recommandons pas l'utilisation d'Artémis afin de simuler l'évolution des peuplements traités par EPC.

11. Références bibliographiques

- Boulet, B., 2007. *Défauts et indices de la carie des arbres*. Les publications du Québec, 2^{ième} édition, 317 p.
- 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*. Forestry Chronicle 83: 754-765.
- Fortin, M., S. Bernier, J.P. Saucier et F. Labbé, 2009a. *Une relation hauteur-diamètre tenant compte de l'influence de la station et du climat pour 20 espèces commerciales du Québec*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Direction de la recherche forestière. Mémoire de recherche forestière n° 153. 22 p.
- Fortin, M., F. Guillemette et S. Bédard, 2009b. *Predicting volumes by log grades in standing sugar maple and yellow birch trees in southern Québec, Canada*. Can. J. For. Res. 39: 1928-1938.
- Fortin, M., 2014. *Using a segmented logistic model to predict trees to be harvested in forest growth forecast*. For. Syst. 23: 139-152.
- 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.
- Girard, F., M. Beaudet, D. Mailly et C. Messier, 2014. *Integrating climatic response in competition dependent tree-level growth models for northern hardwoods*. For. Ecol. Manag. 323: 138-147.
- Grondin, P., J. Gosselin, J.-P. Saucier et C. Morneau, 2013. « *Chapitre 4 – La dynamique des peuplements et les végétations potentielles* ». Dans : Ministère des Ressources naturelles (éd.). *Le guide sylvicole du Québec, Tome 1 – Les fondements biologiques de la sylviculture*, ouvrage collectif sous la supervision de B. Boulet et M. Huot. Les Publications du Québec. Québec, QC. p. 294-393.
- Groupe d'expert intergouvernemental sur les changements climatiques, 2001. *Bilan 2001 des changements climatiques : Conséquences, adaptations et vulnérabilité*. Contribution du groupe de travail II au troisième rapport d'évaluation du GIEC.

- Kasson, M.T. et W.H. Livingston, 2011. *Relationships among beech bark disease, climate, radial growth response and mortality of American beech in northern Maine, USA*. Forest Pathology 42: 199-212.
- Lachance, D., 1982. *Status of beech bark disease in province of Québec*. Dans : *I.U.F.R.O. beech bark party conference*. Hamden, Ct. pp. 18-20.
- MRN [Ministère des Ressources naturelles], 2013. *Classification des tiges d'essences feuillues; normes techniques*. 98 p.
- McCullough, D.G., R.L. Heyd et J.G. O'Brian, 2005. *Biology and management of beech bark disease, Michigan's newest exotic forest pest*. Extension bulletin E-2746. Michigan State University. 12 p.
- Pothier, D. et D. Mailly, 2006. *Stand-level prediction of balsam fir mortality in relation to spruce budworm defoliation*. Can. J. For. Res. 36: 1631-1640.
- Régnière, J. et R. St-Amant, 2007. *Stochastic simulation of daily air temperature and precipitation from monthly normals in North America north of Mexico*. International Journal of Biometeorology. 51: 415-430.
- Saucier, J.P., J.F. Bergeron, P. Grondin et A. Robitaille, 1998. *Les régions écologiques du Québec méridional : un élément du système hiérarchique de classification écologique du territoire mis au point par le ministère des Ressources naturelles*. L'Aubelle: février-mars. 8 p.
- Schneider, R., M. Fortin et J.P. Saucier, 2013a. *Équation de défilement en forêt naturelle pour les principales essences commerciales du Québec*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles, Direction de la recherche forestière. Mémoire de recherche forestière n° 167. 34 p.
- Schneider, R., M. Fortin et J.P. Saucier, 2013b. *Équation de défilement pour le pin gris en peuplement naturel au Québec*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles, Direction de la recherche forestière. Note de recherche forestière n° 139. 6 p.

Annexe 1. Regroupement d'espèces Artémis 2014

Végétations potentielles à dominance feuillus

Espèce	Code Espèce	Groupes d'espèces par végétation potentielle*							
		FC1	FE1	FE2	FE3	FE4	FE5	FE6	FO1
Bouleau gris	BOG	FEU	F_1	F_1	F_1	AUT	F_1	AUT	F_1
Bouleau jaune	BOJ	FEU	F0R	BOJ	BOJ	AUT	F_0	BOJ	F_0
Bouleau à papier	BOP	FEU	F_1	BOP	BOP	AUT	F_1	BOP	F_1
Caryer cordiforme	CAC	FEU	F_1	F_1	F_1	AUT	F_1	AUT	F_1
Caryer à fruits doux	CAF	FEU	F0R	F0R	F0R	AUT	F_0	AUT	F_0
Charme de Caroline	CAR	FEU	F0R	F0R	F0R	AUT	F_0	AUT	F_0
Micocoulier occidental	CEO	FEU	F0R	F0R	F0R	AUT	F_0	AUT	F_0
Cerisier tardif	CET	FEU	F_1	CET	CET	AUT	F_1	AUT	F_1
Chênes (sp.)	CHX	CHX	F_1	F_1	CHX	AUT	F_1	CHX	F_1
Aubépines (sp.)	CRA	FEU	F0R	F0R	F0R	AUT	F_0	AUT	F_0
Épinettes (sp.)	EPX	RES	F0R	EPX	EPX	AUT	RES	EPX	RES
Érable argenté	ERA	FEU	F_1	F_1	F_1	AUT	F_1	AUT	F_1
Érable noir	ERN	FEU	F0R	F0R	F0R	AUT	F_0	AUT	F_0
Érable de Pennsylvanie	ERP	FEU	F0R	ERP	ERP	AUT	F_0	AUT	F_0
Érable rouge	ERR	ERR	F0R	ERR	ERR	AUT	ERR	ERR	F_0
Érable à sucre	ERS	FEU	ERS	ERS	ERS	ERS	ERS	ERS	F_0
Frêne d'Amérique	FRA	FEU	F0R	FRA	FRA	AUT	F_0	AUT	F_0
Frêne noir	FRN	FEU	F0R	F0R	FRN	AUT	F_0	AUT	F_0
Frêne de Pennsylvanie	FRP	FEU	F0R	F0R	F0R	AUT	F_0	AUT	F_0
Hêtre à grandes feuilles	HEG	FEU	F0R	HEG	HEG	HEG	HEG	HEG	F_0

Annexe 1. (Suite)

Végétations potentielles à dominance feuillus (suite)

Espèce	Code Espèce	Groupes d'espèces par végétation potentielle*							
		FC1	FE1	FE2	FE3	FE4	FE5	FE6	FO1
Genévrier de virginie	JUV	RES	F0R	F0R	F0R	AUT	F_0	AUT	F_0
Pommiers (sp.)	MAS	FEU	F0R	F0R	F0R	AUT	F_0	AUT	F_0
Mélèze japonais	MEJ	RES	F0R	F0R	F0R	AUT	RES	AUT	RES
Mélèze laricin	MEL	RES	F0R	F0R	F0R	AUT	RES	AUT	RES
Mélèze européen	MEU	RES	F0R	F0R	F0R	AUT	RES	AUT	RES
Noyer cendré	NOC	FEU	F_1	F_1	F_1	AUT	F_1	AUT	F_1
Orme d'Amérique	ORA	FEU	F0R	F0R	F0R	AUT	F_0	AUT	F_0
Orme rouge	ORR	FEU	F0R	F0R	F0R	AUT	F_0	AUT	F_0
Orme de Thomas	ORT	FEU	F0R	F0R	F0R	AUT	F_0	AUT	F_0
Ostryer de Virginie	OSV	FEU	OSV	OSV	OSV	AUT	OSV	OSV	F_0
Peupliers (sp.)	PEU	FEU	F_1	PEU	PEU	AUT	F_1	PEU	F_1
Pin rigide	PID	RES	F0R	F0R	F0R	AUT	RES	AUT	RES
Pin gris	PIG	RES	F0R	F0R	F0R	AUT	RES	AUT	RES
Pins (rouge et blanc)	PIN	RES	F0R	F0R	F0R	AUT	RES	PIN	RES
Pin sylvestre	PIS	RES	F0R	F0R	F0R	AUT	RES	AUT	RES
Cerisier de Pennsylvanie	PRP	FEU	F_1	PRP	PRP	AUT	F_1	AUT	F_1
Pruche	PRU	RES	F0R	PRU	PRU	AUT	RES	AUT	RES
Sapin beaumier	SAB	RES	F0R	SAB	SAB	AUT	SAB	SAB	RES
Saules (sp.)	SAL	FEU	F_1	F_1	F_1	AUT	F_1	AUT	F_1
Sorbier d'Amérique	SOA	FEU	F0R	F0R	F0R	AUT	F_0	AUT	F_0
Sorbier des montagnes	SOD	FEU	F0R	F0R	F0R	AUT	F_0	AUT	F_0
Thuya occidental	THO	RES	F0R	F0R	THO	AUT	RES	AUT	RES
Tilleul d'Amérique	TIL	FEU	F0R	TIL	TIL	AUT	F_0	AUT	F_0

* La liste des groupes d'espèces de chacune des végétations potentielles est présentée au tableau 1

Annexe 1. (Suite)

Végétations potentielles à dominance mixte

Espèce	Code Espèce	Groupes d'espèces par végétation potentielle*					
		MF1	MJ1	MJ2	MS1	MS2	MS6
Bouleau gris	BOG	AUT	BOG	F_1	F_1	BOG	FEU
Bouleau jaune	BOJ	BOJ	BOJ	BOJ	BOJ	BOJ	FEU
Bouleau à papier	BOP	BOP	BOP	BOP	BOP	BOP	BOP
Caryer cordiforme	CAC	AUT	F_1	F_1	F_1	FEU	FEU
Caryer à fruits doux	CAF	AUT	F0R	F0R	F_0	FEU	FEU
Charme de Caroline	CAR	AUT	F0R	F0R	F_0	FEU	FEU
Micocoulier occidental	CEO	AUT	F0R	F0R	F_0	FEU	FEU
Cerisier tardif	CET	AUT	F_1	F_1	F_1	FEU	FEU
Chênes (sp.)	CHX	AUT	CHX	F_1	F_1	FEU	FEU
Aubépines (sp.)	CRA	AUT	F0R	F0R	F_0	FEU	FEU
Épinettes (sp.)	EPX	EPX	EPX	EPX	EPX	EPX	EPX
Érable argenté	ERA	AUT	F_1	F_1	F_1	FEU	FEU
Érable noir	ERN	AUT	F0R	F0R	F_0	FEU	FEU
Érable de Pennsylvanie	ERP	AUT	ERP	ERP	ERP	FEU	FEU
Érable rouge	ERR	ERR	ERR	ERR	ERR	ERR	ERR
Érable à sucre	ERS	AUT	ERS	ERS	ERS	FEU	FEU
Frêne d'Amérique	FRA	AUT	F0R	F0R	F_0	FEU	FEU
Frêne noir	FRN	FRN	FRN	FRN	F_0	FEU	FEU
Frêne de Pennsylvanie	FRP	AUT	F0R	F0R	F_0	FEU	FEU
Hêtre à grandes feuilles	HEG	AUT	HEG	F0R	F_0	FEU	FEU

Annexe 1. (Suite)

Végétations potentielles à dominance mixte (suite)

Espèce	Code Espèce	Groupes d'espèces par végétation potentielle*					
		MF1	MJ1	MJ2	MS1	MS2	MS6
Genévrier de virginie	JUV	AUT	F0R	F0R	RES	RES	RES
Pommiers (sp.)	MAS	AUT	F0R	F0R	F_0	FEU	FEU
Mélèze japonais	MEJ	AUT	F0R	F0R	RES	RES	RES
Mélèze laricin	MEL	AUT	F0R	F0R	RES	RES	RES
Mélèze européen	MEU	AUT	F0R	F0R	RES	RES	RES
Noyer cendré	NOC	AUT	F_1	F_1	F_1	FEU	FEU
Orme d'Amérique	ORA	AUT	F0R	F0R	F_0	FEU	FEU
Orme rouge	ORR	AUT	F0R	F0R	F_0	FEU	FEU
Orme de Thomas	ORT	AUT	F0R	F0R	F_0	FEU	FEU
Ostryer de Virginie	OSV	AUT	F0R	F0R	F_0	FEU	FEU
Peupliers (sp.)	PEU	PEU	PEU	PEU	PEU	PEU	PEU
Pin rigide	PID	AUT	F0R	F0R	RES	RES	RES
Pin gris	PIG	AUT	F0R	F0R	RES	PIG	RES
Pins (rouge et blanc)	PIN	AUT	PIN	PIN	RES	PIN	RES
Pin sylvestre	PIS	AUT	F0R	F0R	RES	FEU	FEU
Cerisier de Pennsylvanie	PRP	AUT	PRP	PRP	PRP	PRP	PRP
Pruche	PRU	AUT	PRU	PRU	RES	RES	RES
Sapin baumier	SAB	SAB	SAB	SAB	SAB	SAB	SAB
Saules (sp.)	SAL	AUT	F_1	F_1	F_1	SAL	FEU
Sorbier d'Amérique	SOA	AUT	F0R	SOA	SOA	SOA	FEU
Sorbier des montagnes	SOD	AUT	F0R	F0R	F_0	FEU	FEU
Thuya occidental	THO	AUT	THO	THO	THO	THO	RES
Tilleul d'Amérique	TIL	AUT	F0R	F0R	F_0	FEU	FEU

* La liste des groupes d'espèces de chacune des végétations potentielles est présentée au Tableau 1

Annexe 1. (Suite)

Végétations potentielles à dominance de résineux

Espèce	Code Espèce	Groupes d'espèces par végétation potentielle*										
		RB1	RC3	RE1	RE2	RE3	RP1	RS1	RS2	RS3	RS5	RT1
Bouleau gris	BOG	FEU	AUT	AUT	AUT	FEU	F_1	F_1	AUT	AUT	BOG	FEU
Bouleau jaune	BOJ	FEU	BOJ	AUT	AUT	FEU	F_0	BOJ	AUT	AUT	FEU	BOJ
Bouleau à papier	BOP	FEU	BOP	AUT	BOP	FEU						
Caryer cordiforme	CAC	FEU	AUT	AUT	AUT	FEU	F_1	F_1	AUT	AUT	FEU	FEU
Caryer à fruits doux	CAF	FEU	AUT	AUT	AUT	FEU	F_0	F_0	AUT	AUT	FEU	FEU
Charme de Caroline	CAR	FEU	AUT	AUT	AUT	FEU	F_0	F_0	AUT	AUT	FEU	FEU
Micocoulier occidental	CEO	FEU	AUT	AUT	AUT	FEU	F_0	F_0	AUT	AUT	FEU	FEU
Cerisier tardif	CET	FEU	AUT	AUT	AUT	FEU	F_1	F_1	AUT	AUT	FEU	FEU
Chênes (sp.)	CHX	FEU	AUT	AUT	AUT	FEU	F_1	F_1	AUT	AUT	FEU	FEU
Aubépines (sp.)	CRA	FEU	AUT	AUT	AUT	FEU	F_0	F_0	AUT	AUT	FEU	FEU
Épinettes (sp.)	EPX	EPX	EPX	EPX	EPX	EPX	EPX	EPX	EPX	EPX	EPX	RES
Érable argenté	ERA	FEU	AUT	AUT	AUT	FEU	F_1	F_1	AUT	AUT	FEU	FEU
Érable noir	ERN	FEU	AUT	AUT	AUT	FEU	F_0	F_0	AUT	AUT	FEU	FEU
Érable de Pennsylvanie	ERP	FEU	AUT	AUT	AUT	FEU	F_0	F_0	AUT	AUT	FEU	FEU
Érable rouge	ERR	FEU	ERR	AUT	ERR	FEU	ERR	ERR	ERR	ERR	ERR	ERR
Érable à sucre	ERS	FEU	AUT	AUT	AUT	FEU	F_0	F_0	AUT	AUT	FEU	ERS
Frêne d'Amérique	FRA	FEU	AUT	AUT	AUT	FEU	F_0	F_0	AUT	AUT	FEU	FEU
Frêne noir	FRN	FEU	FRN	AUT	AUT	FEU	F_0	FRN	AUT	AUT	FEU	FEU
Frêne de Pennsylvanie	FRP	FEU	AUT	AUT	AUT	FEU	F_0	F_0	AUT	AUT	FEU	FEU

Annexe 1. (Suite)

Végétations potentielles à dominance de résineux (suite)

Espèce	Code Espèce	Groupes d'espèces par végétation potentielle*										
		RB1	RC3	RE1	RE2	RE3	RP1	RS1	RS2	RS3	RS5	RT1
Hêtre à grandes feuilles	HEG	FEU	AUT	AUT	AUT	FEU	F_0	F_0	AUT	AUT	FEU	HEG
Genévrier de Virginie	JUV	RES	AUT	AUT	AUT	RES	RES	RES	AUT	AUT	RES	RES
Pommiers (sp.)	MAS	FEU	AUT	AUT	AUT	FEU	F_0	F_0	AUT	AUT	FEU	FEU
Mélèze japonais	MEJ	RES	AUT	AUT	AUT	RES	RES	RES	AUT	AUT	RES	RES
Mélèze laricin	MEL	RES	AUT	MEL	MEL	MEL	RES	RES	MEL	MEL	RES	RES
Mélèze européen	MEU	RES	AUT	AUT	AUT	RES	RES	RES	AUT	AUT	RES	RES
Noyer cendré	NOC	FEU	AUT	AUT	AUT	FEU	F_1	F_1	AUT	AUT	FEU	FEU
Orme d'Amérique	ORA	FEU	AUT	AUT	AUT	FEU	F_0	F_0	AUT	AUT	FEU	FEU
Orme rouge	ORR	FEU	AUT	AUT	AUT	FEU	F_0	F_0	AUT	AUT	FEU	FEU
Orme de Thomas	ORT	FEU	AUT	AUT	AUT	FEU	F_0	F_0	AUT	AUT	FEU	FEU
Ostryer de Virginie	OSV	FEU	AUT	AUT	AUT	FEU	F_0	F_0	AUT	AUT	FEU	FEU
Peupliers (sp.)	PEU	FEU	PEU	AUT	PEU	FEU	PEU	PEU	PEU	AUT	PEU	FEU
Pin rigide	PID	RES	AUT	AUT	AUT	RES	RES	RES	AUT	AUT	RES	RES
Pin gris	PIG	RES	AUT	PIG	PIG	PIG	RES	RES	PIG	AUT	RES	RES
Pins (rouge et blanc)	PIN	RES	AUT	AUT	PIN	RES	PIN	PIN	PIN	AUT	RES	RES
Pin sylvestre	PIS	RES	AUT	AUT	AUT	RES	RES	RES	AUT	AUT	RES	RES
Cerisier de Pennsylvanie	PRP	FEU	AUT	AUT	AUT	FEU	F_1	F_1	PRP	AUT	FEU	FEU
Pruche	PRU	RES	AUT	AUT	AUT	RES	RES	RES	AUT	AUT	RES	PRU
Sapin baumier	SAB	SAB	SAB	SAB	SAB	SAB	SAB	SAB	SAB	SAB	SAB	SAB
Saules (sp.)	SAL	FEU	AUT	AUT	SAL	FEU	F_1	F_1	SAL	SAL	FEU	FEU

Annexe 1. (Suite et fin)

Végétations potentielles à dominance de résineux (suite)

Espèce	Code Espèce	Groupes d'espèces par végétation potentielle*										
		RB1	RC3	RE1	RE2	RE3	RP1	RS1	RS2	RS3	RS5	RT1
Sorbier d'Amérique	SOA	FEU	AUT	AUT	AUT	FEU	F_0	F_0	AUT	AUT	FEU	FEU
Sorbier des montagnes	SOD	FEU	AUT	AUT	AUT	FEU	F_0	F_0	AUT	AUT	FEU	FEU
Thuya occidental	THO	RES	THO	AUT	AUT	RES	RES	THO	THO	THO	RES	RES
Tilleul d'Amérique	TIL	FEU	AUT	AUT	AUT	FEU	F_0	F_0	AUT	AUT	FEU	FEU

* La liste des groupes d'espèces de chacune des végétations potentielles est présentée au Tableau 1