Ministère des Forêts,
de la Faune
et des Parcs
Québec
Direction de la recherche forestière

Avis technique
SSS-1

Titre :	**Évaluation de la prévision de la sénescence des peuplements d'épinette noire de la pessière à mousses simulés avec le modèle de croissance NATURA-2014**
Responsables :	Isabelle Auger, stat. ASSQ, M. Sc.
Collaborateurs :	Hugues Power, ing.f., *Ph. D*., Jean-Pierre Saucier, ing.f., Dr. Sc.
Date :	Février 2015

1- Contexte

Dans le calcul des possibilités forestières pour la période 2013-2018, le modèle de croissance forestière NATURA-2009 (Pothier et Auger 2011) a été utilisé pour simuler la croissance des placettes-échantillons formant un groupe de strates situées, entre autres, dans des pessières (Poulin 2013). Les courbes de simulation de croissance ont ensuite servi à calculer la courbe *actuelle d'évolution* du groupe de strates, qui est la moyenne des courbes de croissance (Poulin 2013). Pour l'épinette noire (EPN), après l'atteinte du volume marchand maximal, un plateau pouvait être fixé à 80 % du sommet pour pallier une trop forte diminution du volume prévu par le segment décroissant de la courbe *actuelle d'évolution* (Poulin 2013).

Pour le calcul des possibilités forestières de la période 2018-2023, le modèle de croissance NATURA-2014 (Auger *et al.* en préparation) est utilisé pour simuler la croissance des placettes-échantillons. Cette version du modèle comprend un nouvel étalonnage du modèle de 2009 à la suite de l'ajout des données du quatrième inventaire décennal des placettes-échantillons permanentes (PEP) de la Direction des inventaires forestiers. Les deux versions du modèle partagent la même structure.

Le comité Évolution du Bureau du forestier en chef nous a demandé un avis sur la pertinence d'imposer un plateau à la courbe d'évolution du volume marchand brut simulée avec NATURA-2014 dans les pessières du domaine bioclimatique de la pessière à mousses. Pour répondre à cette question, nous avons effectué 2 analyses. Dans un premier temps, nous avons calculé le biais obtenu sur une simulation à court terme des PEP situées dans des peuplements âgés de plus de 125 ans. Dans un deuxième temps, nous avons comparé le comportement simulé à long terme des placettes de tous âges avec le comportement réellement observé dans les PEP et les placettes-échantillons temporaires (PET) âgées de plus de 125 ans.

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

2700, rue Einstein, bureau C.1.325.1
Québec (Québec) G1P 3W8
Tél : 418 643-7994 poste 6650
Télécopieur : 418 643-2165
Courriel : isabelle.auger@mffp.gouv.qc.ca
http://www.mffp.gouv.qc.ca/forets/connaissances/recherche/index.jsp

2- Méthode

2.1. Données

Deux jeux de données ont été utilisés dans les analyses. Le premier contient les PEP situées dans le domaine bioclimatique de la pessière à mousses dans lesquelles l'âge moyen à 1 m des arbres-études dominants et codominants est de plus de 125 ans (âge au premier mesurage). Les placettes devaient être d'appellation résineuse au premier mesurage (avec une proportion d'au moins 75 % de la surface terrière marchande totale composée d'essences résineuses) et contenir plus de 50 % de la surface terrière marchande résineuse en épinette noire. Les placettes ont été divisées en 2 groupes, soit celles avec plus de 75 % en épinette noire (EPN 75 %) et celles contenant de 50 à 75 % d'épinette noire (EPN 50-75 %). Les caractéristiques dendrométriques des 497 PEP sélectionnées sont présentées au tableau 1.

Tableau 1. Caractéristiques dendrométriques au premier mesurage des placettes-échantillons permanentes retenues pour le calcul du biais à court terme

Sous-domaine bio-climatique	Type de peuplement	Végétation potentielle	n	Âge moyen (années)	Nombre de tiges marchandes (tiges/ha)	Surface terrière marchande (m^2/ha)	Volume marchand brut (m^3/ha)
6est	EPN 50-75 %	RS2	87	151 (126-214)	1173 (725-2025)	21,3 (10,9-35,1)	102 (38-207)
	EPN 75 %	RE1	22	161 (126-218)	635 (175-1350)	8,5 (3,6-16,7)	32 (14-65)
		RE2	131	152 (125-205)	909 (250-2100)	13,8 (2,2-42,6)	61 (5-251)
		RE3	29	157 (127-239)	547 (150-1550)	7,1 (1,3-29,7)	28 (3-162)
		RS2	76	151 (127-236)	1165 (325-2450)	19,5 (6,0-39,2)	90 (27-249)
6ouest	EPN 75 %	RE1	16	151 (127-198)	711 (325-1250)	9,9 (3,8-15,5)	42 (11-67)
		RE2	59	151 (125-209)	1070 (175-2300)	17,1 (1,8-45,0)	88 (6-295)
		RE3	77	161 (125-231)	855 (100-1950)	11,5 (0,8-43,9)	53 (2-319)

Le deuxième jeu de données contient le premier mesurage des PEP du domaine bioclimatique de la pessière à mousses, situées dans des peuplements résineux de tous âges constitués de plus de 50 % d'épinette noire (Tableau 2). Ces observations serviront de peuplement initial pour une simulation à long terme avec NATURA-2014. Le jeu de données contient aussi certaines PET (3^e et 4^e inventaire décennal, âge > 125 ans) et tous les mesurages des PEP âgées de plus de 125 ans au premier mesurage (Tableau 3). Ces données serviront à vérifier le comportement à long terme des simulations.

Tableau 2. Caractéristiques dendrométriques au premier mesurage des placettes-échantillons permanentes retenues pour les simulations à long terme de l'analyse comparative

Sous-domaine bio-climatique	Type de peuplement	Végétation potentielle	n	Âge moyen (années)	Nombre de tiges marchandes (tiges/ha)	Surface terrière marchande (m^2/ha)	Volume marchand brut (m^3/ha)
6est	EPN 50-75 %	RS2	201	121 (28-214)	1175 (225-2250)	20,5 (2,5-49,6)	97 (7-294)
	EPN 75 %	RE1	99	103 (31-218)	570 (100-1650)	7,8 (0,7-24,7)	30 (1-111)
		RE2	316	112 (27-205)	995 (100-2675)	15,1 (1,1-45,0)	68 (3-299)
		RE3	57	131 (69-239)	610 (150-2450)	8,6 (1,3-45,1)	37 (3-263)
		RS2	178	120 (30-236)	1213 (125-2900)	19,6 (2,6-41,0)	90 (10-270)
6ouest	EPN 75 %	RE1	62	95 (30-198)	648 (100-1625)	9,0 (0,8-21,2)	39 (2-110)
		RE2	302	95 (14-209)	1080 (125-3125)	17,2 (1,0-46,4)	89 (2-334)
		RE3	218	117 (30-231)	852 (100-2275)	12,3 (0,8-43,9)	60 (2-319)

Tableau 3. Caractéristiques dendrométriques mesurées dans les placettes-échantillons permanentes et temporaires retenues comme observations pour l'analyse comparative

Sous-domaine bio-climatique	Type de peuplement	Végétation potentielle	n	Âge moyen (années)	Nombre de tiges marchandes (tiges/ha)	Surface terrière marchande (m^2/ha)	Volume marchand brut (m^3/ha)
6est	EPN 50-75 %	RS2	803	159 (125-236)	1055 (325-2250)	20,6 (6,5-43,0)	103 (25-289)
	EPN 75 %	RE1	177	165 (125-241)	702 (175-2200)	9,7 (2,2-33,7)	38 (6-157)
		RE2	1104	163 (125-279)	983 (100-2550)	16,3 (0,9-56,0)	77 (2-506)
		RE3	224	167 (127-249)	689 (100-2075)	10,1 (0,9-47,1)	44 (2-314)
		RS2	755	161 (125-274)	1132 (275-3150)	20,7 (5,3-59,1)	102 (19-342)
6ouest	EPN 75 %	RE1	106	154 (125-254)	717 (100-1825)	10,1 (0,8-28,0)	44 (2-159)
		RE2	797	154 (125-229)	940 (125-2575)	16,0 (1,8-45,0)	84 (5-295)
		RE3	951	161 (125-243)	871 (100-2400)	12,3 (0,8-43,9)	58 (2-319)

2.2. Analyse

2.2.1. Biais à court terme

Nous avons calculé le biais à court terme selon l'approche de validation croisée présentée dans Pothier et Auger (2011). La croissance des placettes du premier jeu de données a été simulée avec NATURA-2014 sur l'horizon de temps propre à chaque placette, en respectant les intervalles de temps écoulés entre 2 mesurages. Les caractéristiques du premier mesurage ont été utilisées pour représenter le peuplement initial. Le biais est la différence moyenne entre le volume marchand brut observé de la placette et le volume prédit par le modèle. Il a été calculé séparément pour chaque sous-domaine bioclimatique (pessières à mousses de l'Est et de l'Ouest), type de peuplement (EPN 50-75 % et EPN 75 %), végétation potentielle et horizon de simulation. Le biais a été calculé pour les groupes d'au

moins 15 placettes. Nous avons aussi calculé la proportion des placettes pour lesquelles le volume prédit était inférieur au volume observé.

2.2.2. Comparaison à long terme

Dans le deuxième jeu de données, nous avons simulé l'évolution du volume marchand brut total des PEP de tous âges avec NATURA-2014 sur une période de 150 ans, à partir du premier mesurage de la placette. Seule la portion de la courbe simulée de plus de 125 ans a été retenue, et l'âge maximal simulé a été tronqué à l'âge maximal des observations. Ce sous-ensemble de données (SOURCE) est nommé « simulé » dans l'analyse. Les observations du volume marchand des PET et de tous les mesurages des PEP de plus de 125 ans ont été ajoutées au sous-ensemble précédent, dans un autre sous-ensemble de données nommé « observé ».

Un modèle statistique linéaire mixte (Équation 1) a été utilisé pour modéliser le volume marchand en fonction de l'âge et de la source de données :

$$vol_{ijk} = (\beta_0 + u_{0i}) + \beta_1 SOURCE_k + (\beta_2 + u_{1i}) \times (age_{ijk} - 125) + \beta_3 SOURCE_k \times (age_{ijk} - 125) + \varepsilon_{ijk} \quad [1a]$$

$$\mathbf{u}_i = \begin{bmatrix} u_{0i} \\ u_{1i} \end{bmatrix} \sim N(\mathbf{0}, \mathbf{G}_k) \quad [1b]$$

$$\varepsilon_{ijk} \sim N(0, \sigma^2) \quad [1c]$$

où

vol_{ijk} = volume marchand brut de la placette i de la source de donnée k au temps j (m^3/ha),

$SOURCE_k$ = source de données, k = observé ou simulé, $SOURCE_{observé} = 0$, $SOURCE_{simulé} = 1$,

age_{ijk} = âge moyen de la placette i de la source de données k au temps j,

$\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3$ = paramètres à estimer,

u_{0i}, u_{1i} = effets aléatoires de la placette i sur les paramètres β_0 et β_2 , respectivement,

ε_{ijk} = erreur résiduelle.

On présume que la distribution du vecteur des 2 effets aléatoires, $\mathbf{u}_i$, est normale multivariée de moyenne **0** et de variance-covariance $\mathbf{G}_k$, et que la distribution de l'erreur résiduelle est normale de moyenne 0 et de variance σ^2. La procédure MIXED du logiciel SAS (SAS Institute 2013) a été utilisée pour étalonner le modèle.

Dans ce modèle, appelé modèle à coefficients aléatoires, les coefficients spécifiques à une placette, décrivant la trajectoire de celle-ci dans le temps, peuvent varier aléatoirement (West *et al.* 2007). Nous avons testé statistiquement l'hypothèse $\beta_3 = 0$ pour vérifier si la trajectoire moyenne simulée après 125 ans était différente de la trajectoire moyenne observée. Le test de l'hypothèse $\beta_1 = 0$, quant à lui, a permis de vérifier si le volume simulé à 125 ans était différent du volume observé au même âge. Le seuil de significativité utilisé pour ces 2 tests était de 0,05. Cette approche ne tient pas compte de l'erreur de prédiction sur les volumes prédits par NATURA-2014, ni de l'erreur d'estimation du volume observé, qui est estimé avec un tarif de cubage.

3- Résultats et discussion

3.1. Biais à court terme

Le tableau 4 présente les biais obtenus sur la prévision de l'évolution du volume marchand brut des PEP de plus de 125 ans, dans tous les peuplements contenant plus de 50 % d'EPN dans le domaine de la pessière à mousses, sur un horizon maximal de 30 ans. Toutes les prévisions surestiment en moyenne les volumes observés, à l'exception du sous-domaine 6est, dans les peuplements d'EPN 50-75 %, sur la végétation potentielle RS2 après 1 pas de simulation (10 ans), où les prévisions sous-estiment en moyenne de 1 % les volumes observés. Les surestimations varient de 1 à 9 % après 1 pas de simulation (10 ans), de 8 à 22 % après 2 pas (20 ans) et de 18 à 21 % après 3 pas (30 ans). La proportion des placettes pour lesquelles le volume prédit est inférieur au volume observé varie de 13 à 52 %.

La simulation de l'évolution de peuplements âgés de plus de 125 ans sur un horizon de 30 ans permet d'évaluer le comportement à court terme du modèle NATURA-2014 dans des peuplements qui ont atteint ou qui approchent de leur sénescence. Les biais mesurés indiquent que NATURA-2014 ne sous-estime pas le volume marchand brut de ces peuplements, mais qu'au contraire, le volume prédit est plus élevé que le volume observé. Puisqu'en moyenne, le volume marchand observé dans ces peuplements diminue dans le temps, la surestimation indique que les prévisions ne diminuent pas assez. L'ajout d'un plateau à 80 % pour maintenir le volume prédit amplifierait cette surestimation.

Tableau 4. Biais obtenus sur la prévision de l'évolution du volume marchand brut des PEP de plus de 125 ans par sous-domaine bioclimatique, type de peuplement, végétation potentielle et horizon de simulation (la colonne « proportion » désigne la proportion des placettes dont le volume prédit < volume observé)

Sous-domaine bio-climatique	Type de peuplement	Végétation potentielle	Horizon de simulation	n	Âge moyen (années)	Volume observé (m^3/ha)	Biais (m^3/ha)	Biais relatif	Proportion
6est	EPN 50-75 %	RS2	10 ans	87	163	98,8	0,9	1 %	52 %
			20 ans	53	175	88,2	-6,9	-8 %	30 %
	EPN 75 %	RE1	10 ans	22	172	32,2	-1,7	-5 %	23 %
			20 ans	15	183	28,6	-5,3	-18 %	13 %
		RE2	10 ans	131	164	59,2	-2,3	-4 %	39 %
			20 ans	89	175	48,3	-5,8	-12 %	24 %
			30 ans	45	185	41,2	-8,5	-21 %	27 %
		RE3	10 ans	29	168	27,2	-0,4	-1 %	28 %
			20 ans	22	180	15,0	-3,4	-22 %	18 %
		RS2	10 ans	76	163	87,4	-2,7	-3 %	37 %
			20 ans	48	174	75,6	-8,9	-12 %	21 %
			30 ans	26	184	64,0	-11,7	-18 %	27 %
6ouest	EPN 75 %	RE1	10 ans	16	161	39,2	-3,7	-9 %	31 %
		RE2	10 ans	59	161	75,6	-4,7	-6 %	34 %
			20 ans	31	164	74,0	-10,8	-15 %	32 %
		RE3	10 ans	77	170	46,0	-2,7	-6 %	35 %
			20 ans	49	176	41,0	-5,0	-12 %	27 %

3.2. Comparaison à long terme

Le tableau 5 présente les coefficients estimés de l'équation [1a] ainsi que leur test statistique s'ils sont différents de 0. Le paramètre β_2 représente la pente de la trajectoire moyenne des volumes observés en fonction de l'âge. Dans les 8 groupes analysés, la valeur de ce paramètre est négatif, indiquant que le volume observé moyen décroît avec l'âge. Il n'est cependant pas statistiquement différent de 0 dans le sous-domaine 6est, dans les peuplements d'EPN 75 %, sur la végétation potentielle RE1, c'est-à-dire que la trajectoire moyenne de ce groupe est un plateau.

Le paramètre β_3 permet de tester si la trajectoire moyenne simulée en fonction de l'âge est différente de la trajectoire moyenne observée. Les tests indiquent qu'il n'y a pas de différences significatives entre les 2 trajectoires moyennes, à l'exception de celles du sous-domaine bioclimatique 6ouest, dans les peuplements d'EPN 75 %, sur les végétations potentielles RE2 et RE3. Dans ces 2 cas, la valeur positive

du coefficient β_3 indique que la pente de la trajectoire du volume simulé est moins forte que celle du volume observé.

Le paramètre β_1 permet de tester si le volume simulé moyen, à 125 ans, est différent du volume observé moyen au même âge. Pour 3 groupes sur 8, cette différence est statistiquement significative, et le volume simulé moyen à 125 ans est plus grand que le volume observé moyen.

Tableau 5. Coefficients et erreurs types du modèle représenté par l'équation [1a] (les paramètres statistiquement différents de 0 au seuil de significativité de 0,05 sont surlignés)

Sous-domaine bio-climatique	Type de peuplement	Végétation potentielle	Nom du paramètre	Valeur estimée du coefficient	Erreur type	Valeur de t	Valeur de P
6est	EPN 50-75 %	RS2	β_0	119,57	2,39		
			β_1	-11,82	3,91	-3,02	0,00
			β_2	-0,44	0,06	-7,06	0,00
			β_3	0,04	0,07	0,62	0,54
	EPN 75 %	RE1	β_0	41,78	2,53		
			β_1	2,10	3,33	0,63	0,53
			β_2	-0,01	0,06	-0,12	0,90
			β_3	-0,06	0,06	-0,94	0,35
		RE2	β_0	90,52	2,25		
			β_1	4,66	4,31	1,08	0,28
			β_2	-0,13	0,05	-2,70	0,01
			β_3	-0,11	0,05	-2,00	0,05
		RE3	β_0	57,55	4,01		
			β_1	-19,54	7,35	-2,66	0,01
			β_2	-0,09	0,03	-3,29	0,00
			β_3	0,02	0,06	0,31	0,75
		RS2	β_0	116,16	2,83		
			β_1	-2,44	5,46	-0,45	0,65
			β_2	-0,25	0,07	-3,64	0,00
			β_3	-0,08	0,08	-1,02	0,31

Sous-domaine bio-climatique	Type de peuplement	Végétation potentielle	Nom du paramètre	Valeur estimée du coefficient	Erreur type	Valeur de t	Valeur de P
6ouest	EPN 75 %	RE1	β_0	50,87	3,26		
			β_1	0,91	4,34	0,21	0,83
			β_2	-0,24	0,08	-2,92	0,00
			β_3	0,12	0,09	1,33	0,19
		RE2	β_0	105,83	2,91		
			β_1	-2,82	4,02	-0,70	0,48
			β_2	-0,76	0,09	-8,08	0,00
			β_3	0,26	0,10	2,63	0,01
		RE3	β_0	77,53	2,34		
			β_1	-16,20	3,88	-4,17	0,00
			β_2	-0,53	0,06	-8,97	0,00
			β_3	0,31	0,07	4,59	0,00

La simulation de l'évolution de peuplements de tous âges sur un horizon de 150 ans permet de reconstituer une courbe d'évolution moyenne, comme le décrit Poulin (2013). En ne conservant que le segment de plus de 125 ans des courbes et en les comparant aux données observées de peuplements âgés de plus de 125 ans, on peut évaluer le comportement à long terme de NATURA-2014, c'est-à-dire évaluer la portion de la courbe d'évolution simulée associée à la sénescence. La figure 1 présente les trajectoires moyennes des volumes simulés obtenues avec l'équation [1] et celles des volumes observés en fonction de l'âge, pour les groupes de placettes du sous-domaine bioclimatique 6est. La figure 2 présente les trajectoires moyennes pour le sous-domaine bioclimatique 6ouest. Un plateau à 80 % du volume maximal de la courbe simulée moyenne est ajouté à titre indicatif. Dans les 3 groupes de placettes du sous-domaine de la pessière à mousses de l'Ouest, l'imposition d'un plateau à 80 % du volume maximal aurait pour conséquence de surestimer le volume marchand à partir d'un certain âge. L'imposition d'un plateau aurait la même conséquence dans les peuplements de l'Est sur les végétations potentielles RS2 et RE2. Pour les végétations potentielles RE1 et RE3 de l'Est, l'imposition d'un plateau modifierait à peine la courbe, la pente de leur trajectoire étant déjà assez faible. Ces remarques ne sont cependant valables que pour un âge maximal de 230 à 275 ans.

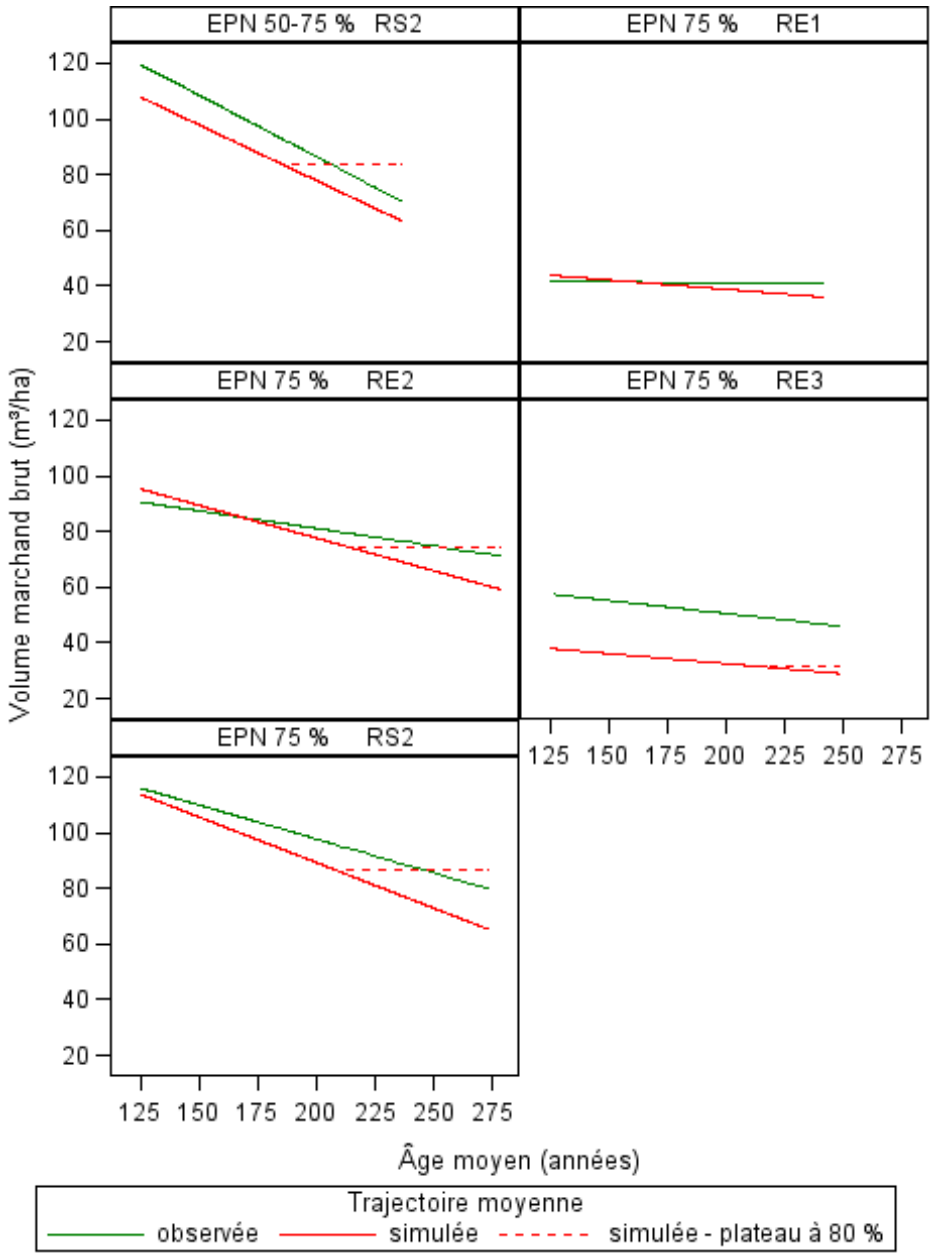

Figure 1. Trajectoires moyennes des volumes simulés et des volumes observés en fonction de l'âge, obtenues avec l'équation [1] pour le sous-domaine bioclimatique 6est, par type de peuplement et par végétation potentielle.

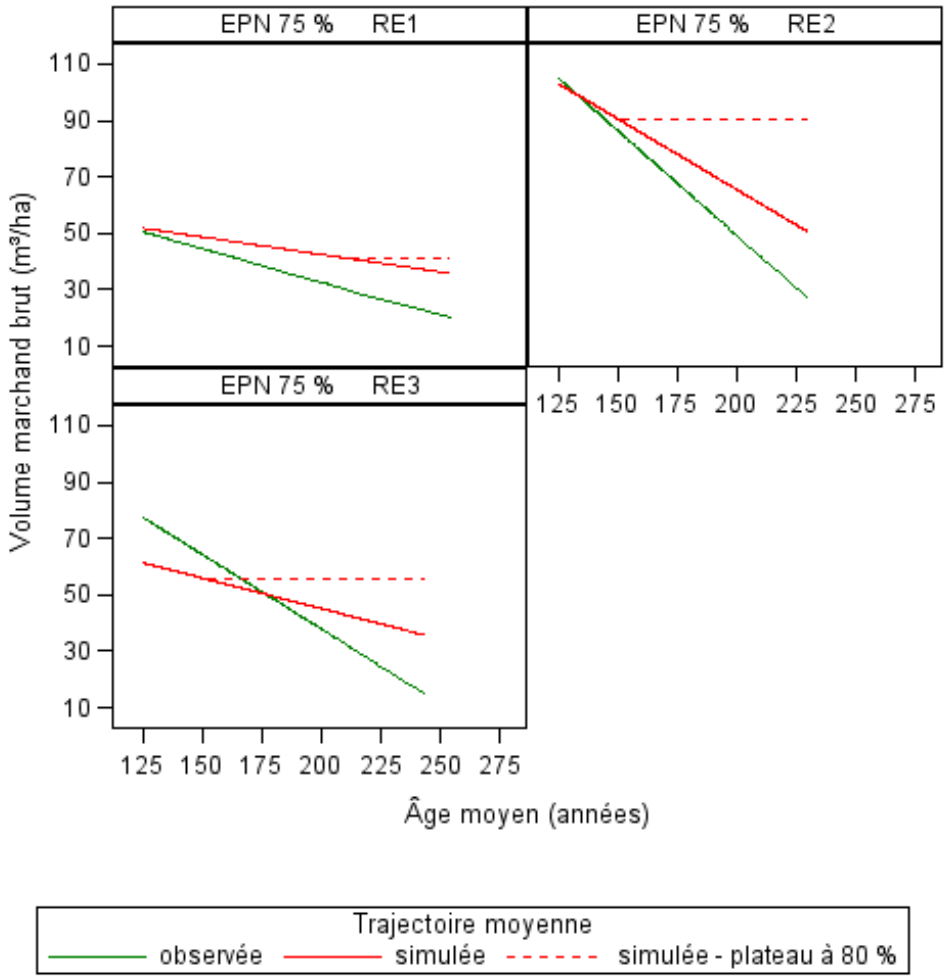

Figure 2. Trajectoires moyennes des volumes simulés et des volumes observés en fonction de l'âge, obtenues avec l'équation [1] pour le sous-domaine bioclimatique 6ouest, par type de peuplement et par végétation potentielle.

4- Recommandations

Nous sommes d'avis que le modèle NATURA-2014 reproduit fidèlement le comportement des pessières âgées et que, pas conséquent, l'imposition d'un plateau à 80 % du volume maximal n'est pas justifiée. Un tel plateau aura pour effet, dans une majorité de cas, de surestimer les volumes sur pied et de masquer leur diminution au fil du temps.

5- Références

Auger, I. *et al.*, en préparation. *NATURA-2014 : mise à jour du modèle de prévision de la croissance à l'échelle du peuplement pour les forêts du Québec*. Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de la recherche forestière. Mémoire de recherche forestière.

Poulin, J., 2013. *Évolution des strates. Fascicule 2.4*. Dans : Bureau du forestier en chef. *Manuel de détermination des possibilités forestières 2013-2018*. Gouvernement du Québec. Roberval, Qc. pp. 55-61. [http://forestierenchef.gouv.qc.ca/documents/calcul-des-possibilites-forestieres/2013-2018/manuel-de-determination-des-possibilites-forestieres/].

Pothier, D. et I. Auger, 2011. *NATURA-2009 : un modèle de prévision de la croissance à l'échelle du peuplement pour les forêts du Québec*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Direction de la recherche forestière. Mémoire de recherche forestière n^{o} 163, 56 p. [https://www.mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Auger-Isabelle/Memoire163.pdf].

SAS Institute Inc., 2013. *SAS/STAT® 13.1 User's Guide*. SAS Institute Inc. Cary, NC (États-Unis).

West, B.T., K.B. Welch et A.T. Galecki, 2007. *Linear mixed models, a practical guide using statistical software*. Chapman & Hall/CRC. Boca Raton, FL (États-Unis). 353 p.

Isabelle Auger, stat. ASSQ, M. Sc.

Équipe de Biométrie
Service du soutien scientifique