

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À CHICOUTIMI
DÉPARTEMENT DES SCIENCES FONDAMENTALES

ÉVALUATION DU BILAN CARBONE FORESTIER LIÉ AU TERRITOIRE MIS EN
EAU PAR HYDRO-QUÉBEC DANS LE BASSIN VERSANT DE LA RIVIÈRE
EASTMAIN

MÉMOIRE PRÉSENTÉ COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN RESSOURCES RENOUVELABLES

PAR
PIERRE-LUC DESSUREAULT

26 JUILLET 2012

REMERCIEMENTS

La réalisation de cette étude n'aurait pas été possible sans la collaboration d'Hydro-Québec, de la Chaire en Éco-conseil de l'UQAC et du CIRAIQ de l'Université de Montréal, qui, en s'engageant dans ce projet a permis de créer mon projet de maîtrise. Je tiens à remercier, particulièrement, Claude Villeneuve et Jean-François Boucher qui m'ont dirigé, soutenu et m'ont permis de voyager. Je remercie également Stephen Kull du Service Canadian des Forêts de m'avoir guidé durant mes plus que nombreuses heures de simulation et Simon Gaboury, Vincent Grégoire, Achille Benjamin-Laurent et Jean-Robert Wells qui m'ont permis de m'améliorer en remettant en question mes résultats. De plus, j'aimerais remercier Plani-Forêt inc. et DGR inc. pour la photo-interprétation et les tables de production ainsi que tous les chercheurs contactés sur les cycles de feux et la régénération. Il faut aussi remercier la Chaire de recherche et d'intervention en Éco-conseil de m'avoir fourni une bourse et du travail. Pour finir, j'aimerais remercier tous ceux qui m'ont écouté et soutenu dans mes excès de joie et de colère pendant mes longues heures de cartographie et de simulation.

ABSTRACT

Most scientists suggest that hydropower is the energy that emits less greenhouse gas emissions per kWh in its life cycle. Moreover, this trend is confirmed by the majority of authors in boreal zone. The establishment of a reservoir is considered as a change in land use that contributes to the loss of carbon sink. The purpose of this study is to assess the loss of carbon sink caused by the flooding of the forest in the Eastmain-1 reservoir as to provide specific information related to the carbon footprint of electricity generation in Quebec hydropower electricity generation. To do so, forest growth and fire disturbance were simulated for 100 years using CBM-CFS3 according to IPCC guidelines on land use change. Results suggest that there will be a loss of carbon sink of approximately $300\,000 \pm 100\,000$ Mg or 4 ± 2 g CO₂ eq kWh⁻¹. A wild fire sensitivity analysis performed on that territory demonstrate that this ecosystem will act as a carbon sink but only if less than 75% of the territory is burned over 100 a years period.

RÉSUMÉ

La plupart des travaux scientifiques suggèrent que l'hydroélectricité est l'énergie la plus propre en termes d'émissions de gaz à effet de serre. Cette hypothèse est confirmée dans la majorité des études effectuées en zone boréale. Les émissions attribuables au cycle de vie des projets sont en partie dues à la mise en place d'un réservoir, ce qui est considéré comme un changement d'affectation des terres contribuant à la perte de puits de carbone. Le but de cette étude est d'évaluer la perte de puits de carbone causée par la création du réservoir hydroélectrique de la centrale Eastmain-1 dans le secteur de la Baie-James, Québec, Canada et sa contribution à l'empreinte carbonique du kWh produit. Pour réaliser cette évaluation, la croissance des forêts et les perturbations par le feu ont été simulées sur 100 années avec l'aide du logiciel MBC-SCF3 qui est conforme aux guides de bonne pratique du GIEC sur le changement d'affectation des territoires forestiers. Les résultats obtenus suggèrent qu'il y aura une perte de puits de carbone de l'ordre de $300\,000 \pm 100\,000$ Mg, soit 4 ± 2 g d'éq. $\text{CO}_2 \text{ kWh}^{-1}$. Un test de sensibilité sur les cycles de feu a aussi été réalisé et permet de conclure que le territoire couvert par cette étude peut être considéré comme un puits de carbone, mais seulement si, au bout de 100 ans, moins de 75 % du territoire est brûlé. Autrement le bilan carbone du territoire couvert dans ce projet serait négatif.

Table des matières

Remerciements.....	ii
Abstract.....	iii
Résumé.....	iv
Préambule	2
1 Introduction.....	3
1.1 Contexte de l'étude	3
2 Matériel et méthode	2
2.1 Localisation géographique et description du territoire.....	2
2.2 Inventaire forestier	3
2.3 Simulation initiale dans MBC-SCF3	4
2.4 Analyses de sensibilité	5
2.4.1 Variation des tables de rendement +20 % - 20 %.....	5
2.4.2 Variation du cycle de feux	5
2.4.3 Variation dans la régénération des peuplements.....	6
2.5 Calculs.....	7
2.5.1 Convertir les quantités de carbone en quantité d'équivalent CO ₂	7
2.5.2 Calculer la perte de puits de carbone par unité électrique	8
3 Résultats.....	10
3.1 Simulation du cycle de feu.....	10
3.2 Évolution des stocks de carbone	10
3.3 Tests de sensibilité	15
3.3.1 Variation des tables de rendement.....	15

3.3.2	Variation des cycles de feu	16
3.3.3	Variation des règles de régénération.....	17
3.4	Puits de carbone par unité électrique	18
4	Discussion.....	20
4.1	Stocks de carbone à l'année 0	20
4.2	Les flux de carbone	20
4.3	Tests de sensibilité	21
4.4	Inventaire et tables de production	23
4.5	Perte de puits de carbone par unité de production électrique.....	24
5	Conclusion	27
6	Références.....	30

Liste des annexes

ANNEXE 1 : Empreinte carbonique de différentes centrales électriques	2
ANNEXE 2 : Composition végétale	2
ANNEXE 3 : Présentation de MBC-SCF3	2

Liste des figures

Figure 1 : Réseau hydrographique du Québec	3
Figure 2 : Localisation du site étudié (source : Hydro-Québec).....	2
Figure 3 : Proportion de forêts brûlées pour les 40 dernières années répétée sur 100 ans ...	10
Figure 4 : Évolution des 100 prochaines années de la moyenne de l'âge de l'ensemble des peuplements du territoire forestier envoqué par le réservoir Eastmain-1 réalisée à l'aide de MBC-SCF3.	11
Figure 5 : Émissions annuelles provenant des feux (P) des peuplements envoysés par le réservoir Eastmain-1 ayant subi un cycle de feux de 222 ans réalisée à l'aide de MBC-SCF3.	12
Figure 6 : Variation annuelle de la productivité primaire nette (PPN) de peuplements envoysés par le réservoir Eastmain-1 ayant subi un cycle de feux de 222 ans réalisée à l'aide de MBC-SCF3.	12
Figure 7 : Accumulation annuelle de litière au sol des peuplements envoysés par le réservoir Eastmain-1, ayant subi un cycle de feux de 222 ans réalisée à l'aide de MBC-SCF3.	13
Figure 8 : Variation annuelle des émissions de la décomposition (Rh) des peuplements envoysés par le réservoir Eastmain-1, ayant subi un cycle de feux de 222 ans réalisée à l'aide de MBC-SCF3.	13
Figure 9 : Variation annuelle de la productivité nette de l'écosystème (PNE) des peuplements envoysés par le réservoir Eastmain-1, ayant subi un cycle de feux de 222 ans, réalisée à l'aide de MBC-SFC3	14
Figure 10 : Variation annuelle de la productivité nette du biome (PNB) des peuplements envoysés par le réservoir Eastmain-1, ayant subi un cycle de feux de 222 ans réalisée à l'aide de MBC-SCF3.	14
Figure 11 : Productivité nette cumulée du biome (PNB) des peuplements envoysés par le réservoir Eastmain-1, ayant subi un cycle de feux de 222 ans réalisée à l'aide de MBC-SCF3.	15

Figure 12 : Productivité nette du biome (PNB) accumulée des peuplements étudiés ayant subi un cycle de feux de 222 ans par rapport de l'augmentation et de la réduction de 20% des tables de production (T.P.) réalisée à l'aide de MBC-SCF3.	15
Figure 13 : Productivité nette du biome (PNB) accumulée des peuplements étudiés induite par la variation du cycle de feu : 1-Aucun feu, 2- Cycle 131 ans, 3- Cycle 222 ans, 4- Cycle 170 ans, 5- Cycle 127 ans réalisée avec laide de MBC-SCF3.....	16
Figure 14 : L'âge moyen des peuplements étudiés selon quatre cycles de feu simulés en fonction du temps réalisée à l'aide de MBC-SCF3.	17
Figure 15 : Productivité nette du biome (PNB) accumulée des peuplements étudiés, ayant subi un cycle de feux de 222 ans et des changements dans la régénération réalisée à l'aide de MBC-SCF3.	17
Figure 16 : Évolution du volume marchand moyen de l'ensemble des peuplements en fonction de l'âge obtenu avec l'aide des tables de produit identifiées par Plani-forêt	24

Liste des tableaux

Tableau 1 : Quantité de carbone stockée dans les différents réservoirs de biomasse et de matière organique morte à l'année 0 du territoire forestier ennoyé par le réservoir Eastmain-1 réalisée à l'aide de MBC-SCF3.	11
---	----

Liste des équations

Équation 1 : Conversion en équivalent CO ₂	7
Équation 2 : Perte de puits de carbone par unité électrique.....	8

Liste des acronymes

C : Carbone

MBC-SCF : Modèle du bilan carbone du service canadien des forêts

CCNUCC : Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques

CO₂ : Dioxyde de carbone

COS-SOC Carbone organique du sol – soil organic carbon

DHP : Diamètre à hauteur de poitrine

Eq. CO₂ : équivalent dioxyde de carbone

kWh : kilowattheure

Mg ha⁻¹a⁻¹ : tonne par hectare par année

Mg C ha⁻¹ a⁻¹ tonne de carbone par hectare par année

g éq. CO₂ kWh⁻¹ : gramme d'équivalent dioxyde de carbone par kilowatt heure

GES : Gaz à effet de serre

GIEC : Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat

IFN : Inventaire forestier national

Mg C ha⁻¹ : Mégagramme de carbone par hectare

MOM : Matière organique morte

PNB : Productivité nette du biome

PNE : Productivité nette de l'écosystème

PPB : Productivité primaire brute

PPN : Productivité primaire nette

ppm : Parties par million

RA : Respiration autotrophe

RH : Respiration hétérotrophe

SOPFEU : Société de protection des forêts contre le feu

TWh : Térawattheure

CHAPITRE 1 : INTRODUCTION

PRÉAMBULE

Depuis les années 70, la Société d'État Hydro-Québec (H-Q) étudie les réseaux hydrographiques du Nord du Québec afin d'alimenter son service de distribution d'électricité en Amérique du Nord (Figure 1). Le réseau hydrographique présente encore plusieurs sites favorables à la production électrique (SDBJ, 1987). Au fil des années et après plusieurs séries d'études, H-Q a cherché à comprendre et à quantifier les impacts de ses centrales électriques sur l'environnement et les communautés. Les grands barrages québécois ont toujours suscité beaucoup d'intérêt de la part des groupes environnementaux (par exemple le projet Grande-Baleine à la fin des années 80), car ils créent un changement d'affectation des terres en inondant de grandes surfaces de territoire qui pourraient être utilisées à d'autres fins (exploitation forestière, tourisme, trappe, etc.).

Un des ouvrages les plus récents d'Hydro-Québec est la centrale hydroélectrique Eastmain-1 où plusieurs équipes de recherche (McGill, UQAM, Environnement illimité inc. et Hydro-Québec) ont participé à la caractérisation des émissions de gaz à effet de serre du milieu physique naturel entourant le réservoir et, aussi, celles provenant du réservoir. Le territoire, la construction et l'exploitation de cette centrale sont bien documentés et ce jeu de données représente une excellente occasion d'évaluer l'empreinte carbonique de cette centrale (Teodoru et al., 2012).

Ce document présente la partie perte de puits de carbone de l'empreinte carbonique de la centrale hydroélectrique Eastmain-1 réalisé par le CIRAIQ et la Chaire de recherche et d'intervention en éco-conseil du l'UQAC.

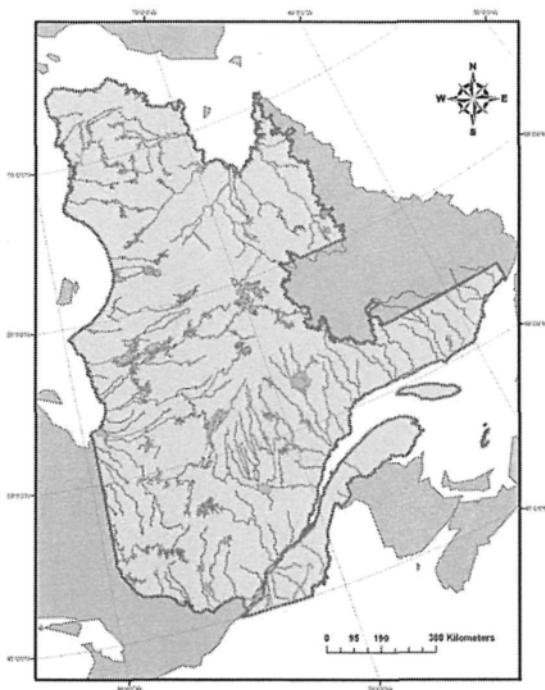


Figure 1 : Réseau hydrographique du Québec

1 INTRODUCTION

1.1 Contexte de l'étude

La Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC) définit ceux-ci comme : « des changements qui sont attribués directement ou indirectement à une activité humaine et qui altèrent la composition de l'atmosphère mondiale venant ainsi s'ajouter à la variabilité naturelle du climat observée au cours de périodes comparables » (Nations unies, 1992). Depuis 1750, les activités humaines ont fait augmenter les concentrations atmosphériques de CO₂, de méthane (CH₄) et d'oxyde nitreux (N₂O) (Solomon *et al.*, 2007). La principale cause de l'augmentation de ces gaz à effet de serre est l'utilisation de combustibles fossiles suivie par les changements d'affectation des terres (Solomon *et al.*, 2007). Le Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'Évolution du Climat (GIEC) a clairement établi que les émissions anthropiques survenues depuis le début de l'industrialisation, et en particulier dans les 30 dernières années, jouent un rôle important

dans les changements observés dans les écosystèmes. Le réchauffement climatique est sans équivoque et, déjà à l'échelle du globe, il y a une hausse observée des températures moyennes de l'atmosphère et des océans, une fonte massive de la neige et de la glace et une élévation du niveau moyen de la mer (Solomon *et al.*, 2007).

Le protocole de Kyoto reconnaît le rôle du secteur des changements d'affectation des terres, de l'utilisation des terres et de la foresterie comme étant contributeur aux sources et aux puits de GES (Kurz et Apps., 2006). En particulier, le protocole de Kyoto, via l'article 3.4, spécifie que les pays signataire devront, pour quantifier les GES associés aux changements d'affectation des terres, identifier, suivre et quantifier les aires affectées par le boisement, la déforestation et la reforestation depuis 1990. Il est à noter que les émissions de CO₂ pour le secteur forestier planétaire ont augmenté, au total, de trois gigatonnes entre 1990 et 2010 (Global Carbon Projet, 2010), mais que celui-ci est, en moyenne, un puits de $1,1 \pm 0,8$ gigatonne par année (Pan *et al.*, 2011).

En 2002, Hydro-Québec a réalisé une étude, faite à partir de données secondaires, qui visait à comparer l'empreinte carbonique des centrales hydroélectriques avec réservoir à celle d'autres types de centrale (Gagnon, 2003). Ils en sont venus à la conclusion que ce type de centrale, en zone boréale et pour les besoins énergétiques de base et de pointe, est beaucoup plus avantageux en termes de bilan GES que les autres types de centrales. Les estimations obtenues montrent que l'hydroélectricité avec réservoir émet environ 33 g éq. CO₂ par kWh, sur une période de 100 ans, en comptabilisant les émissions encourues pour la construction de la centrale et les émissions brutes¹. Toutefois, les émissions provenant du changement d'affectation des terres occasionnées par l'ennoiement du territoire n'ont pas été comptabilisées tel que recommandé par l'article 3.4 du protocole de Kyoto. Afin de faire une évaluation plus complète des émissions de GES associés à l'implantation et au fonctionnement d'une centrale hydroélectrique avec réservoir, ces émissions devraient être comptabilisées, tel que préconisé par Teodoru *et al.*, (2012).

¹ Voir l'annexe 1 pour plus de détails.

L'outil canadien utilisé pour modéliser le changement des stocks de carbone provoqués par le changement d'affectation des terres est le modèle du bilan du carbone du secteur forestier canadien (MBC-SCF3) (Kurz et al. 2009). Le MBC-SCF3 est un logiciel de modélisation servant à simuler la dynamique de tous les stocks de carbone forestier requis en vertu du Protocole de Kyoto (biomasse aérienne, biomasse souterraine, litière, bois mort et carbone organique du sol). Le modèle est conforme aux méthodes d'estimation du carbone mentionnées dans le rapport du GIEC intitulé; « Recommandations en matière de bonnes pratiques pour le secteur de l'utilisation des terres, changement d'affectation des terres et foresterie » (Penmam, 2003).

Pour modéliser les flux et les stocks de carbone, le modèle utilise les informations d'un inventaire forestier, des tables de production ainsi que des informations sur les perturbations naturelles et les règles de régénération des peuplements. En utilisant ces informations le modèle est en mesure de fournir un bilan carbone résultant des activités d'aménagement forestier, des perturbations naturelles et des changements d'affectation des terres (Kurz et al. 2009).

À titre indicatif, les écosystèmes forestiers boréaux semi-arides planétaires ont une productivité primaire nette de $3,3 \pm 0,6 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ (Luyssaert et al., 2007). Plus près de la région étudiée, Bergeron et al. (2007) ont déterminé que les peuplements denses d'épinette noire âgés de 91 ans situés près de Chibougamau avaient une PPN de $5,84 \pm 0,07 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$.

Du côté de la PNE, les valeurs suggérées par Amiro et al. (2010), Bergeron et al. (2007) et Luyssaert et al. (2007) sont de -2,0 à 2,5, 0,04 à 0,3 et de $0,4 \pm 0,3 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ respectivement. Et sous-jacent à la PNE, la RH suggérée par Luyssaert et al. (2007) présentaient des valeurs de RH de $2,5 \pm 0,3 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ et Bergeron et al. (2007), estimait celle-ci à $5,8 \pm 0,1 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$. Ces valeurs sont comparables entre elles, mais leurs différences dépendent de la disparité des méthodes des conditions biotiques et abiotiques du territoire.

Afin de faire une modélisation adéquate des flux de carbone des écosystèmes forestiers boréaux, par exemple ceux touchant le territoire envoqué lors de la création du réservoir de

la centrale hydroélectrique Eastmain-1, il est essentiel de bien connaître et intégrer les perturbations naturelles affectant ces écosystèmes. Les perturbations naturelles sont la première cause d'émissions de GES dans le milieu forestier au Canada (Carlson et al., 2010) et modifient par le fait même l'accumulation de carbone de ces milieux (Chertov et al., 2009). À titre d'exemple, les émissions annuelles de GES, au Canada, provenant des feux de forêt sont estimées, entre 1959 et 1999, à 2,7 Tg de C (Amiro et al., 2001). De plus, ceux-ci devraient augmenter de 78 % à 118 % (Flannigan et al., 2005) d'ici la fin du siècle. Pour la décomposition post combustion, les émissions sont du même ordre (Amiro et al., 2001). Les incendies de forêt représentent une force structurante majeure de la forêt boréale, car ils créent une variation dans la structure d'âge des forêts, dans la composition de celle-ci et par le fait même sur les flux de carbone (Marchand et al., 2009). La connaissance du cycle de feux d'un territoire donné est donc nécessaire afin de modéliser adéquatement l'évolution des stocks de carbone de ce territoire (Bergeron et al., 2004b).

Le cycle de feu se définit comme étant la période de temps requise pour brûler une superficie équivalente à un territoire donné (Lauzon et al., 2006). Il varie spatiotemporellement (Bergeron et al., 2010; Le Goff et al. 2009; Lauzon et al., 2006; Bergeron et al., 2001) et peut également être influencé par les activités anthropiques (Lauzon et al., 2006). En effet, le cycle de feu peut s'écourter ou s'allonger selon les activités anthropiques (aménagement forestier, villégiature, etc.) et les mesures de contrôle (SOPFEU) mises en place sur le territoire.

La région de Waswanipi, située dans le bassin versant de la rivière Eastmain qui se jette dans la Baie James (Québec, Canada), aurait eu un cycle de feu variant entre 132 et 153 ans (0,76 à 0,65 % par année) au cours des 100 dernières années (Le Goff et al. 2007). De plus, la superficie brûlée devrait augmenter d'environ 7 % au cours du prochain siècle (Le Goff et al. 2007). D'autre part, l'Abitibi-Est et Ouest, qui incluent le bassin versant de la rivière Eastmain, auraient eu pour la même période un cycle de feu de 191 et 325 ans respectivement (Bergeron et al., 2001).

Pour une zone se situant dans la forêt boréale de l'ouest du Québec et l'est de l'Ontario et englobant le bassin versant de la rivière Eastmain, le cycle de feux au cours des 100

prochaines années, se situerait autour de 0,45 % de territoire brûlé annuellement (cycle de feux de 222 ans) (Bergeron et al. 2010).

Ces exemples témoignent donc du caractère variable du cycle de feu et montrent qu'il est difficile d'anticiper sa durée d'une manière précise pour l'avenir, car il varie selon la région, les interventions humaines et aussi dans le temps (Lauzon et al., 2006).

Hypothèse

Le changement d'affectation des terres causé par l'ennoiement du territoire forestier crée une perte nette de puits de carbone, car la forêt présente au moment de la mise en eau aurait absorbé plus de carbone qu'elle en aurait émis en dépit des perturbations prévisibles par le feu.

Objectif

L'objectif du présent projet est de modéliser, sur une période de 100 ans, le bilan carbone net de la forêt ennoyée par la création du réservoir Eastmain-1 (flux avec et sans réservoir), et ce, afin d'établir un facteur d'émission éq. CO₂ par kWh dans la durée de vie de cette centrale.

CHAPITRE 2 : MATÉRIEL ET MÉTHODE

2 MATÉRIEL ET MÉTHODE

2.1 Localisation géographique et description du territoire

Le site étudié se situe dans le bassin versant de la rivière Eastmain aux coordonnées géographiques 50°59'50''N et 76°02'28''O (Figure 2). Celui-ci est à la transition entre le domaine bioclimatique de la pessière à mousses au sud et celui de la pessière à lichens au nord qui se différencient par l'ouverture de leur couvert arborescent (Saucier et al. 2009). Les températures moyennes annuelles varient entre 1,1 et -2,4 °C alors que les précipitations annuelles moyennes varient entre 727 et 930 mm dont environ 30 % tombe sous forme de neige (Environnement Canada, 2011).



Figure 2 : Localisation du site étudié (source : Hydro-Québec)

En 2003, ce site a été aménagé pour produire de l'hydroélectricité. En effet, une centrale de trois groupes turbines-alternateurs d'une puissance de 480 MW qui ont une production annuelle moyenne de 2,7 TWh y a été installée². Cette centrale compte un réservoir couvrant une superficie de 59 100 ha comportant 43 161 ha de territoire forestier qui

² <http://www.eastmain1.org/fr/projet-de-recherche.html>

constitue le territoire modélisé dans la présente étude. Parallèlement, le territoire ennoie aussi des tourbières ($\approx 12\%$) ainsi que des lacs et des rivières ($\approx 15\%$).

Il est à noter que les sources et les puits de GES provenant des tourbières, des lacs et des rivières ne sont pas modélisés dans cette étude, car le logiciel utilisé ne prend pas en considération ces milieux. Toutefois, Teodoru et al. 2012 ont estimé ces puits et ces réservoirs.

2.2 Inventaire forestier

L'inventaire écoforestier utilisé a été obtenu à l'aide de photographies aériennes de 1999 provenant d'Hydro-Québec (253 photos, 1 : 20 000), car le territoire étudié était ennoyé lors de la réalisation de cette étude.

La première étape a été photo interprétée le territoire afin de déterminer les espèces, les classes d'âge, les densités, les hauteurs moyennes, les perturbations récentes de chacun des peuplements. Des spécialistes dans le domaine, Consultants forestiers DGR inc., ont été mandatés pour la réalisation de cette tâche.

La seconde étape a été de numériser et de géoréférencer (NAD_1983_UTM_Zone_9N) chaque des 2 700 peuplements photointerprétés, et ce, à l'aide d'Arc GIS 9.0 (ESRI, Redland, USA, 2006) afin de déterminer la superficie des différents peuplements.

Pa la suite, la nomenclature tirée de la photointerprétation a été ajustée afin de regrouper les peuplements ayant les mêmes caractéristiques, c'est-à-dire la même composition d'essences, la même densité et le même âge.

À partir de là, les nomenclatures des peuplements regroupés ont permis, en les comparant à des inventaires déjà existants, de définir les essences, la surface terrière et le nombre de tiges à l'hectare. À cette étape, une correspondance a été réalisée entre les peuplements regroupés et des tables de rendement des peuplements productifs naturels les plus près (<100 km) de la région étudiée (MRN, 2000).

Ainsi, pour les 2 700 peuplements inventoriés, il y avait 231 regroupements similaires qui avaient des tables de rendement propres aux strates forestières qui les composent.

L'inventaire forestier issu de la photointerprétation démontre que le territoire ennoyé est dominé par six essences différentes; l'épinette noire (*Picea mariana* Mill.), le pin gris (*Pinus banksiana* Lamb.), le mélèze laricin (*Larix laricina* (Du Roi) K. Koch), le sapin baumier (*Abies balsamea* (L.) Mill.), le bouleau à papier (*Betula papyrifera* Marsh) et le peuplier faux tremble (*Populus tremuloides* Michx). La grande majorité du territoire est dominé par deux essences, soit environ 50 % d'épinette noire et 35 % de pin gris. De plus, 23 % du territoire est en régénération, c'est-à-dire que la forêt y est âgée entre 0-30 ans. L'annexe 2 présente un portrait plus complet de la photo-interprétation et, aussi, de l'inventaire terrain réalisé par Paré *et al.* (2011).

2.3 Simulation initiale dans MBC-SCF3

La simulation a été effectuée à l'aide de l'outil d'importation standard du logiciel modèle du bilan du carbone du secteur forestier canadien³ (v. 1.2 bêta). Le MBC-SCF3 est un logiciel de modélisation servant à simuler la dynamique de tous les stocks de carbone forestier (biomasse aérienne, biomasse souterraine, litière, bois mort et carbone organique du sol). Le modèle est conforme aux méthodes d'estimation du carbone mentionnées dans le rapport du GIEC intitulé; « Recommandations en matière de bonnes pratiques pour le secteur de l'utilisation des terres, changement d'affectation des terres et foresterie » (IPCC *et al.*, 2003).

La simulation a été réalisée sur une période de 100 ans pour un territoire situé dans la région écologique « Boreal Shield East » à l'intérieur des limites administratives de la province du Québec. Les paramètres de sols n'ont pas été modifiés et les attributs par défaut du logiciel ont été utilisés.

La périodicité du cycle de feu a été déterminée à l'aide de la littérature. Ainsi, pour les 100 années de la simulation, le cycle de feux a été fixé à 222 ans avec un intervalle de confiance allant de 170 à 313 ans (Bergeron *et al.*, 2010). Un cycle de 222 ans suggère qu'il y aura 0,45 % du territoire qui brûlera chaque année. L'étude de Bergeron *et al.* 2010 a été choisi

³ L'annexe 3 présente une explication plus détaillée du logiciel MBC-SCF3

parce que le territoire ayant servi à établir le cycle de feu inclut la zone inondée et porte sur les mêmes 100 ans, que la durée de vie de la centrale.

Par la suite, un patron des feux a été créé en consultant la base nationale de donnée sur les feux de forêt du Canada (1959 à 1999)⁴ pour le territoire à l'étude. Ce patron avait pour objectif d'imiter la variabilité naturelle du feu par rapport au 43 161 ha de forêt étudiée : la fréquence et la superficie brûlée. La superficie brûlée variera entre 0 et 7 % pour une moyenne annuelle de 0,45 % (Bergeron, 2010). Toutefois, comme la base de données des perturbations observées ne couvre qu'un intervalle de 40 ans, elle a été répétée 2 fois pour la ramener sur les 100 ans de la simulation. Il est à noter que chaque hectare de territoire ne brûle qu'une seule fois faute d'information permettant de caractériser les feux multiples.

Pour ce qui est des règles de transitions suite aux feux, elles ont été réglées de façon à ce que la régénération s'installe l'année suivant le feu sans autre modification à l'inventaire forestier que le changement de classe d'âge.

2.4 Analyses de sensibilité

2.4.1 Variation des tables de rendement +20 % - 20 %

Le test de sensibilité sur les tables de production ($\pm 20\%$) a pour objectif d'évaluer l'incertitude engendrée par la simulation sur le long terme comme stipulé par Pothier et Savard (1998).

Ainsi, le test de sensibilité compare trois simulations faites avec le cycle de feu de 222 ans :

1. Table de production d'origine (MRN, 2000)
2. Table de production augmentée de 20 %
3. Table de production réduite de 20 %.

2.4.2 Variation du cycle de feux

Le test de sensibilité sur les cycles de feu a pour objectif d'évaluer la variabilité des gains et des pertes en carbone attribuables à l'intervalle de confiance de Bergeron et al. (2010). De

⁴ http://cwfis.cfs.nrcan.gc.ca/fr_CA/nfdb/poly

plus, ce test permet d'évaluer ce qu'il serait advenu des gains en carbone au bout de 100 ans si le territoire n'avait pas brûlé et s'il avait eu le même portrait que notre inventaire de départ. Voici les cycles modélisés pour le test de sensibilité :

1. *Aucune perturbation* : la forêt croît suivant ses tables de production sans être perturbée.
2. *Cycle de 313 ans* (Bergeron et al. 2010); le feu affecte 32 % du territoire au bout de 100 ans.
3. *Cycle de 222 ans* (Bergeron et al. 2010); le feu affecte 45 % du territoire au bout de 100 ans.
4. *Cycle de 170 ans* (Bergeron et al. 2010); le feu affecte 59 % du territoire au bout de 100 ans.
5. *Cycle de 127 ans* (feux des 100 dernières années); le feu affecte 79 % du territoire au bout de 100 ans.

2.4.3 Variation dans la régénération des peuplements

Le test de sensibilité sur la régénération des peuplements après feu a pour objectif d'évaluer l'impact d'une transition de certains peuplements et d'une perte de productivité de d'autres sur la productivité nette du biome de la simulation du cycle de feu de 222 ans. Voici les règles de régénération imposées au logiciel :

- 1- Aucune transition dans les peuplements et aucune perte de productivité.
- 2- Transition dans les peuplements et/ou perte de productivité :
 - a) Lorsqu'il y a un feu dans un peuplement d'épinette noire âgé de moins de 60 ans, il y a une diminution de la productivité de l'épinette noire vers une densité D (Payette 1992, Payette et al. 2000, Gagnon et Morin 2001, Jasinsky et Payette 2005, Girard et al. 2009, Brown & Johnstone 2011).
 - b) Lorsqu'il y a du sapin dans le peuplement d'épinette, le sapin est éliminé, car celui-ci ne possède pas de mécanisme de régénération après feu (Gagnon et Morin, 2001).

- c) Lorsqu'il y a un feu dans un peuplement de pessière à pin gris de moins de 60 ans, celui-ci devient à dominance pin gris (Lavoie et Sirois, 1998; Gagnon et Morin 2001).
- d) Lorsqu'il y a un feu dans un peuplement âgé de moins de 60 ans d'épinette avec du bouleau ou du peuplier faux tremble, il y aura une dominance du feuillu (Gagnon et Morin, 2001).
- e) Lorsqu'il y a un feu dans un peuplement de pessière à mélèze de moins de 60 ans, celui-ci reste le même (Rowe et Scotter, 1973).
- f) Lorsqu'il y a un feu dans un peuplement de pin gris de moins de 10 ans, la productivité diminuera (Rudolf et Laidly, 1990)
- g) lorsqu'il y a un feu dans une pinède avec épinette âgée de moins de 60 ans, l'épinette est éliminée (Lavoie et Sirois, 1998; Gagnon et Morin 2001).
- h) Lorsqu'il y a un feu dans un peuplement de pin gris âgé de moins de 10 ans ayant du peuplier faux tremble, le pin gris est éliminé (Rudolf et Laidly, 1990).
- i) Lorsqu'il y a un feu dans un peuplement mixte résineux âgé de moins de 60 ans, il y a élimination du sapin, mélèze et de l'épinette pour devenir du pin gris (Lavoie et Sirois 1998; Rowe et Scotter, 1973; Barton et McLean, 1984; Gagnon et Morin 2001).
- j) Lorsqu'il y a un feu dans un peuplement de feuillus ou un peuplement mixte, celui-ci ne change pas (Bergeron et al., 2004).

2.5 Calculs

2.5.1 Convertir les quantités de carbone en quantité d'équivalent CO₂

Pour calculer la quantité de GES émise par une tonne de carbone, il faut multiplier la perte de puits de carbone par le facteur de conversion 3,667.

Équation 1 : Conversion en équivalent CO₂

$$\text{éq. CO}_2 = C \times 3,667$$

Où

éq. CO₂ : tonne d'équivalent CO₂ émis vers l'atmosphère

C : tonne de carbone émis vers l'atmosphère

3,667 = facteur de conversion du carbone en équivalent de CO₂

2.5.2 *Calculer la perte de puits de carbone par unité électrique*

Pour calculer l'intensité carbonique, on doit diviser la perte de puits de carbone (en éq. CO₂) par la quantité d'électricité produite (en kWh). Il est à noter que la centrale hydroélectrique Eastmain-1 produit en moyenne 2,7 TWh annuellement, soit 2 700 000 000 kWh.

Toutefois, avant d'effectuer ce calcul il faut tout d'abord ramener la perte de puits de carbone total à une quantité annuelle, soit diviser celle-ci par la durée de vie de la centrale (100 ans).

Équation 2 : Perte de puits de carbone par unité électrique

$$PPC\acute{e} = \frac{PPC \text{ total}}{100} \div \acute{e}$$

Où

PPCé = Perte de puits de carbone par kWh produit (éq. CO₂ / kWh)

PPC total = Perte de puits de carbone total (éq. CO₂)

100 = la durée de vie d'une centrale hydroélectrique en milieu boréal (ans)

é = Production annuelle de la centrale hydroélectrique (kWh/an)

CHAPITRE 3 : RÉSULTATS

3 RÉSULTATS

3.1 Simulation du cycle de feu

La figure 3 montre le résultat des données colligées de la base de données nationale des feux de forêt au Canada (SCIFV, 2012) répété deux fois et demie afin de couvrir la période de référence de cent ans. Les résultats montrent qu'il y a des pics de superficies brûlées jusqu'à 7 % annuellement et pour plusieurs autres années il n'y en a pas en raison de l'absence de feux.

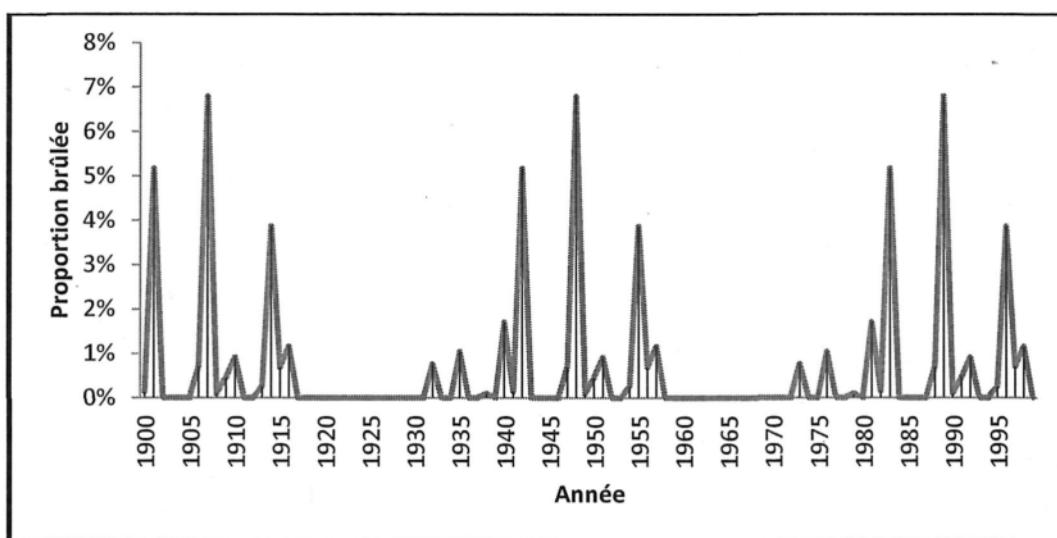


Figure 3 : Proportion de forêts brûlées pour les 40 dernières années répétée sur 100 ans

3.2 Évolution des stocks de carbone

Le tableau 1 montre que la matière organique morte représente 81 % (4 654 124 Mg) du carbone du territoire forestier et que la biomasse aérienne représente 15 % du carbone (889 387 Mg).

Au total, la densité des stocks de carbone sont de 133 Mg C ha^{-1} pour l'ensemble des réservoirs de carbone et de 108 Mg C ha^{-1} pour la matière organique morte.

Tableau 1 : Quantité de carbone stockée dans les différents réservoirs de biomasse et de matière organique morte à l'année 0 du territoire forestier ennoyé par le réservoir Eastmain-1 réalisée à l'aide de MBC-SCF3.

Réservoirs de C	Stocks de C (Mg)	Stocks de C (%)
Biomasse au-dessus du sol	889 387	15%
Biomasse en dessous du sol	207 558	4%
Matières organiques mortes au-dessus du sol	2 013 477	35%
Matières organiques mortes dans les sols	2 640 647	46%
Total	5 751 069	100%

La figure 4 montre que la moyenne d'âge des peuplements évolue de 59 à 111 ans pendant la période à l'étude avec de légères variations suivant le profil des feux (figure 3). Il est à noter que s'il n'y avait pas eu de feux, au bout de 100 ans, les peuplements auraient atteint une moyenne d'âge de 159 ans.

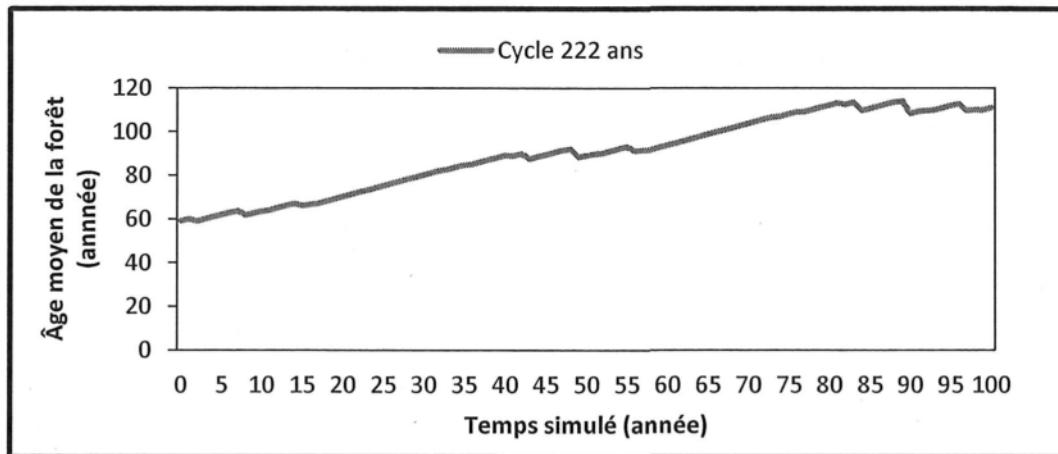


Figure 4 : Évolution des 100 prochaines années de la moyenne de l'âge de l'ensemble des peuplements du territoire forestier ennoyé par le réservoir Eastmain-1 réalisée à l'aide de MBC-SCF3.

La figure 5 indique que dans les années où les feux brûlent de grandes parties de territoire les émissions atteignent près de $40\ 000\ \text{Mg C}\ \text{an}^{-1}$ soit $0,9\ \text{Mg C}\ \text{ha}^{-1}\text{an}^{-1}$. De plus, la quantité de carbone émis vers l'atmosphère tend à augmenter avec le temps, car les stocks de carbone (biomasse et matière organique morte) augmentent avec l'âge des peuplements. Ainsi, la simulation indique que les feux de forêt émettent $0,1 \pm 0,2\ \text{Mg C}\ \text{ha}^{-1}\text{an}^{-1}$.

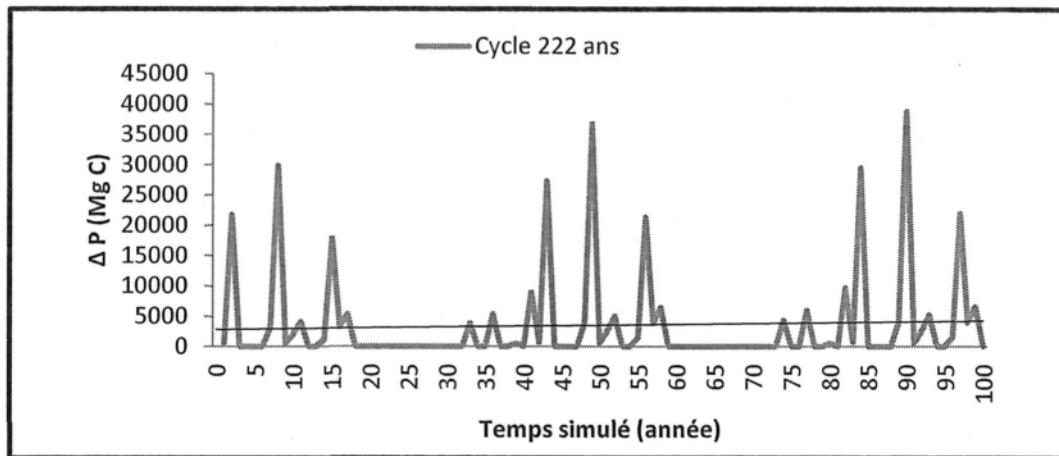


Figure 5 : Émissions annuelles provenant des feux (P) des peuplements ennoyés par le réservoir Eastmain-1 ayant subi un cycle de feux de 222 ans réalisée à l'aide de MBC-SCF3.

La figure 6 montre que la productivité varie entre 80 000 et 100 000 Mg C an^{-1} et que celle-ci tend à vouloir augmenter au cours des années, mais stagne lorsque les peuplements atteignent une moyenne d'âge de 90 ans (figure 4). De plus, celle-ci présente trois paliers de variation qui correspondent aux années de grands feux (figure 5), ces derniers modifiant fortement la structure d'âge des peuplements à l'échelle du territoire. En somme, la productivité primaire nette annuelle est en moyenne de $2,1 \pm 0,1 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$.

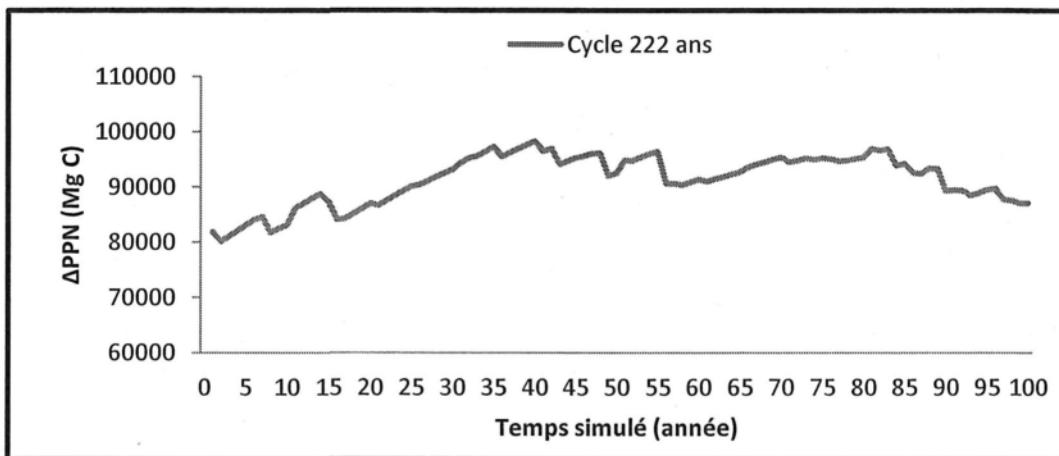


Figure 6 : Variation annuelle de la productivité primaire nette (PPN) de peuplements ennoyés par le réservoir Eastmain-1 ayant subi un cycle de feux de 222 ans réalisée à l'aide de MBC-SCF3.

La figure 7 montre que la forêt simulée accumule de 60 000 et 90 000 Mg C an^{-1} . De plus, cette accumulation tend à augmenter avec le temps et avec l'âge des peuplements

(figure 4). Au total, la simulation indique que la litière s'accumule en moyenne à un taux de $1,9 \pm 0,2 \text{ Mg de C ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$.

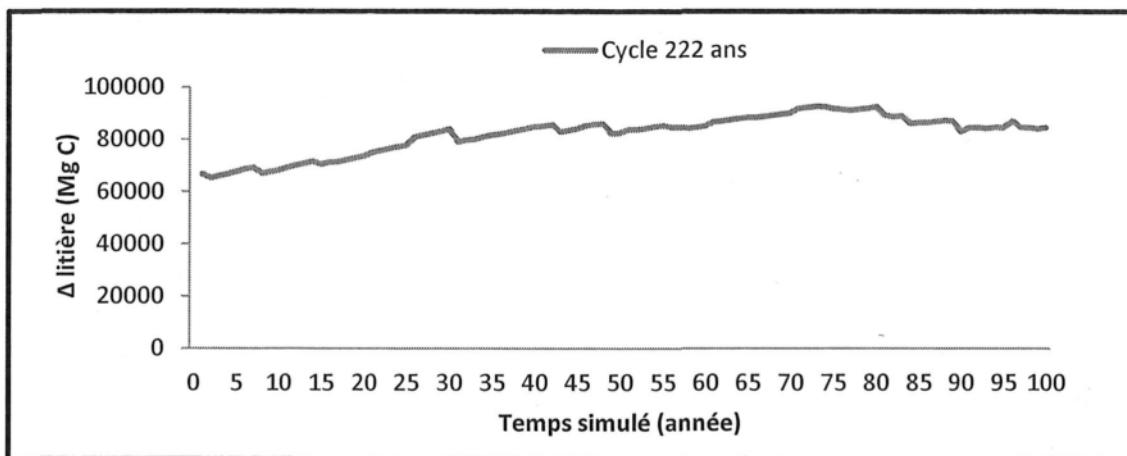


Figure 7 : Accumulation annuelle de litière au sol des peuplements ennoyés par le réservoir Eastmain-1, ayant subi un cycle de feux de 222 ans réalisée à l'aide de MBC-SCF3.

La figure 8 montre que la décomposition de la matière organique tend à augmenter d'une année à l'autre et celle-ci varie de 78 000 à 90 000 Mg C. De plus, cette figure présente de légers plateaux situés dans des années où la superficie brûlée est plus grande (figure 5). En effet, les feux de forêt brûlent une partie de la litière qui s'est accumulée. Ainsi, la décomposition représente en moyenne $2,0 \pm 0,1 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$.

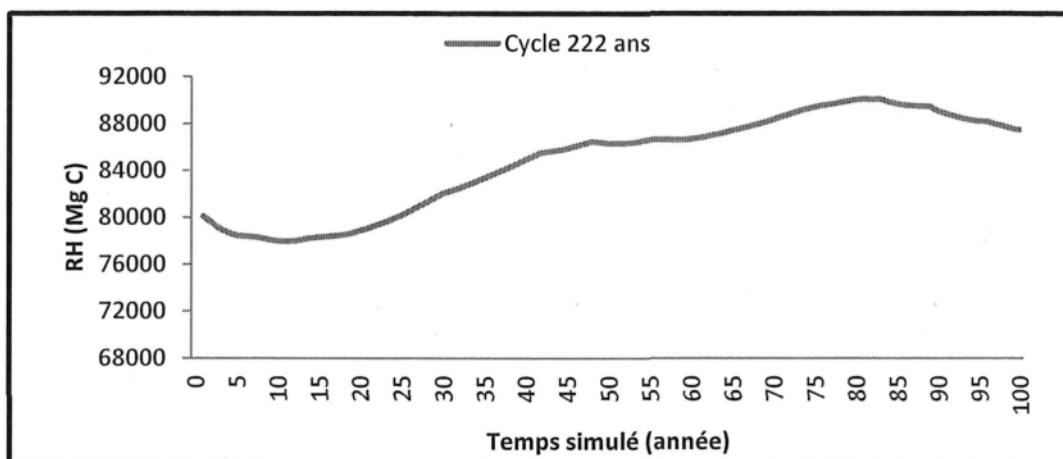


Figure 8 : Variation annuelle des émissions de la décomposition (Rh) des peuplements ennoyés par le réservoir Eastmain-1, ayant subi un cycle de feux de 222 ans réalisée à l'aide de MBC-SCF3.

La figure 9 montre que la PNE augmente jusqu'à 35 années et diminue par la suite jusqu'à 100 ans. Globalement, la PNE tend à diminuer avec le temps. De plus, les périodes de

grande variation correspondent aux périodes où il y a plus de superficies brûlées (figure 5). Ainsi, la PNE est, en moyenne, de $0,15 \pm 0,08 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$.

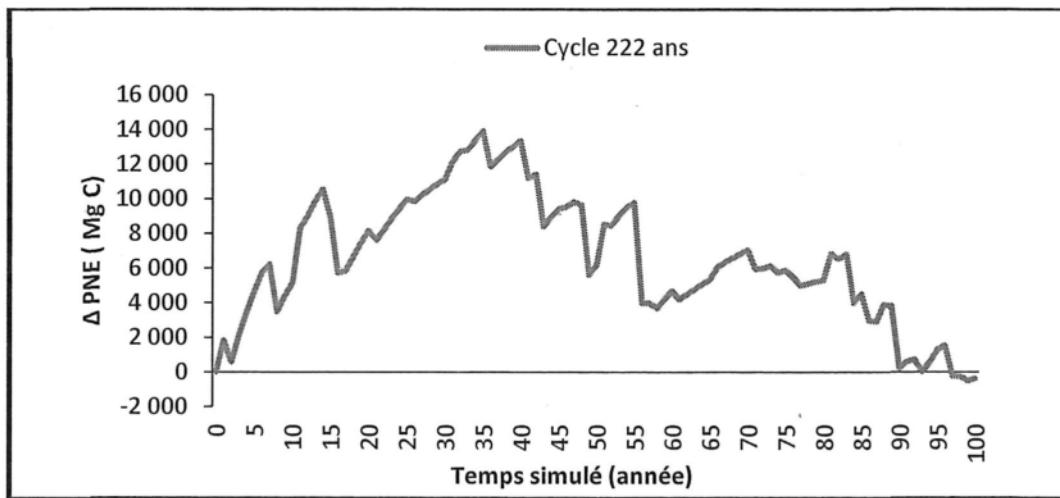


Figure 9 : Variation annuelle de la productivité nette de l'écosystème (PNE) des peuplements ennoyés par le réservoir Eastmain-1, ayant subi un cycle de feux de 222 ans, réalisée à l'aide de MBC-SFC3

La figure 10 présente la variation annuelle de la PNB qui représente la moitié de la PNE soit $0,1 \pm 0,2 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$.

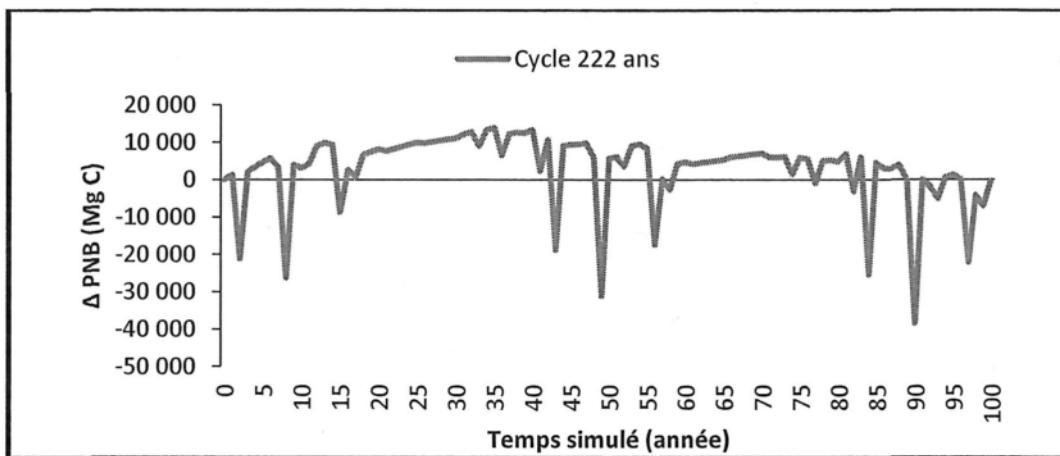


Figure 10 : Variation annuelle de la productivité nette du biome (PNB) des peuplements ennoyés par le réservoir Eastmain-1, ayant subi un cycle de feux de 222 ans réalisée à l'aide de MBC-SFC3.

Enfin, la figure 11 présente la PNB cumulée au cours des 100 années simulées, c'est-à-dire le carbone cumulé pendant 100 ans. La figure présente trois paliers de variations

provoquées par les feux. Ainsi, au bout de 100 années de simulation le territoire ennoyé aurait accumulé au net 303 489 Mg de carbone, soit 7 Mg ha^{-1} .

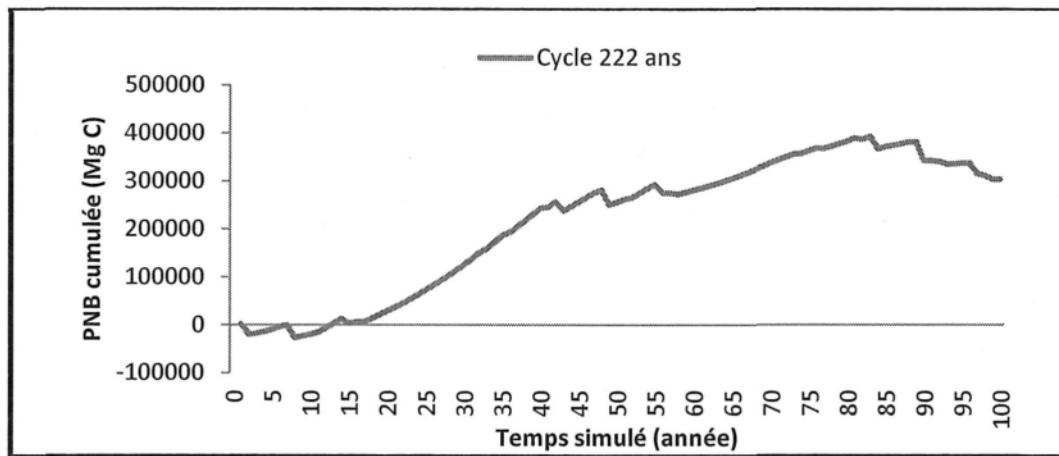


Figure 11 : Productivité nette cumulée du biome (PNB) des peuplements ennoyés par le réservoir Eastmain-1, ayant subi un cycle de feux de 222 ans réalisée à l'aide de MBC-SCF3.

3.3 Tests de sensibilité

3.3.1 Variation des tables de rendement

La figure 12 présente la variation de la PNB cumulée, au bout de 100 années en appliquant une variation de $\pm 20\%$ dans les tables de rendement. Ainsi, les gains en carbone varient entre 270 251 à 326 463 Mg C, soit une variation de +8 et -11%.

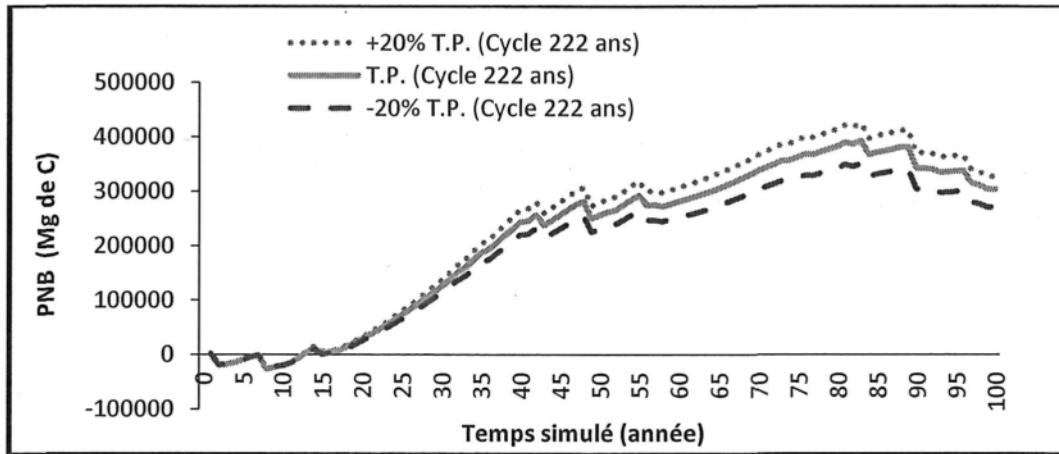


Figure 12 : Productivité nette du biome (PNB) accumulée des peuplements étudiés ayant subi un cycle de feux de 222 ans par rapport de l'augmentation et de la réduction de 20% des tables de production (T.P.) réalisée à l'aide de MBC-SCF3.

3.3.2 Variation des cycles de feu

La figure 13 montre que plus le cycle de feu est court, c'est-à-dire plus il y a de territoire brûlé sur 100 ans, moins le territoire cumule du carbone. En conséquence, les gains en carbone de la simulation des intervalles de confiance suggérés par Bergeron et al. (2010) sont de 433 251 Mg C pour le cycle de 313 ans et 164 232 Mg C pour le cycle 170 ans (figure 13), soit 43 et 46% de variation. Si les peuplements ne sont soumis à aucun feu, ceux-ci deviendront un puits de 738 318 Mg C. De même, si les peuplements brûlent autant que dans les 100 dernières années soit 79 % du territoire (cycle de 127 ans), celui-ci deviendra une source d'émissions de GES (-34 378 Mg C) et non un puits. Au final, si la superficie brûlée sur le territoire étudié est supérieure à 75 %, les peuplements deviendront naturellement des sources d'émissions à la fin de la simulation.

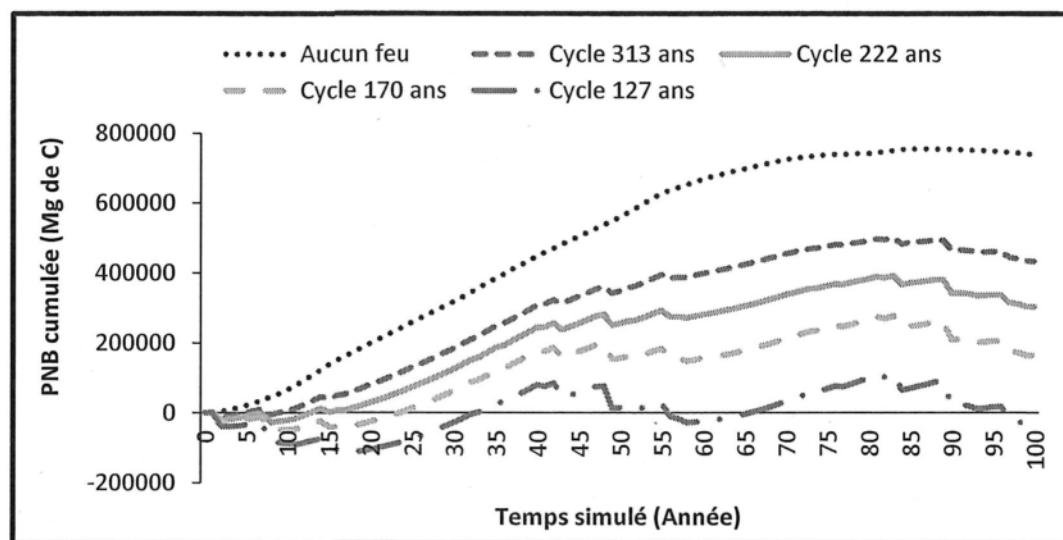


Figure 13 : Productivité nette du biome (PNB) accumulée des peuplements étudiés induite par la variation du cycle de feu : 1-Aucun feu, 2- Cycle 313 ans, 3- Cycle 222 ans, 4- Cycle 170 ans, 5- Cycle 127 ans réalisée avec laide de MBC-SCF3

La figure 14 montre que le feu influence de façon marquée la structure d'âge des peuplements. En effet, au bout de 100 ans l'âge moyen varie beaucoup selon le cycle de feu passant de 125 ans par le cycle de 313 ans à 74 ans pour le cycle de 127 ans.

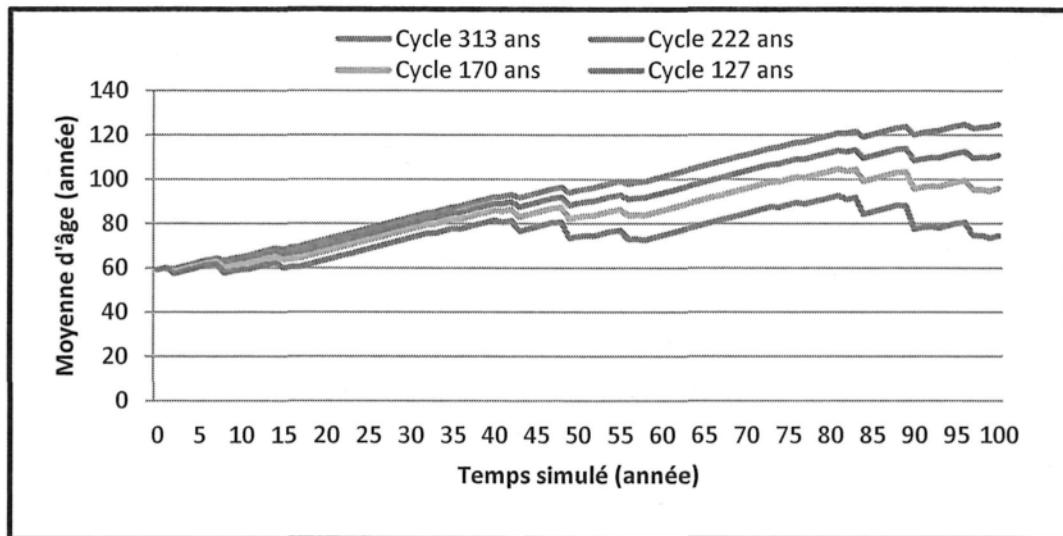


Figure 14 : L'âge moyen des peuplements étudiés selon quatre cycles de feu simulés en fonction du temps réalisée à l'aide de MBC-SCF3.

3.3.3 Variation des règles de régénération

La figure 15 montre que la modification des changements dans la régénération des peuplements augmente la quantité de carbone qu'ils auraient accumulé à 325 042 Mg C, soit une augmentation de 7 %.

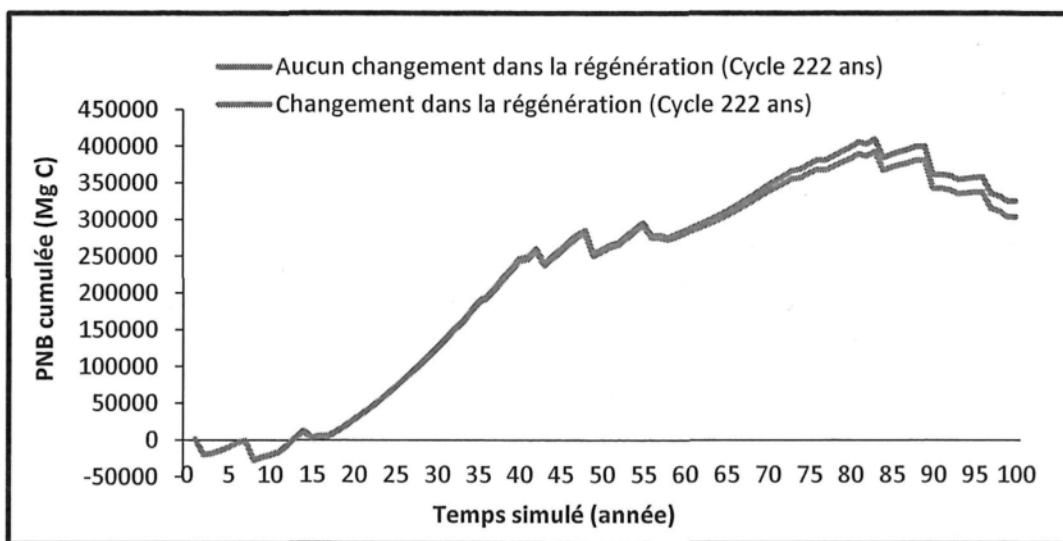


Figure 15 : Productivité nette du biome (PNB) accumulée des peuplements étudiés, ayant subi un cycle de feux de 222 ans et des changements dans la régénération réalisée à l'aide de MBC-SCF3.

3.4 Puits de carbone par unité électrique

En utilisant l'équation 2, le puits de carbone forestier créé par le réservoir Eastmain-1 serait de 4 ± 2 g eq. CO₂ /kWh.

CHAPITRE 4 : DISCUSSION

4 DISCUSSION

4.1 Stocks de carbone à l'année 0

Les résultats des stocks de carbone à l'année 0 sont comparables aux résultats du travail de Paré et al. (2011) réalisés à partir de sites avoisinants. En effet, la quantité de matière organique morte obtenue lors de la simulation (108 Mg C ha^{-1}) est comparable à celle obtenue par Paré et al. en 2011 (79 Mg C ha^{-1}). En fait, il y a une différence de 29 Mg C ha^{-1} en faveur de la simulation. Toutefois, lorsqu'on compare le taux annuel d'accumulation de litière au sol ($1,5 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$) à la première année de simulation (moyenne d'âge des peuplements de 59 ans) avec les résultats de Paré et al. en 2011 ($1,4 \pm 0,2 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$), dont la moyenne d'âge des peuplements est de 41 ans, ceux-ci sont similaires. En conséquence, si l'on projette dans le temps l'accumulation de litière au sol des peuplements de Paré et al. (2011) jusqu'à 59 ans de moyenne d'âge, il y aurait un potentiel d'accumulation de $25 \pm 4 \text{ Mg C ha}^{-1}$. Ainsi, cette accumulation ramènerait les stocks de carbone de Paré et al. (2011) à $104 \pm 4 \text{ Mg de C ha}^{-1}$. En somme, les stocks de carbone avant ennoiement estimé avec l'aide du MBC-SCF3 correspondent aux observations-terrain de Paré et al. (2011).

La proportion de carbone retrouvé dans la matière organique morte est de 81 %, comparativement à 19 % dans la biomasse. Ces résultats sont comparables à ceux obtenus par Moroni et al. (2010) et par Bergeron et al. (2007) qui suggèrent qu'en forêt boréale la matière organique morte constitue entre 67 % et 86 % du carbone total, et ce, indépendamment de l'âge et des conditions de croissance (sol, drainage, latitude, etc.).

4.2 Les flux de carbone

Il a été intéressant de constater que les valeurs obtenues de PPN, RH, PNE sont dans les ordres de grandeur de l'information contenue dans la littérature scientifique. En fait, les légères variations peuvent être expliquées par le fait que le logiciel sous-estime de 10 % l'accroissement net en biomasse (Bernier et al., 2010) ainsi que par une différence, avec les autres études, dans la structure de l'âge et de la végétation. Néanmoins, cette variation est englobée par l'intervalle de confiance du cycle de feu de Bergeron et al. (2010).

Les résultats obtenus pour la PPN ($2,1 \pm 0,1 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$) sont comparables à la littérature. En effet, Luyssaert et *al.* (2007) ont quantifié la PPN de la forêt boréale semi-aride avec des bases de données provenant de tour à flux à l'échelle circumboréale et ont obtenu, en moyenne, un flux de $3,3 \pm 0,6 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$. Plus près de la région étudiée, Bergeron et *al.* (2007) ont déterminé que près de Chibougamau les peuplements denses d'épinette noire âgés de 91 ans avaient une PPN de $5,84 \pm 0,07 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$. La différence entre les résultats peut être expliquée par l'âge moyen des peuplements et par une plus faible productivité (IQS faible) de notre territoire. En outre, Bernier et *al.* (2010) évaluent que MBC-SFC3 sous-estime de 10 % l'accroissement net en biomasse, ce qui augmenterait théoriquement la PPN du territoire étudié à $2,3 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$.

Du côté de la PNE ($0,15 \pm 0,08 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$), elle entre dans l'intervalle de confiance suggéré par Amiro et *al.* (2010), Bergeron et *al.* (2007) et Luyssaert et *al.* (2007) qui était de -2,0 à 2,5, 0,04 à 0,3 et de $0,4 \pm 0,3 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$, respectivement. Et sous-jacente à la PNE, la RH ($2,0 \pm 0,1 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$) se rapproche également de la littérature. En effet, Luyssaert et *al.* (2007) présentaient des valeurs de RH de $2,5 \pm 0,3 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ pour ce type de forêt et Bergeron et *al.* (2007), pour le peuplement de Chibougamau⁵, estimait celle-ci à $5,8 \pm 0,1 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$. Ce dernier semble, toutefois, avoir des peuplements beaucoup plus productifs qui engendrent une accumulation de litière beaucoup plus grande et, en conséquence, plus de décomposition. Il est à noter que le réservoir Eastmain-1 n'est pas dans la zone de la forêt productive commerciale.

Au global, les résultats de la simulation du territoire étudié réalisée à l'aide de MBC-SCF3 semblent refléter la réalité. Ainsi, il est raisonnable d'affirmer que la PNB cumulée du territoire simulé serait de 303 489 Mg C et dépendrait principalement du cycle de feu choisi.

4.3 Tests de sensibilité

Trois tests de sensibilité ont été réalisés pour définir la variabilité autour de la simulation : une augmentation et une diminution de 20 % sur les tables de production, les intervalles de

⁵ Environ 300 km au sud sud-est de la centrale Eastmain-1

confiance sur le cycle de feu prévu par Bergeron et al. (2010) et la régénération des peuplements selon certaines conditions.

Suite à cette série de tests, les simulations ont très vite démontré que le cycle de feu crée la plus grande variabilité avec +43 % et -46 %, comparativement à +8 % et -11 % pour les tables de rendement et +7 % pour les changements dans la régénération après 100 ans de simulation. Par conséquent, l'intervalle de confiance qui sera utilisé est celui qui se rattache aux cycles de feu (+43 et -46 %).

Parallèlement à ces résultats, deux autres cycles de feu ont été simulés afin de déterminer le scénario le plus conservateur (sans feu) et le scénario correspondant aux 100 années précédant l'ennoiement du territoire (79 % du territoire qui a brûlé au bout de 100 ans). Ainsi, le résultat de la simulation sans feu suggère que le territoire a une limite d'accumulation de 738 318 Mg de C, soit $0,13 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$. Ce résultat est comparable à la PNE suggérée par la littérature (Amiro et al., 2010; Bergeron et al.; 2007; Luyssaert et al., 2007). En fait, un facteur d'émission calculé à partir de cette valeur permettrait de réaliser un inventaire ou une empreinte carbonique très conservatrice, surestimant sans doute la perte de puits de carbone par l'ennoiement.

En simulant la reproduction sur le prochain siècle du scénario des 100 dernières années, la simulation suggère que le territoire serait une source nette (-34 378 Mg C) et non un puits. En fait, le point de bascule, avec cet agencement de peuplements, apparaît lorsqu'il y a 75 % du territoire qui a brûlé une fois. Il est à noter qu'une simulation sans patron de feu, c'est-à-dire avec un pourcentage de territoire brûlé identique à chaque année, a été réalisée. Le résultat de cette simulation réduit de 5 000 Mg le PNB et donc le patron de feu n'a aucune influence significative dans la simulation.

En résumé, le territoire était vraisemblablement émetteur durant les 100 années avant ennoiement (cycle de 127 ans) et pour les 100 années après l'ennoiement celui-ci n'accumulerait pas plus de 740 000 Mg de C (sans feu). Néanmoins, il est plus probable que, pour les 100 années après ennoiement, celui-ci aurait été un puits d'environ 300 000 Mg C avec un intervalle de confiance variant de 200 000 à 400 000 Mg C ou $4 \pm 2 \text{ g éq. CO}_2/\text{kWh}$.

4.4 Inventaire et tables de production

L'inventaire forestier utilisé dans le cadre de ce travail, réalisé à partir des photographies aériennes de 1999, présentait des résultats similaires à l'inventaire-terrain réalisé en 2006-2007 (Paré et al. 2011). La concordance des deux jeux de données conforte la fiabilité des données écoforestières utilisées comme intrant pour le modèle ainsi qu'à la valeur des résultats issus de la simulation.

Les tables de production ont été estimées à l'aide d'inventaires réalisés juste au sud du territoire à l'étude. En conséquence, les rendements pourraient avoir été légèrement surestimés. Toutefois, le test de sensibilité sur les tables de production a démontré qu'une surestimation de 20 % induit une variation inférieure à l'intervalle de confiance du cycle de feu. Il apparaît en conséquence plus important de se soucier de la variation associée à ce dernier qu'à la variation des tables de production.

Toutefois, l'âge des peuplements peut aussi être une source d'erreur. En effet, l'âge des peuplements photo-interprétés était représenté par des classes d'âge (0, 30, 50, 70, 90 et 120+), ce qui donne un ordre de grandeur et non l'âge exact. Une erreur de classe d'âge aurait donc pu sous-estimer ou surestimer la productivité des peuplements. Toutefois, les meilleurs outils disponibles ont été utilisés ce qui permet d'avoir confiance dans les résultats obtenus. La figure 16 présente l'évolution du volume marchand moyen de l'ensemble des peuplements sur le territoire étudié. Ainsi, on remarque qu'une moyenne de classe 41 ans (Paré et al. 2011) a une productivité inférieure de $20 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ par rapport à une moyenne de classe d'âge de 59 ans (photo-interprétation). En somme, l'âge des peuplements joue un rôle dans la productivité de ceux-ci, mais ne fait pas varier les résultats autant que l'intervalle de confiance du cycle de feu.

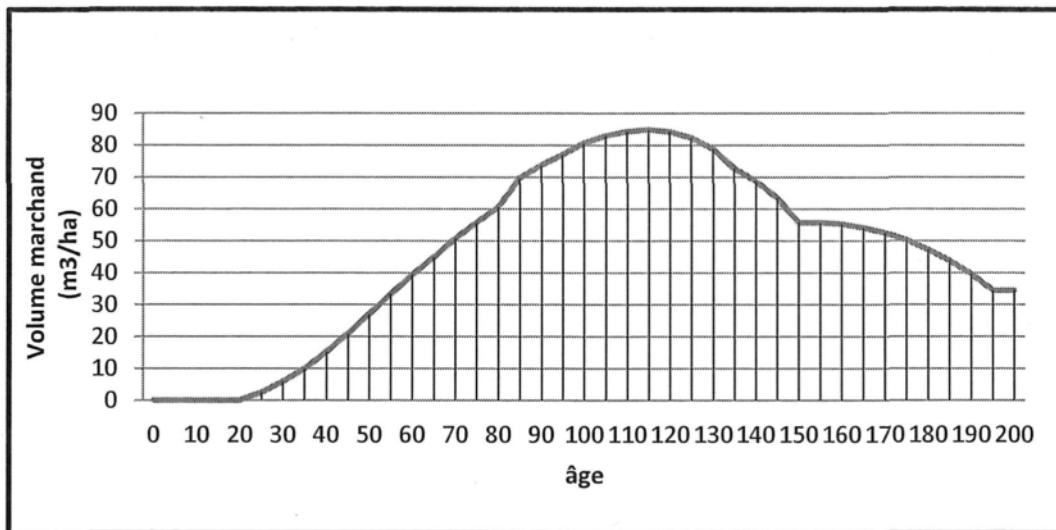


Figure 16 : Évolution du volume marchand moyen de l'ensemble des peuplements en fonction de l'âge obtenu avec l'aide des tables de produit identifiées par Plani-forêt

4.5 Perte de puits de carbone par unité de production électrique

L'évaluation du puits de carbone forestier (4 ± 2 g éq. $\text{CO}_2 \text{ kWh}^{-1}$) modélisé dans cette étude est d'un facteur 4 plus petit que celle évaluée par Teodoru *et al.*, (2012) (12 g éq. $\text{CO}_2 \text{ kWh}^{-1}$), mais se situe toutefois, dans l'intervalle de confiance (perte de puits de carbone de 30 g éq. $\text{CO}_2 \text{ kWh}^{-1}$ et territoire émetteur 5 g éq. $\text{CO}_2 \text{ kWh}^{-1}$) donné par les mêmes auteurs.

Les résultats des flux de carbone (-117 mg C $\text{m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ avec un intervalle de confiance de -250 à 15) obtenus par Teodoru *et al.*, (2012) proviennent de trois années (2006 à 2009) de mesures réalisées avec des tours à flux « Eddy covariance » sur des territoires d'épinette noire à canopée fermée⁶. Ces données ont été complétées par d'autres données de la littérature afin de caractériser les flux de carbone d'un territoire similaire à celui du territoire ennoyé et ne prennent pas en considération l'évolution des peuplements dans le temps, ni la dynamique des feux. Pour ce qui est des émissions liées aux feux de forêt utilisées dans cette étude (21 mg C $\text{m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ avec un intervalle de confiance de 15 à 28 mg C $\text{m}^{-2} \text{ d}^{-1}$), les valeurs proviennent de la littérature. L'incertitude de leurs résultats provient des multiples sources de données utilisées. Ainsi, on peut penser que nos résultats contribuent à diminuer l'incertitude autour des flux de carbone du territoire forestier pour

⁶ Il est à noter que la région étudiée est sans glace 215 jours en moyenne par année (Teodoru *et al.*, 2012).

les 100 prochaines années et, conséquemment, précisent l'intensité carbonique de la production hydro-électrique par la centrale Eastmain-1.

Dans une vision plus globale des émissions naturelles (milieu aquatique, terrestre et humide), Teodoru *et al.*, (2012) suggère que le territoire émet 6 g éq. CO₂ kWh⁻¹ avec un intervalle de confiance variant entre des émissions de 24 g éq. CO₂ kWh⁻¹ et un puits de carbone de 15 g éq. CO₂ kWh⁻¹. Si l'on remplace les résultats du milieu forestier par le nôtre on obtient 3 g éq. CO₂ kWh⁻¹ avec un intervalle de 4 g éq. CO₂ kWh⁻¹ en puits de carbone et 9 g éq. CO₂ kWh⁻¹ en territoire émetteur.

CHAPITRE 5 : CONCLUSION

5 CONCLUSION

Les résultats obtenus indiquent que le territoire forestier ennoyé serait un puits de carbone de l'ordre de $300\,000 \pm 100\,000$ Mg C selon le cycle de feu proposé par Bergeron et al. (2010). Le territoire a été transformé en réservoir pour la production d'électricité, ce qui constitue un changement d'affectation des terres au sens du GIEC. Elle devrait donc figurer dans l'empreinte carbonique d'un kWh produit par Hydro-Québec dans cette centrale selon la norme ISO 14 067 (2012). Cette perte de puits de carbone générée par l'ennoiement du territoire se traduit en un facteur d'émission de 4 ± 2 g d'équivalent CO₂ par kWh attribuable au réservoir Eastmain-1, précisant ainsi les résultats de Teodoru et al., (2012).

Ce facteur d'émission donne un ordre de grandeur de la perte de puits de carbone pour le réservoir Eastmain-1, mais est difficilement transposable sans adaptation à d'autres réservoirs. En effet, la perte de puits de carbone est étroitement reliée à l'emplacement, la superficie du réservoir, à la productivité, au type de peuplement et la structure d'âge de l'écosystème forestier ennoyé et surtout au cycle de feu de la région. Pour des fins d'amélioration, il serait intéressant de réduire l'intervalle de confiance du cycle de feu. Pour ce faire, il faudrait simuler les risques de feux pour les 100 prochaines années pour la zone spécifique au secteur à l'étude.

De plus, les forêts peuvent être perturbées par différent type d'événement. Dans cette étude, il n'y a que les feux qui ont été simulés, mais dans la réalité, bien que l'inventaire ne le mentionne pas, il aurait pu y avoir des ravages d'insectes (Dymond et al., 2010). En fait, ce type de perturbation aurait modifié autrement les flux de carbone. Il serait, donc, intéressant de vérifier l'effet des autres perturbations sur les flux de carbone.

Pour la question des changements climatiques, il serait aussi intéressant d'évaluer le bilan radiatif du territoire en question suite au changement d'affectation des terres. En effet, en hiver les territoires forestiers ont un albédo plus bas (potentiel d'augmentation de température plus élevé) que les étendues d'eau gelées et enneigées. Au contraire, l'été la surface des lacs présente un albédo plus bas qu'une forêt de conifères (Ahrens, 1999). Ce

phénomène pourrait changer le bilan radiatif de la zone étudiée, c'est-à-dire ajouter un facteur de changement climatique à la perte de puits de carbone (Bernier, 2011).

En conclusion, le territoire ennoyé par le réservoir Eastmain-1 occasionne des émissions de carbone supplémentaires de 4 ± 2 g éq. CO₂ pour chaque kWh produit par la centrale Eastmain-1. Ce résultat, en empreinte carbone, n'est pas négligeable, car il représente près de 11 % des émissions⁷ d'une centrale hydro-électrique (33 g éq. CO₂ kWh⁻¹) (Gagnon, 2003). Dans une perspective de cycle de vie⁸ ont obtiendrait donc des émissions de 36 g éq. CO₂ kWh⁻¹.

En regard de ces résultats, il convient de recommander que le bilan carbone du changement d'affectation des terres associé à la création d'un réservoir hydroélectrique soit pris en considération dans l'évaluation de l'empreinte carbonique des centrales. De plus, si de tels ouvrages sont mis en place dans la zone boréale où le feu est la principale perturbation, l'intégration de cette perturbation à la modélisation apparaît une pratique incontournable pour connaître les marges d'incertitude des valeurs obtenues par la simulation.

⁷ $4 \text{ g eq. CO}_2 \text{ kWh}^{-1} / (33 \text{ g eq. CO}_2 \text{ kWh}^{-1} + 4 \text{ g eq. CO}_2 \text{ kWh}^{-1}) = 0,11$

⁸ Construction et production électrique (33 g eq. CO₂ kWh⁻¹) additionné au puits de carbone de tous les milieux naturels (3 g eq. CO₂ kWh⁻¹).

RÉFÉRENCES

6 RÉFÉRENCES

- Ahrens, C.D., 1999. Meteorology Today, An introduction to weather climate, and the environment. 6th edition, éditeur Brooks/Cole, Pacific Grove, 624pp.
- Amiro, B.D., Barr, A.G., Barr, J.G., Black, T.A., Bracho, R., Brown, M., Chen, J., Clark, K.L., Davis, K.J., Desai, A.R., Dore, S., Engel, V., Fuentes, J.D., Goldstein, A.H., Goulden, M.L., Kolb, T.E., Lavigne, M.B., Law, B.E., Margolis, H.A., Martin, T., McCaughey, J.H., Misson, L., Montes-Helu, M., Noormets, A., Randerson, J.T., Starr, G., Xiao, J., 2010. Ecosystem carbon dioxide fluxes after disturbance in forests of North America. *Journal of Geophysical Research-Biogeosciences* 115, 13.
- Amiro, B.D., Stocks, B.J., Alexander, M.E., Flannigan, M.D., Wotton, B.M., 2001. Fire, climate change, carbon and fuel management in the Canadian boreal forest. *International Journal of Wildland Fire* 10, 405-413.
- Barton B., McLean D., 1984. Chapter 6: Silviculture, forest management, and the spruce budworm. U.S. Department of Agriculture, Agriculture Handbook 620, DCp. 83-101.
- Bergeron, O., Margolis, H.A., Black, T.A., Coursolle, C., Dunn, A.L., Barr, A.G., Wofsy, S.C., 2007. Comparison of carbon dioxide fluxes over three boreal black spruce forests in Canada. *Global Change Biology* 13, 89-107.
- Bergeron, Y., Cyr, D., Girardin, M.P., Carcaillet, C., 2010. Will climate change drive 21st century burn rates in Canadian boreal forest outside of its natural variability: collating global climate model experiments with sedimentary charcoal data. *International Journal of Wildland Fire* 19, 1127-1139.
- Bergeron, Y., Gauthier, S., Flannigan, M., Kafka, V., 2004a. Fire regimes at the transition between mixedwood and coniferous boreal forest in Northwestern Quebec. *Ecology* 85, 1916-1932.

- Bergeron, Y., M. Flannigan, S. Gauthier, A. Leduc and P. Lefort, 2004b. Past, current and future fire frequency in the Canadian boreal forest: implications for sustainable forest management. *Ambio* 33, 356-360.
- Bergeron, Y., Gauthier, S., Kafka, V., Lefort, P., Lesieur, D., 2001. Natural fire frequency for the eastern Canadian boreal forest: consequences for sustainable forestry. *Canadian Journal of Forest Research-Revue Canadienne De Recherche Forestiere* 31, 384-391.
- Bernier, P.Y., Desjardins, R.L., Karimi-Zindashty, Y., Worth, D.E., Beaudoin, A., Luo, Y., et Wang, S., 2011. Boreal lichen woodlands: A possible negative feedback to climate change in eastern North America. *Agricultural and Forest Meteorology* 151(4), p. 521-528.
- Brown, C. and Johnstone, J.F., 2011. How does increased fire frequency affect carbon loss from fire? A case study in the northern boreal forest. *International Journal of Wildland Fire* 20: 829-837.
- Carlson, M., Chen, J., Elgie, S., Henschel, C., Montenegro, A., Roulet, N., Scott, N., Tarnocai, C., Wells, J., 2010a. Maintaining the role of Canada's forests and peatlands in climate regulation. *Forestry Chronicle* 86, 434-443.
- Chertov, O., Bhatti, J.S., Komarov, A., Mikhailov, A., Bykhovets, S., 2009. Influence of climate change, fire and harvest on the carbon dynamics of black spruce in Central Canada. *Forest Ecology and Management* 257, 941-950.
- Dymond, Caren, Neilson, Eric, Stinton, Graham, Porter, Kevin, MacLean, David, Gray, David, Campagna, Michel, and Kurz, Werner, 2010. Future spruce budworm outbreak may create a carbon source in eastern Canadian forest. *Ecosystems* 13, 917-931.
- Flannigan, M., Logan, K., Amiro, B., Skinner, W., Stocks, B., 2005. Future Area Burned in Canada. *Climatic Change* 72, 1-16.
- Gagnon L., 2003. Comparaison des options de production d'électricité. Hydro-Québec, direction – Environnement, 2002G130-1F. www.hydroquebec.com

- Gagnon, R., Morin, H., 2001. Les forêts d'épinette noire du Québec: dynamique, perturbations et biodiversité. *Naturaliste Canadien* 125, 26-35.
- Girard, F., Payette, S., Gagnon, R., 2009. Origin of the lichen-spruce woodland in the closed-crown forest zone of eastern Canada. *Global Ecology and Biogeography* 18, 291-303.
- Global Carbon Projet, 2011. Carbon Budget 2010. Power point du bilan 10 réalisé le 5 décembre 2011. <http://www.globalcarbonproject.org>
- IPCC, 2003. Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry. Institute for Global Environmental Strategies (IGES), Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- ISO, 2012. Projet de norme internationale ISO/DIS 14067: Empreinte carbone des produits: exigences et lignes directrices pour la quantification et la communication. 56 pages.
- Jasinski, J.P.P. and Payette, S. 2005. The creation of alternative stable states in the southern boreal forest, Quebec, Canada. *Ecological Monographs* 75[4], pp.561-583.
- Kurz, W. A., Dymond, C. C., White, T. M., Stinson, G., Shaw, C. H., Rampley, G. J., Smyth, C., Simpson, B. N., Neilson, E. T., Trofymow, J. A., Metsaranta, J., and Apps, M. J., 2009. CBM-CFS3: A model of carbon-dynamics in forestry and land-use change implementing IPCC standards. *Ecological Modelling* 220, 480-504.
- Kurz, W. A., Dymond, C. C., Stinson, G., Rampley, G. J., Neilson, E. T., Carroll, A. L., Ebata, T., and Safranyik, L., 2008a. Mountain pine beetle and forest carbon feedback to climate change. *Nature* 452, 987-990.
- Kurz, W. A., Stinson, Graham, Rampley, Gregory J., Dymond, Caren C., and Neilson, Eric T., 2008b. Risk of natural disturbances makes future contribution of Canada's forests to the global carbon cycle highly uncertain. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 105, 1551-1555.
- Kurz, W.A., Apps, M.J., 2006. Developing Canada's national forest carbon monitoring, accounting and reporting system to meet the reporting requirements of the Kyoto

- protocol. Springer, Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change 11, 33-43.
- Lauzon È., Bergeron Y., Gauthier S., Kneeshaw D., 2006. Les cycles de feu et l'aménagement forestier : une nouvelle approche pour la forêt boréale canadienne. Réseau de gestion durable des forêts, 20 pages.
- Lavoie, L., Sirois, L., 1998. Vegetation changes caused by recent fires in the northern boreal forest of eastern Canada. Journal of Vegetation Science 9, 483-492.
- Le Goff, H., Flannigan, M.D., Bergeron, Y., 2009. Potential changes in monthly fire risk in the eastern Canadian boreal forest under future climate change. Canadian Journal of Forest Research-Revue Canadienne De Recherche Forestiere 39, 2369-2380.
- Le Goff, H., Flannigan, M.D., Bergeron, Y., Girardin, M.P., 2007. Historical fire regime shifts related to climate teleconnections in the Waswanipi area, central Quebec, Canada. International Journal of Wildland Fire 16, 607-618.
- Luyssaert, S. et al., 2007. CO₂ balance of boreal, temperate, and tropical forests derived from a global database. Global Change Biology 13, 2509-2537.
- Marchand, D., Prairie, Y.T., del Giorgio, P.A., 2009. Linking forest fires to lake metabolism and carbon dioxide emissions in the boreal region of Northern Quebec. Global Change Biology 15, 2861-2873.
- Moroni, M.T., Shaw, C.H., Kurz, W.A., Rampley, G.J., 2010. Forest carbon stocks in Newfoundland boreal forests of harvest and natural disturbance origin II: model evaluation. Canadian Journal of Forest Research -Revue Canadienne De Recherche Forestiere 40, 2146-2163.
- Ministère des Ressources Naturelles (MRN), 2000. Mise à jour, Manuel d'aménagement forestier : Document d'annexes, Annexe 1, Les tables de rendement. Gouvernement du Québec, Ministère des Ressources Naturelles, Québec (Canada).

- Ministère des Ressources naturelles, de la Faune et des Parcs (MRNFP), 2003. Manuel d'Aménagement Forestier, 4^{ième} éd. Gouvernement du Québec, Charlesbourg (Qc), 245 pages.
- Nation Unies, 1992. Convention cadre des Nations Unies sur les changements climatiques. Nations Unies, 25 pages. <http://unfccc.int>
- Pan, Y., Birdsey R. A., Fang J., Houghton R., Kauppi P. E., Kurz W. A., Phillips O. L., Shvidenko A., Lewis S. L., Canadell J. G., Ciais P., Jackson R. B., Pacala S. W., McGuire A. D., Piao S., Rautiainen A., Sitch S. & Hayes D., 2011. A Large and Persistent Carbon Sink in the World's Forests. *Science*, 333, 988-993.
- Paré, D., Banville, J.L., Garneau, M., Bergeron, Y., 2011. Soil carbon stocks and soil carbon quality in the upland portion of a boreal landscape. James Bay, Quebec. *Ecosystems* 14:533-546.
- Payette, S., 1992. Fire as a controlling process in the North American boreal forest. In: Shugart, H.H., Leemans, R., Bonan, G.B. (Eds.), *A Systems Analysis of the Global Boreal Forest*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp. 144-169.
- Payette, S., Bhiry, N., Delwaide, A., Simard, M., 2000. Origin of the lichen woodland at its southern range limit in eastern Canada: the catastrophic impact of insect defoliators and fire on the spruce-moss forest. *Canadian Journal of Forest Research* 30, 288-305.
- Pothier, D., Savard, F., 1998. Actualisation des tables de production pour les principales espèces forestières du Québec. Direction des inventeurs forestiers, Gouvernement du Québec. 184 pages.
- Rowe, J. S., and Scotter G. W., 1973. Fire in the boreal forest. *Quaternary Research* 3:444-464.
- Rudolph, T. D. and Laidly, P. R., 1990. Jack pine (*Pinus banksiana* Lamb.). *In Silvics of North America*. Vol. 1, Conifers. Agriculture Handbook 654, Forest Service, U. S. Dept. Agric., Washington DC. pp. 280-293.

Saucier. J.-P., Grondin P., Robitaille A., Gosselin J., Morneau C., Richard P. J.H., Brisson J., Sirois L., Leduc A., Morin H., Thiffault É., Gauthier S., Lavoie C. et Payette S., 2009. « Écologie forestière », dans Ordre des ingénieurs forestiers du Québec, *Manuel de foresterie*, 2^eéd. Ouvrage collectif, Éditions Multimonde, Québec, P. 165-316.

Société d'énergie de la Baie James, 1987. Le défi environnement au complexe hydroélectrique de la Grande Rivière, Montréal, Société d'énergie de la Baie James, 199 p.

Système canadien d'information sur les feux de végétation (SCIFV), 2012. Base de données sur les feux de forêt du Canada. Gouvernement canadien, Ressources Naturelles Canada. http://cwfis.cfs.nrcan.gc.ca/fr_CA/nfdb/poly

Teodoru, C., Bastien, J., Bonneville, M-C., del Giorgio, P., Demarty, M., Garneau, M., Hélie, J-F., Pelletier, L., Prairie, Y., Roulet, N., Strachan, I., Tremblay, A., 2012. The net carbon footprint of a newly created boreal hydroelectric reservoir. Global biogeochemical cycles, vol. 26. 14 pages

Tremblay, A., L. Varfalvy, C. Roehm and M. Garneau (eds.). 2005. Greenhouse gas emissions: fluxes and processes, hydroelectric reservoirs and natural environments. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag.

ANNEXE 1

ANNEXE 1 : Empreinte carbonique de différentes centrales électriques

Ce graphique présente les émissions atmosphériques d'équivalent CO₂ de plusieurs types de centrales, et ce, dans une perspective de cycle de vie. Celui-ci montre que, pour des besoins de pointe et de base, l'hydroélectricité avec réservoir est préférable, au niveau de GES, aux centrales thermiques. Ce type de centrale émet 33 kt éq CO₂ /TWh pour une durée de vie de 100 ans, ce qui est 20 à 30 fois moins qu'une centrale thermique.

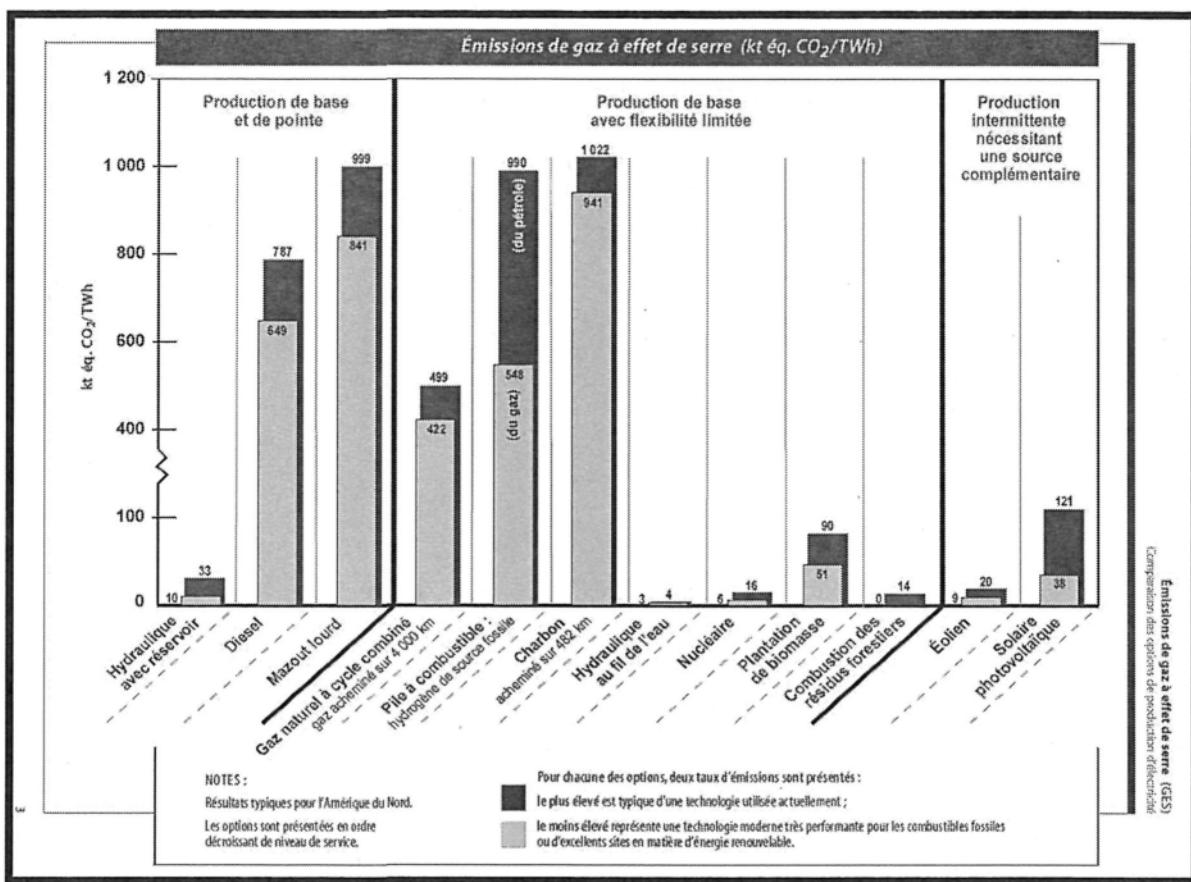


Figure 1 : Émissions de gaz à effet de serre (kt éq CO₂ /TWh) de différentes centrales électriques

ANNEXE 2

ANNEXE 2 : Composition végétale

Photointerprétation

L'inventaire forestier issu de la photointerprétation démontre que le territoire ennoyé compte 2 700 peuplements dominés par six essences différentes; l'épinette noire (*Picea mariana* Mill.), le pin gris (*Pinus banksiana* Lamb.), le mélèze laricin (*Larix laricina* (Du Roi) K. Koch), le sapin baumier (*Abies balsamea* (L.) Mill.), le bouleau à papier (*Betula papyrifera* Marsh) et le peuplier faux tremble (*Populus tremuloides* Michx). La grande majorité du territoire est dominé par deux essences soit environ 50 % d'épinettes noires et 35 % de pins gris. De plus, 23 % du territoire est en régénération, c'est-à-dire que la forêt y est âgée entre 0-30 ans. L'annexe 2 présente un portrait plus complet de la photointerprétation et, aussi, de l'inventaire terrain réalisé par Lagacé-Banville (2009).

Le territoire ennoyé compte 2 700 peuplements dominés par six essences différentes; épinette noire (*Picea mariana* Mill.), le pin gris (*Pinus banksiana* Lamb.), le mélèze (*Larix laricina* (Du Roi) K. Koch), le sapin baumier (*Abies balsamea* (L.) Mill.), le bouleau à papier (*Betula papyrifera* Marsh) et le peuplier faux tremble (*Populus tremuloides* Michx). Premièrement, on remarque (tableau 2) qu'il y a sur le territoire environ 50 % d'épinette noire et 35 % de pin gris. De plus, 23 % du territoire est en régénération, c'est-à-dire âgée entre 0-30 ans.

Tableau 1 : Composition végétale des peuplements modélisés et leurs nomenclatures dans MBC-SCF3

Nomenclature dans MBC-SCF3	Photo-interprétation	Proportion de la superficie (43 161 ha)
Épinette noire	Épinette noire	31,43 %
	Pessière à pin gris	14,23 %
	Pessière à mélèze	1,02 %
	Peupleraie avec épinette	0,42 %
Épinette noire et sapin baumier	Pessière à sapin baumier	1,99 %

Feuillus tolérants	Peuplier faux tremble et bouleau à papier	0,12 %
Peuplier faux tremble	Peuplier faux tremble	0,29 %
Pin gris	Pin gris	9,60 %
	Pinède à épinette noire	9,16 %
Autres résineux	Régénération (pin gris 60 %, épinette noire 26 %, sapin baumier 8 %, mélèze 7 %)	23,07 %
Mélèze	Mélèze	0,30 %
Forêt mixte	Forêt mixte (épinette noire 44 %, bouleau 35 %, pin gris 21 %)	8,37 %

En outre, la moyenne d'âge des peuplements est de 59 ans (figure 1). En fait, les classes d'âge varient énormément selon la superficie (figure 1). On remarque même qu'environ 79 % des peuplements a moins de 100 ans. De plus, la tranche d'âge de 100 à 119 est manquante. En vérité, il est normal que cette classe d'âge manque, car les photointerprètes classifiaient les peuplements dans les barèmes suivants : 30, 50, 70, 90 et 120 ans.

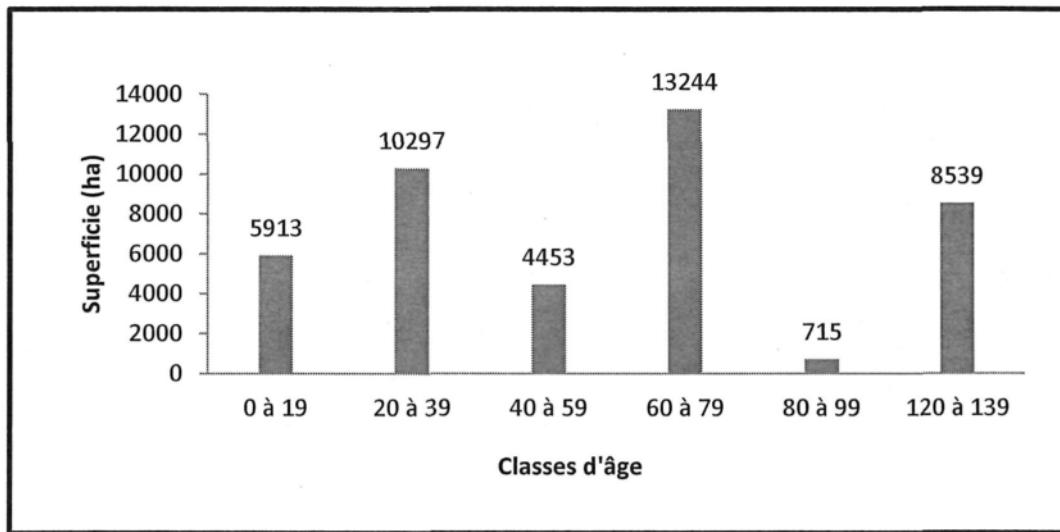


Figure 1 : Classe d'âge des peuplements en fonction de la superficie occupée par ceux-ci

Tableau 2 : Liste des peuplements modélisés

ID Peuplement	Hauteur	Densité	Limite administrative	Éco zone	Tranches d'âge	Superficie (ha)
1BB1PG	4	C	Q	BSE	30	10
2BBE	4	B	Q	BSE	50	24
3BPPBG	4	A	Q	BSE	30	12
4BPPE	5	B	Q	BSE	50	7
5BPPEPG	3	C	Q	BSE	50	12
6BPPG	4	C	Q	BSE	30	4
7BR	0	C	Q	BSE	0	5030
8EBB	4	B	Q	BSE	70	12
9EBB	4	D	Q	BSE	70	14
10EE	4	A	Q	BSE	70	0
11EE	3	B	Q	BSE	120	286
12EE	3	B	Q	BSE	120	50
13EE	3	B	Q	BSE	50	12
14EE	3	B	Q	BSE	70	211
15EE	3	B	Q	BSE	90	35
16EE	4	B	Q	BSE	120	190
17EE	4	B	Q	BSE	30	12
18EE	4	B	Q	BSE	50	70
19EE	4	B	Q	BSE	70	267
20EE	4	B	Q	BSE	90	24
21EE	2	C	Q	BSE	120	12
22EE	3	C	Q	BSE	70	1367
23EE	3	C	Q	BSE	120	938
24EE	3	C	Q	BSE	120	21
25EE	3	C	Q	BSE	40	8
26EE	3	C	Q	BSE	70	568
27EE	3	C	Q	BSE	70	61
28EE	3	C	Q	BSE	70	174
29EE	3	C	Q	BSE	70	5
30EE	3	C	Q	BSE	90	81
31EE	3	C	Q	BSE	90	54
32EE	4	C	Q	BSE	120	1034
33EE	4	C	Q	BSE	120	325
34EE	4	C	Q	BSE	30	10
35EE	4	C	Q	BSE	50	5
36EE	3	C	Q	BSE	70	409
37EE	4	C	Q	BSE	70	19

38EE	4	C	Q	BSE	70	21
39EE	4	C	Q	BSE	90	52
40EE	4	C	Q	BSE	90	21
41EE	5	C	Q	BSE	120	10
42EE	3	D	Q	BSE	70	499
43EE	3	D	Q	BSE	120	2052
44EE	3	D	Q	BSE	120	74
45EE	3	D	Q	BSE	50	15
46EE	3	D	Q	BSE	50	38
47EE	3	D	Q	BSE	70	148
48EE	3	D	Q	BSE	70	445
49EE	3	D	Q	BSE	90	50
50EE	3	D	Q	BSE	90	45
51EE	4	D	Q	BSE	120	1540
52EE	4	D	Q	BSE	120	683
53EE	4	D	Q	BSE	50	107
54EE	4	D	Q	BSE	50	91
55EE	4	D	Q	BSE	70	965
56EE	3	D	Q	BSE	70	302
57EE	4	D	Q	BSE	90	49
58EE	4	D	Q	BSE	0	10
59EE	5	D	Q	BSE	120	12
60EME	3	B	Q	BSE	120	6
61EME	3	B	Q	BSE	120	6
62EME	4	B	Q	BSE	120	7
63EME	3	C	Q	BSE	120	140
64EME	3	C	Q	BSE	120	13
65EME	3	C	Q	BSE	70	11
66EME	3	C	Q	BSE	90	2
67EME	4	C	Q	BSE	120	21
68EME	3	D	Q	BSE	120	99
69EME	3	D	Q	BSE	120	8
70EME	3	D	Q	BSE	70	28
71EME	4	D	Q	BSE	120	93
72EME	4	D	Q	BSE	120	5
73EPE	3	B	Q	BSE	70	58
74EPE	3	C	Q	BSE	70	10
75EPE	4	C	Q	BSE	50	6
76EPE	4	D	Q	BSE	50	10
77EPE	4	D	Q	BSE	50	26

78EPE	4	D	Q	BSE	70	45
79EPE	4	D	Q	BSE	70	31
80EPG	3	B	Q	BSE	120	24
81EPG	3	B	Q	BSE	50	7
82EPG	3	B	Q	BSE	50	11
83EPG	3	B	Q	BSE	70	412
84EPG	3	B	Q	BSE	90	38
85EPG	4	B	Q	BSE	120	17
86EPG	4	B	Q	BSE	30	47
87EPG	4	B	Q	BSE	50	44
88EPG	4	B	Q	BSE	70	227
89EPG	4	B	Q	BSE	70	16
90EPG	3	C	Q	BSE	120	116
91EPG	3	C	Q	BSE	120	10
92EPG	3	C	Q	BSE	50	38
93EPG	3	C	Q	BSE	70	516
94EPG	3	C	Q	BSE	70	17
95EPG	3	C	Q	BSE	90	111
96EPG	3	C	Q	BSE	90	9
97EPG	4	C	Q	BSE	120	47
98EPG	4	C	Q	BSE	30	54
99EPG	4	C	Q	BSE	50	166
100EPG	4	C	Q	BSE	50	6
101EPG	4	C	Q	BSE	70	462
102EPG	4	C	Q	BSE	70	14
103EPG	4	C	Q	BSE	90	6
104EPG	5	C	Q	BSE	120	2
105EPG	3	D	Q	BSE	120	120
106EPG	3	D	Q	BSE	50	51
107EPG	3	D	Q	BSE	50	41
108EPG	3	D	Q	BSE	70	677
109EPG	3	D	Q	BSE	70	81
110EPG	3	D	Q	BSE	90	64
111EPG	3	D	Q	BSE	90	10
112EPG	4	D	Q	BSE	120	26
113EPG	4	D	Q	BSE	30	60
114EPG	4	D	Q	BSE	50	792
115EPG	4	D	Q	BSE	50	276
116EPG	4	D	Q	BSE	70	1311
117EPG	4	D	Q	BSE	70	72

118EPG	5	D	Q	BSE	30	14
119EPG	5	D	Q	BSE	50	1
120ES	3	B	Q	BSE	120	15
121ES	3	B	Q	BSE	30	1
122ES	3	B	Q	BSE	70	45
123ES	3	B	Q	BSE	90	41
124ES	4	B	Q	BSE	50	6
125ES	5	B	Q	BSE	70	6
126ES	3	C	Q	BSE	0	330
127ES	3	C	Q	BSE	120	50
128ES	3	C	Q	BSE	70	72
129ES	3	C	Q	BSE	70	14
130ES	3	C	Q	BSE	70	23
131ES	3	C	Q	BSE	0	37
132ES	4	C	Q	BSE	70	45
133ES	4	C	Q	BSE	70	26
134ES	4	C	Q	BSE	70	16
135ES	3	D	Q	BSE	120	45
136ES	3	D	Q	BSE	120	13
137ES	3	D	Q	BSE	70	20
138EE	4	D	Q	BSE	120	18
139ES	4	D	Q	BSE	70	33
141M6	4	B	Q	BSE	30	30
142M6	0	0	Q	BSE	0	381
143M	5	A	Q	BSE	30	67
144M	5	B	Q	BSE	30	699
145M	5	B	Q	BSE	90	12
146M	3	C	Q	BSE	30	21
147M	5	C	Q	BSE	30	826
148M	5	D	Q	BSE	120	17
149M	5	D	Q	BSE	30	1418
150ME	5	D	Q	BSE	120	9
151MEE	3	C	Q	BSE	120	5
152MEE	3	D	Q	BSE	120	45
153MEE	3	D	Q	BSE	120	18
154MEE	4	D	Q	BSE	120	27
155MEME	3	D	Q	BSE	120	26
156PEBPE	5	B	Q	BSE	50	11
157PEBPE	3	C	Q	BSE	50	16
158PEBPE	3	C	Q	BSE	50	46

159PEBPPG	3	C	Q	BSE	50	14
160PEE	3	D	Q	BSE	70	15
161PEPE	3	A	Q	BSE	50	2
162PEPE	3	C	Q	BSE	70	20
163PEPE	3	D	Q	BSE	70	30
164PEPEE	3	C	Q	BSE	70	22
165PEPEE	3	D	Q	BSE	70	16
166PGE	3	B	Q	BSE	70	13
167PGBP	4	B	Q	BSE	30	10
168PGBP	4	C	Q	BSE	30	7
169PGE	3	B	Q	BSE	120	36
170PGE	3	B	Q	BSE	50	51
171EPG	3	B	Q	BSE	70	450
172PGE	3	B	Q	BSE	70	30
173PGE	4	B	Q	BSE	30	117
174PGE	4	B	Q	BSE	50	56
175PGE	4	B	Q	BSE	70	10
176PGE	3	C	Q	BSE	120	114
177PGE	3	C	Q	BSE	30	15
178PGE	3	C	Q	BSE	50	198
179PGE	3	C	Q	BSE	50	8
180PGE	3	C	Q	BSE	70	565
181PGE	3	C	Q	BSE	90	11
182PGE	4	C	Q	BSE	30	99
183PGE	4	C	Q	BSE	30	27
184PGE	4	C	Q	BSE	50	203
185PGE	4	C	Q	BSE	50	25
186PGE	4	C	Q	BSE	70	91
187PGE	5	C	Q	BSE	70	8
188PGE	3	D	Q	BSE	120	43
189PGE	3	D	Q	BSE	120	49
190PGE	3	B	Q	BSE	50	248
191PGE	3	D	Q	BSE	50	20
192PGE	3	B	Q	BSE	70	573
193PGE	4	D	Q	BSE	30	178
194PGE	4	D	Q	BSE	50	268
195PGE	4	D	Q	BSE	50	33
196PGE	4	D	Q	BSE	70	192
197PGPG	3	A	Q	BSE	70	49
198PGPG	4	A	Q	BSE	30	124

199PGPG	4	A	Q	BSE	50	25
200PGPG	3	B	Q	BSE	30	5
201PGPG	3	B	Q	BSE	50	288
202PGPG	3	B	Q	BSE	70	427
203PGPG	4	B	Q	BSE	30	417
204PGPG	4	B	Q	BSE	50	209
205PGPG	4	B	Q	BSE	70	11
206PGPGBP	4	B	Q	BSE	30	6
207PGPGBP	4	B	Q	BSE	30	27
208PGPG	3	C	Q	BSE	50	105
209PGPG	3	C	Q	BSE	70	235
210PGPG	3	C	Q	BSE	70	4
211PGPG	4	C	Q	BSE	30	416
212PGPG	4	C	Q	BSE	30	10
213PGPG	4	C	Q	BSE	50	98
214PGPG	4	C	Q	BSE	50	32
215PGPG	4	C	Q	BSE	70	18
216PGPG	3	D	Q	BSE	120	5
217PGPG	3	D	Q	BSE	0	125
218PGPG	3	D	Q	BSE	50	27
219PGPG	3	D	Q	BSE	70	394
220PGPG	4	D	Q	BSE	30	579
221PGPG	0	D	Q	BSE	30	9
222PGPG	4	D	Q	BSE	50	140
223PGPG	4	D	Q	BSE	70	33
224R	0	0	Q	BSE	30	933
225R	5	A	Q	BSE	30	27
226R	5	A	Q	BSE	30	9
227R	5	B	Q	BSE	30	218
228R	5	C	Q	BSE	30	295
229R	0	C	Q	BSE	30	44
230R	3	D	Q	BSE	30	68
231R	5	D	Q	BSE	30	3209

Inventaire forestier de Lagacé Banville (2009)

Lagacé-Banville (2009) a étudié les formations végétales représentatives de celles ennoyées par le réservoir Eastmain-1, et ce, à proximité de ce réservoir. En fait, cette étude visait d'abord à quantifier les stocks de carbone des sols et de la litière de cinq principaux types de formations végétales du territoire classifiés à partir d'images SPOT, ainsi que de déterminer les variables écologiques qui influencent les stocks de carbone mesurés.

Lagacé-Banville (2009) a identifié sur le territoire cinq formations végétales :

- 1- Conifères à canopée ouverte (CO) : cette formation végétale est composée de 78 % d'épinettes noires et de 22 % de pins gris.
- 2- Conifères à canopée fermée (CF) : cette formation végétale est composée de 75 % d'épinettes noires et de 25 % de pins gris.
- 3- Feuillus (FEUIL) : la forêt de feuillus est un mélange de peupliers faux-tremble et de bouleaux à papier.
- 4- Feux anciens (FA) : la formation végétale d'anciens feux représente la régénération des peuplements de plus de 15 ans et est composée de 70 % de pins gris, de 20 % d'épinettes noires et de 10 % d'éricacées.
- 5- Feux récents (FR) : la formation végétale de récents feux représente la régénération des peuplements de moins de 15 ans et est composée de 45 % de pins gris, de 22 % d'épinettes noires et de 33 % d'éricacées.

Le tableau 2 présente une synthèse des caractéristiques liées aux formations végétales identifiées par Lagacé-Banville (2009). Celui-ci montre que 84 % du territoire est recouvert de formations d'épinettes noires et de pins gris. De plus, on y voit que la régénération des territoires brûlés est résineuse avec une dominance de pins gris et que l'âge moyen des peuplements est de 41 ans. Par ailleurs, on remarque une évolution des proportions d'épinettes noires en fonction des classes d'âge. Plus les peuplements sont âgés, plus la proportion d'épinettes noires est importante. Pour ce qui est des formations de feuillus, elles ne représentent que 8 % du territoire. En somme, le territoire présente des peuplements relativement jeunes dus aux feux et celui-ci est dominé par des espèces résineuses.

Par ailleurs, le territoire étudié a accumulé un total de 18 700 000 Mg de carbone soit 79 Mg de C par ha. Plus précisément, les formations végétales CO, CF, FEUIL, FA, FR ont accumulé respectivement 83 Mg ha⁻¹, 122 Mg ha⁻¹, 127 Mg ha⁻¹, FA 61 Mg ha⁻¹ et 63 Mg ha⁻¹ dans les sols et la litière.

Tableau 2 : Synthèse des caractéristiques des formations végétales identifiées par Lagacé-Banville (2009) où É.N. est de l'épinette noire, P.G. est du pin gris, B.P. est du bouleau à papier, P.F-T peuplier faux-tremble et É. éricacée

Formations végétales	Caractéristiques	Proportion de la superficie (24 340 ha)	Âge moyen (an)	C (Mg)
CO	78 % É.N. 22 % P.G.	40 %	76	8 200 000
CF	75 % É.N. 25 % P.G.	1 %	52	300 000
FEUIL	B.P. et P.F-T	8 %	32	2 500 000
FA	20 % É.N. 70 % P.G. 10 % É	40 %	18	6 000 000
FR	22 % É.N. 45 % P.G. 33 % É	11 %	2	1 700 000

Le taux d'accumulation de litière au sol a été estimé en moyenne à $1,4 \pm 0,2$ Mg C ha⁻¹ an⁻¹ (tableau 3). De plus, on remarque dans ce tableau que la formation FEUIL a le taux d'accumulation de litière le plus élevé suivi de très près par CF. Toutefois, ces deux formations végétales sont peu présentes sur le territoire (9 %). Ensuite, c'est la formation de CO qui a le taux d'accumulation le plus élevé suivi de loin par FA. Ces deux formations représentent 80 % du territoire et ont un taux d'accumulation variant de la moitié au tiers de la formation FEUIL et de CF. En effet, la densité de ces formations est plutôt faible due aux jeunes âges et à l'ouverture des peuplements. Ceci génère donc moins de litière qui s'accumule chaque année. La formation FR présente pour ces mêmes raisons les apports annuels de litière les plus faibles, d'un ordre de grandeur inférieur aux formations FEUIL et CF.

Tableau 3 : Apports annuels de litière au sol des cinq formations végétales, tiré de Lagacé-Banville (2009)

Formations végétales	Apports annuels de litière (Mg C ha⁻¹ an⁻¹)
CO	1,6 ± 0,2
CF	2,8 ± 0,2
FEUIL	3,0 ± 0,5
FA	1,0 ± 0,2
FR	0,26 ± 0,07

ANNEXE 3

ANNEXE 3 : Présentation de MBC-SCF3

L'information de base utilisée par MBC-SCF3 pour simuler la croissance des peuplements est la table de production. Cette information permet au logiciel de déterminer le volume marchand des peuplements chaque année pour ensuite transformer celui-ci en biomasse. Plus précisément, il utilise des équations développées par Boudewyn et al. (2007) pour estimer tous les réservoirs de biomasse aérienne à partir des tables de production.

Tout d'abord, la tige et l'écorce de l'arbre sont séparées en deux réservoirs. Par la suite, le haut de la tige et la souche sont séparés et assignés comme « autre tige et écorce ». Ensuite, le logiciel attribue une portion de la biomasse de la tige comme étant un réservoir non commercial. Puis, il crée un réservoir pour les banches, les feuilles, les jeunes pousses et les autres réservoirs de bois (figure 8).

Par la suite, la biomasse aérienne est convertie en carbone à l'aide du facteur de conversion 0,5 g C/ g de Matthews (1993) et Lamliom and Savidge (2003). Pour finir, le carbone racinaire est évalué à l'aide du carbone aérien et des équations de Li et al. (2003).

Pour ce qui est de la sénescence, la matière organique morte ne fait pas partie des inventaires forestiers (Kurz et al., 2009). En effet, il ne prend pas en compte les quantités de carbones initiales stockées dans les réservoirs de matières organiques mortes (MOM). Pour contrer ce problème, MBC-SCF3 utilise une approche par simulation afin de déterminer les réservoirs de MOM dans chaque peuplement enregistré (Kurz et al., 2009). Ainsi, la taille et les dynamiques des réservoirs de MOM sont liées au stade de développement du peuplement, et aussi, à son historique de perturbation et d'aménagement. De ce fait, le logiciel simule le stock initial via les informations fournies par la matrice d'inventaire et des tables de production ainsi que des associations des peuplements inventoriés avec ceux du logiciel.

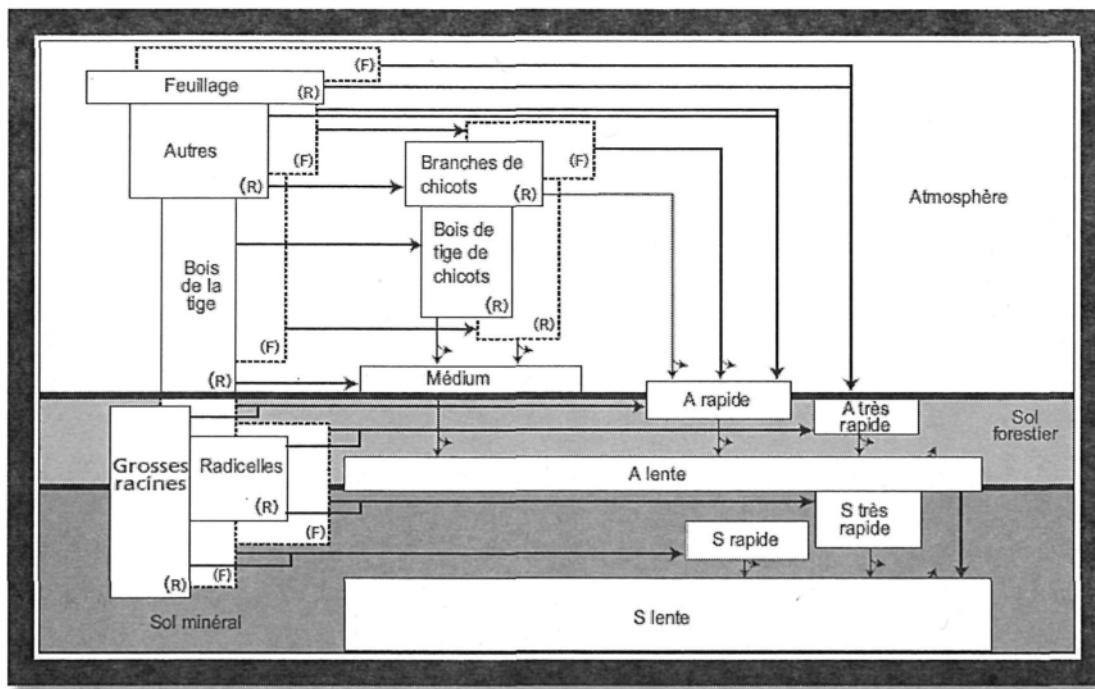


Figure 1 : Réservoirs de carbone d'un arbre et du sol qui l'entoure ainsi que les vitesses de décomposition où : résineux (R), feuillus (F), aérienne (A), souterraine (S). Schéma tiré du manuel d'utilisation.

Les informations relatives aux perturbations ont été entrées à deux endroits : dans la matrice d'inventaire pour déterminer les stocks de carbone initiaux présents dans le sol et dans la matrice « événements de perturbations » pour déterminer les changements futurs.

Dans cette dernière, on doit y indiquer les règles de perturbation. En effet, c'est là où l'on intègre les conditions d'admission des peuplements, en âge, la hiérarchie d'application des perturbations et la proportion perturbée. Pour notre part, des peuplements de tout âge pouvaient être perturbés et comme la régénération des peuplements brûlés est dirigée vers de nouveaux peuplements créés à cette fin, le module de hiérarchie de perturbation ne s'appliquait pas.

Durant la simulation, la matrice d'événement de perturbation dirige les émissions et l'accumulation de la matière organique morte dues aux perturbations. Pour ce faire, les facteurs de conversion et d'émission par défaut ont été utilisés et ceux-ci sont une

agrégation de données qui proviennent de différentes sources « national forest inventory, fire weather information, and the Boreal Fire effects model ».

Dans MBC-SCF3, la régénération est modélisée à l'aide d'une matrice de transition qui permet d'établir les règles de postperturbation. Ces règles sont : la tranche d'âge et le pourcentage auquel la nouvelle régénération est appliquée et le délai de régénération. Toutefois, le logiciel ne simule aucun effet de la perturbation sur la croissance des survivants. En effet, si le peuplement n'est pas tué au complet par la perturbation les arbres survivants touchés par celle-ci croîtront selon les mêmes tables de production. Ainsi, comme la régénération à l'année zéro était similaire aux peuplements en place aucun changement dans la végétation et la productivité n'a été appliqué. Néanmoins, un test de sensibilité a été réalisé sur le sujet afin d'évaluer les variations possibles.