



Élaboration d'un module de dynamique du carbone dans les tourbières boisées pour le Modèle du bilan du carbone du secteur forestier canadien

**Kara Webster
Clement Akumu
Jagtar Bhatti
Kelly Bona
Dimitre Dimitrov
Arlene Hilger
Werner Kurz
Cindy Shaw
Clarissa Theriault
Daniel Thompson
Stephanie Wilson**

**Ressources naturelles Canada
Service canadien des forêts**

**Rapport de l'atelier
10 – 11 septembre, 2014
Centre de foresterie du Nord
Edmonton (AB)**

Rapport d'information GLC-X-14F



Élaboration d'un module de dynamique du carbone dans les tourbières boisées pour le Modèle du bilan du carbone du secteur forestier canadien—Rapport de l'atelier.

K.L. Webster et al.

Publié par :
Ressources naturelles Canada
Service canadien des forêts
Centre de foresterie des Grands Lacs,
1219, rue Queen Est
Sault Ste. Marie (Ontario) P6A 2E5

Rapport d'information : GLC-X-14F
2016

Catalogage avant publication de Bibliothèque et Archives Canada

Élaboration d'un module de dynamique du carbone dans les tourbières boisées pour le Modèle du bilan du carbone du secteur forestier canadien – Rapport de l'atelier.

(Rapport d'information : GLC-X-14F)

Publié aussi en anglais sous le titre : Development of a forested peatland carbon dynamics module for the Carbon Budget Model of the Canadian Forest Sector – Workshop Report
"K.L. Webster, et al."

Monographie électronique en format PDF.
Comprend des références bibliographiques.
ISBN 978-0-660-04886-4
No de cat. : Fo123-2/14-2016F-PDF

Le contenu de cette publication ou de ce produit peut être reproduit en tout ou en partie, et par quelque moyen que ce soit, sous réserve que la reproduction soit effectuée uniquement à des fins personnelles ou publiques mais non commerciales, sans frais ni autre permission, à moins d'avis contraire.

On demande seulement :

- de faire preuve de diligence raisonnable en assurant l'exactitude du matériel reproduit;
- d'indiquer le titre complet du matériel reproduit et le nom de l'organisation qui en est l'auteur;
- d'indiquer que la reproduction est une copie d'un document officiel publié par Ressources naturelles Canada (RNCan) et que la reproduction n'a pas été faite en association avec RNCan ni avec l'appui de celui-ci.

La reproduction et la distribution à des fins commerciales sont interdites, sauf avec la permission écrite de RNCan. Pour de plus amples renseignements, veuillez communiquer avec RNCan à droitdauteur.copyright@rncan-nrcan.gc.ca.

©Sa Majesté la Reine du Canada, représentée par le ministre de Ressources naturelles Canada, 2016

Table des matières

| | |
|---|---------------|
| Liste des tableaux | vi |
| Liste des figures | vii |
| 1. Sommaire | - 1 - |
| 2. Introduction et contexte | - 2 - |
| 2.1 Introduction | - 2 - |
| 2.2 Questions et objectifs scientifiques principaux | - 9 - |
| 2.3 Orientation du modèle | - 9 - |
| 2.4 Stratégie globale du projet (approche par étapes) | - 9 - |
| 2.5 Principaux éléments livrables du projet | - 10 - |
| 3. Questions relatives à la détermination de la portée | - 10 - |
| 3.1 Échelle temporelle | - 10 - |
| 3.2 Échelle spatiale et approche | - 10 - |
| 4. Classification des tourbières | - 11 - |
| 4.1 Le continuum aquatique à terrestre | - 11 - |
| 4.2 Initiation et diversification des tourbières | - 11 - |
| 4.3 Système de classification des tourbières..... | - 14 - |
| 4.4 Catégories cartographiables et importantes | - 15 - |
| 5. Principaux processus et examen du modèle | - 15 - |
| 5.1 Points communs et différences entre les systèmes forestiers et les systèmes de tourbières en matière de modélisation du C..... | - 15 - |
| 5.2 Connaissances découlant de modèles de tourbières existants..... | - 16 - |
| 6. Étude de définition du modèle et liens avec le MBC-SFC | - 19 - |
| 6.1 Version actuelle du MBC-SFC..... | - 19 - |
| 6.2 Prochaine génération du MBC-SFC..... | - 21 - |
| 6.3 Approche et intégration modulaires globales | - 21 - |
| 6.4 Résumé des catégories de modélisation | - 22 - |
| 6.5 Résumé du module sur les tourbières | - 22 - |
| 6.6 Exécution du module sur les tourbières | - 24 - |
| 7. Couches spatiales | - 27 - |
| 7.1 Quantité d'information et adéquation à la tâche..... | - 27 - |

| | |
|---|---------------|
| 8. Bibliothèque de données sur les parcelles pour l'initialisation du modèle, la vérification des liens, l'étalonnage et l'évaluation..... | - 34 - |
| 9. Évaluation du modèle et analyses d'incertitude | - 38 - |
| 10. Activités prévues à l'étape 1 (1^{re} et 2^e années)..... | - 39 - |
| 10.1 Base de données spatiales des types de tourbières..... | - 39 - |
| 10.2 Bases de données de terrain sur les sources ponctuelles et zones de validation des données..... | - 39 - |
| 10.3 Module | - 39 - |
| 10.4 Distribution spatiale des catégories de terres humides et facteurs d'émission | - 39 - |
| 10.5 MCaT avec simulation de nappe phréatique statique..... | - 40 - |
| 10.6 Documentation du modèle et publication des résultats..... | - 40 - |
| 11. Activités de l'étape 2 (3^e année) | - 40 - |
| 11.1 MCaT avec simulation de nappe phréatique dynamique..... | - 40 - |
| 11.2 Pergélisol..... | - 40 - |
| 11.3 Données d'activités..... | - 40 - |
| 11.4 Représentation des perturbations anthropiques et naturelles..... | - 40 - |
| 11.5 Estimations des émissions et éliminations nationales de C dans les tourbières..... | - 41 - |
| 11.6 Documentation du modèle et publication des résultats..... | - 41 - |
| 12. Remerciements..... | - 41 - |
| 13. Références citées..... | - 42 - |

Liste des tableaux

Tableau 1. Résumé des caractéristiques des modèles de tourbières généralement utilisés.

Tableau 2. Résumé des ensembles et composants de données spatiales saisies à partir des couches de données et classement de leur utilité pour ce projet. Un « X » indique que l'ensemble de données comporte des renseignements répondant à nos critères. Utilité de l'ensemble de données pour ce projet : « élevée » représente les ensembles de données dont la note est comprise entre 11 et 14, « moyenne » représente les ensembles de données dont la note est comprise entre 7 et 10 et « faible » les ensembles de données dont la note est inférieure à 7.

Tableau 3. Résumé des ensembles de données de source ponctuelle sur le terrain, composants à saisir dans la base de données et classement du contenu d'information et de l'utilité des données pour ce projet. Un « X » indique que l'ensemble de données a été examiné et qu'il comporte des renseignements répondant à nos critères. Le nombre dans la colonne « classement de la valeur potentielle » est le nombre de « X » calculés pour une source et représente l'étendue des types de données au sein d'une source.

Tableau 4. Liste des sites d'évaluation, leurs emplacements, leurs types de tourbières et leurs données.

Liste des figures

- Figure 1. L'étendue des tourbières du Canada dans la zone boréale (Source : cartographie de l'International Boreal Conservation Campaign, Tarnocai et al. 2002).
- Figure 2. Densité du C du sol au Canada (Source : Tarnocai et Lacelle 1996).
- Figure 3. L'étendue du pergélisol du Canada dans la zone boréale (Source : cartographie de l'International Boreal Conservation Campaign, Brown 1998).
- Figure 4. Vulnérabilité du carbone du sol par rapport aux changements climatiques (Source : Tarnocai 2006).
- Figure 5. Types de tourbières dominants au Canada (Source : Tarnocai et al. 2011).
- Figure 6. La transition des zones d'eau libre en forêt selon les types de tourbières (Source : Smith, publication non datée).
- Figure 7. Figure 7. Processus de développement des tourbières par terrestrialisation et paludification (Source : Klinger 1996).
- Figure 8. La hiérarchie de classification de l'Inventaire canadien des terres humides avec les catégories principales en bleu, les modificateurs en blanc et les catégories secondaires en jaune (Source : Environnement Canada 2012).
- Figure 9. Principaux réservoirs et flux des tourbières (Source : Jagtar Bhatti).
- Figure 10. Structure de réservoir simplifiée du MBC-SFC3.
- Figure 11. Éléments du SNSCPFCF (Source : Groupe de travail chargé de la comptabilisation du carbone du SCF).
- Figure 12. Structure spatiale au sein du MBC-SFC3 (Source : Groupe de travail chargé de la comptabilisation du carbone du SCF).
- Figure 13a. La structure de modélisation du Modèle canadien en matière de tourbières (MCA_T) version 1 avec une nappe phréatique statique (jaune), avec une structure simplifiée du Modèle du bilan du carbone du secteur forestier canadien (MBC-SFC3) (bleu). Les ellipses représentent les données d'entrée qui alimentent le modèle. La rangée de cases du haut représente les réservoirs de biomasse et toutes les cases en dessous représentent les réservoirs de matières organiques mortes (MOM) ou de tourbes (acrotelme et catotelme). Les flèches grises représentent les transferts de C à l'intérieur et à l'extérieur des réservoirs de biomasse en raison de la croissance ou de la mortalité, respectivement. Les autres transferts directs de C proviennent des tourbes (acrotelme et catotelme) et passent des réservoirs de tourbes au réservoir de produits de tourbe. Les flèches noires représentent le C prélevé d'un réservoir de MOM ou de tourbes en raison de la décomposition, et le sort de ce C qui est émis en tant que

CO₂ (flèches courbées) (ou méthane dans le cas des tourbes catotelmes) ou transféré (flèche droite) vers les réservoirs en aval. Les modificateurs de climat peuvent donner des informations sur la croissance, la mortalité et les fonctions de décomposition de tout réservoir du MCaT et les perturbations peuvent avoir des répercussions sur le MCaT et le MBC-SFC3. AG, aérienne; MAT, température moyenne annuelle; PPT, précipitation; Vfast, très rapide.

Figure 13b. La structure de modélisation du Module canadien en matière de tourbières (MCaT) version 2 avec une nappe phréatique dynamique. La structure est la même que celle du MCaT avec une nappe phréatique statique (Figure 2) avec l'ajout d'une nappe phréatique variable (flèche bidirectionnelle bleue) qui peut être influencée par les modificateurs édaphiques et climatiques (flèche brune). Les changements au sein de la nappe phréatique influencent à leur tour les modificateurs de la nappe phréatique (flèche bleue fine) en matière de productivité. Se référer à la Figure 6 pour plus de détails sur la mise en œuvre d'une nappe phréatique variable.

Figure 14. Zone pilote (rectangle aux frontières de l'Alb. et de la Sask.) demandée à Ducks Unlimited et étendue de leur carte sur l'ensemble de l'Ouest du Canada.

1. Sommaire

Ce projet sur trois ans, financé par RNCAN, a pour but d'élaborer un module simplifié sur la dynamique du carbone des tourbières qui s'intégrera au Modèle du bilan du carbone du secteur forestier canadien (MBC-SFC) national. Le module, Modèle canadien en matière de tourbières (MCA_T), permettra d'améliorer notre compréhension de la dynamique du carbone afin de documenter les estimations sur le bilan du carbone et les rapports sur les émissions et éliminations du carbone dans les tourbières. Le module sera fondé sur la connaissance des principaux processus de cycle du carbone des différents types de tourbières (c.-à-d. tourbière basse, bogue et marécage), et simulera la dynamique du carbone par l'intermédiaire d'approches de modélisation basées sur le processus et sur les données empiriques. Le module sera conçu pour être en conformité avec la future structure du MBC-SFC (MBC-SFC4). L'élaboration du module est réalisée en parallèle des synthèses des couches de données spatiales et des bases de données sur les tourbières afin de délimiter les principaux types de tourbières au Canada, leurs propriétés et les valeurs des paramètres clés.

L'élaboration du MCA_T reconnaît les processus uniques qui influencent le cycle du carbone dans les tourbières, entraînant des émissions de carbone dans l'atmosphère et l'élimination de celui-ci. Cela comprend la présence de couches de sol organique profondes (tourbe), l'influence d'une nappe phréatique variable sur la teneur en oxygène, et les nouveaux réservoirs de biomasse qui ne sont pas encore modélisés dans les systèmes forestiers des hautes terres (c.-à-d., mousse, carex, arbustes). En plus de l'émission et de l'élimination du dioxyde de carbone, les émissions de méthane produites par la décomposition anaérobie du sol organique et les éliminations de méthane provenant de l'oxydation seront simulées dans le MCA_T.

La mise en œuvre du projet suivra deux étapes. Au cours de l'étape 1, les bases de données spatiales seront compilées pour fournir les couches des « meilleures données spatiales disponibles » pour le modèle. Pour l'étalonnage et l'évaluation du module, des bases de données de terrain seront compilées. L'approche conceptuelle sous-jacente aux algorithmes du module sera décrite dans un document de conception du module. Ces algorithmes seront ensuite programmés et testés dans des paysages choisis. Les exécutions initiales du module utiliseront une nappe phréatique statique (c.-à-d., profondeur moyenne de la couche aérobie pour chaque type de tourbière et chaque écozone) et ne prendront pas en compte les perturbations. Dans le cadre d'une activité connexe, des estimations nationales de base sur les émissions et les éliminations du carbone atmosphérique des tourbières seront réalisées à l'aide des informations des ouvrages existants sur la séquestration du dioxyde de carbone et les taux d'émission du méthane, combinées avec la base canadienne de données sur les tourbières précisant les types de tourbières.

Au cours de l'étape 2, l'élaboration du MCA_T se poursuivra dans le but de traiter : a) l'inclusion d'une nappe phréatique dynamique à l'aide des liens entre la profondeur de la nappe phréatique et les facteurs météorologiques et de terrain; b) la réaction de la dynamique du carbone du sol à l'humidité et aux conditions de température; c) les perturbations (p. ex., incendies, insectes, dégel du pergélisol, réservoirs hydroélectriques, exploitation, etc.). L'inclusion des données sur les perturbations nécessitera de rassembler davantage de données et de résumés sur les activités des perturbations et le paramétrage des matrices sur les perturbations qui décrivent les répercussions sur chaque réservoir de carbone pour chaque type de perturbation.

Ces travaux contribueront à comprendre la variation naturelle des écosystèmes des tourbières et la vulnérabilité des stocks de carbones de la région boréale liée aux perturbations naturelles et anthropiques et aux changements climatiques. L'intégration des connaissances sur les types fonctionnels principaux de tourbières, leur dynamique et leur répartition du carbone dans le paysage permettra d'améliorer les estimations des émissions et des éliminations du gaz à effet de serre, à l'échelle nationale. Les résultats attendus de ces travaux seront les suivants :

1. une meilleure compréhension de la dynamique du carbone dans les forêts sur les sols organiques et les tourbières boréales, notamment les tourbières pergélisolées et leur répartition nationale;
2. des estimations nationales sur les émissions et les éliminations de dioxyde de carbone, de méthane et (en cas d'incendie) de N_2O qui intègrent les différents types de tourbières forestières et leurs bilans de gaz à effet de serre, en fonction du climat de la région;
3. une meilleure connaissance des effets des perturbations causées par les activités humaines et les changements climatiques sur les bilans de carbone des tourbières forestières;
4. l'identification des données clés et des lacunes en matière de connaissances contribuant à l'incertitude dans les estimations des bilans de carbone des tourbières.

2. Introduction et contexte

2.1 Introduction

Au sein de l'écosystème boréal, les zones de tourbières et les zones boisées sont entrecoupées dans le paysage. Les tourbières occupent les zones les plus humides et sont caractérisées par un déclin du couvert forestier et des hausses de la profondeur de la couche organique (> 40 cm). Le continuum des tourbières et des forêts passe de types de végétation caractérisés par les forêts sur des sols minéraux avec de profondes couches organiques (0 à 40 cm de profondeur) à des tourbières (tourbe de plus de 40 cm de profondeur) qui sont boisées (couverture >25 %), arborées (couverture <25 %), et à des tourbières plus ouvertes dominées par la mousse, des arbustes et du carex. Ces écosystèmes sont un élément important de la zone boréale du Canada, ayant une grande superficie ($1050 \times 10^3 \text{ km}^2$; Kurz et al. 2013; Figure 1) et fournissant d'importants services à l'écosystème (p. ex., stockage de l'eau, habitat de la faune et séquestration de carbone). Les sols organiques de la zone boréale contiennent à eux seuls 137 Pg de carbone organique (CO) (Kurz et al. 2013), représentant environ 67 % de l'ensemble du CO des tourbières stocké au Canada (Tarnocai 2006; Figure 2). Environ 30 % du carbone des sols organiques des tourbières de la zone boréale est contenu à l'intérieur des tourbières pergélisolées (Kurz et al. 2013; Figure 3).

L'importance des tourbières boréales dans l'équilibre du carbone au Canada et dans le monde est reconnue depuis des années, mais nous avons toujours une mauvaise compréhension de la répartition des tourbières dans le paysage et de leur bilan net des gaz à effet de serre à l'échelle nationale. À l'aide d'une approche simpliste d'estimation du bilan des gaz à effet de serre des tourbières du Canada, Kurz et al. (1992) ont fait l'estimation d'une zone de tourbière de 93,5 Mha avec une accumulation nette de carbone de 26,2 Mt C à n^{-1} et une émission de méthane de 0,5 Mt C à n^{-1} (ou 12,5 Mt CO_2e à n^{-1}). Kurz et al. (1992) n'ont pas tenté de quantifier les effets des perturbations, en particulier des incendies, sur le bilan des gaz à effet de serre des tourbières. Ces estimations sont cohérentes avec d'autres estimations réalisées en matière d'accumulation nette du carbone entre 25 et 37 Mt C à n^{-1} (Roulet 2000), mais légèrement en dessous des estimations des émissions de méthane de 2 à 5 Mt C à n^{-1} (Moore and Roulet 1995; Roulet 2000).

Un élément préoccupant est l'incertitude du futur bilan du carbone en raison de la vulnérabilité des tourbières, en particulier des tourbières pergélisolées, par rapport au réchauffement planétaire (Figure 4) et des effets de l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des incendies, de la pression exercée par les activités de gestion comme l'exploitation forestière des arbres ou de la tourbe, et l'exploration et l'extraction des ressources naturelles, notamment le pétrole, le gaz et les minéraux.

Ce manque de connaissances du bilan national du carbone des tourbières doit être comblé pour répondre à la pression internationale croissante pour une meilleure estimation du carbone et des rapports sur les sols organiques des terres aménagées (p. ex., le document 2013a Supplement to the 2006 Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories : Wetlands [Wetlands Supplement] [en anglais seulement] du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [GIEC]). À l'échelle mondiale, les tourbières contiennent deux fois plus de C que l'atmosphère. Dans le 5^e rapport d'évaluation (2013b) du GIEC, les prévisions du modèle du SRES (Special Reporton Emission Scenarios [en anglais seulement]) ne contiennent aucune rétroaction sur les réactions des tourbières et celles du pergélisol par rapport aux changements climatiques permettant de faire des prévisions pour la fin du siècle. Des analyses indépendantes indiquent que nous pourrions perdre chaque année 1 Gt de carbone des tourbières au cours du prochain siècle. Les efforts d'atténuation pour parvenir à la réduction des émissions de gaz à effet de serre et atteindre les objectifs de stabilisation dépendent de la rétroaction des tourbières et le GIEC n'est actuellement pas en mesure d'intégrer cette rétroaction à ses prévisions.

À l'échelle nationale, plusieurs documents récents ont mis en lumière les insuffisances d'informations concernant la dynamique du C au sein du pergélisol et des tourbières (p. ex., Bernier et al. 2012, Kurz et al. 2013, Webster et al. 2015). Même à l'échelle provinciale, le rôle du pergélisol et des tourbières dans le système climatique mondial est de plus en plus reconnu. La plupart des provinces ont établi des politiques ou une stratégie relatives à la conservation des terres humides. Récemment, plusieurs initiatives importantes ont été prises dans les provinces de l'Ontario, du Manitoba et de l'Alberta. En octobre 2010, l'Ontario a adopté le projet de loi 191 : *Loi sur le Grand Nord*, avec l'objectif suivant : « Maintenir la diversité biologique, les processus et fonctions écologiques, y compris le stockage et la séquestration du dioxyde de carbone dans le Grand Nord ». L'importance du carbone des tourbières, de plus en plus reconnue, a entraîné son inclusion dans le rapport annuel 2011 sur l'état des forêts de l'Ontario, où, pour la première fois, un indicateur de la durabilité du réservoir de carbone dans les tourbières (Indicateur 4.1.2) a fait l'objet d'un rapport pour l'Ontario. Dans le cadre du Plan vert 2012, le gouvernement du Manitoba a publié une nouvelle stratégie d'intendance des tourbières (Peatlands Stewardship Strategy) qui assure une approche équilibrée entre la protection et l'aménagement rationnel des tourbières et l'établissement de « zones interdites » au développement commercial de la tourbe dans les parcs provinciaux et les aires de gestion de la faune et autres zones de tourbières sensibles et désignées (<http://www.gov.mb.ca/conservation/peatlandsstewardshipstrategy/protect.html>). Le gouvernement de l'Alberta a publié sa nouvelle politique en matière de terres humides (Alberta Wetland Policy) en 2013, dans le but de conserver, restaurer, protéger et gérer les terres humides de l'Alberta afin de préserver les avantages qu'elles offrent pour l'environnement, la société et l'économie (<http://www.wetlandsalberta.ca/policy>).

Ce projet améliorera notre compréhension de la dynamique du carbone. Cela permettra de documenter la gestion, ainsi que les estimations nationales et les rapports sur le carbone dans les tourbières boisées, notamment celles situées dans des zones touchées par le pergélisol ou le dégel du pergélisol, en créant un modèle simplifié de la dynamique du carbone des tourbières qui pourra être utilisé comme module

au sein du MBC-SFC. Le modèle simplifié sera fondé sur les connaissances sur les principaux processus sensibles des différents types de tourbières fonctionnels. Ces types seront identifiés et cartographiés en synthétisant les cartes des tourbières et du pergélisol (p. ex., Figure 5) en une base de données de géosciences unifiée. L'intégration des connaissances sur les principaux types de tourbières fonctionnels, leur dynamique et leur répartition du carbone dans le paysage permettra de faire les premières estimations des émissions et des éliminations des gaz à effet de serre au Canada et à l'échelle nationale.

Les résultats de ce projet en matière d'émissions et d'éliminations de C des tourbières dans le passé, le présent et le futur (prévisions) permettront d'alimenter le Système national de surveillance, de comptabilisation et de production de rapports concernant le carbone des forêts (SNSCPRCF), qui fournit des renseignements à Environnement Canada pour ses rapports annuels nationaux sur l'inventaire des gaz à effet de serre. Le SNSCPRCF fournit également des analyses visant à appuyer l'élaboration de politiques, les analyses d'atténuation et les négociations.

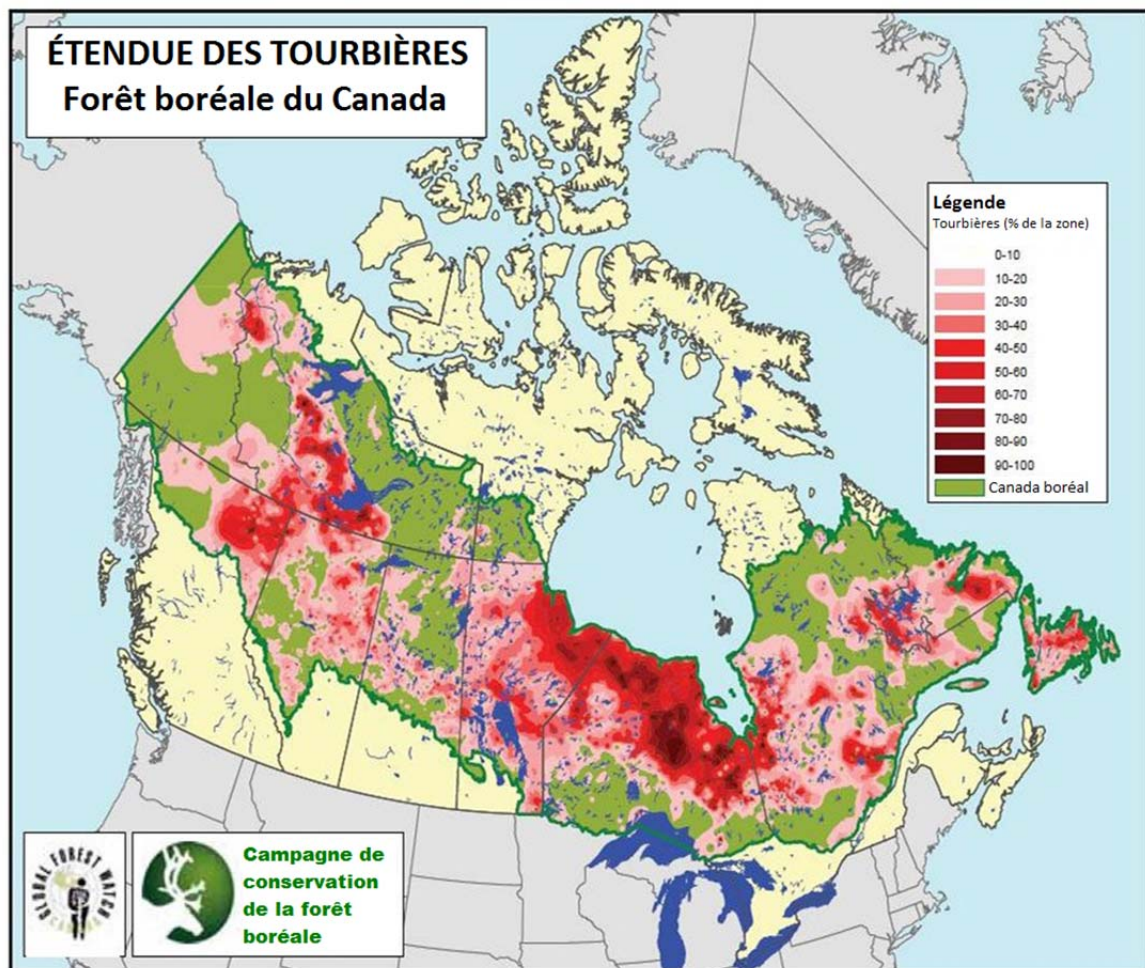


Figure 1. L'étendue des tourbières du Canada dans la zone boréale (Source : cartographie de l'International Boreal Conservation Campaign, Tarnocai et al. 2002).

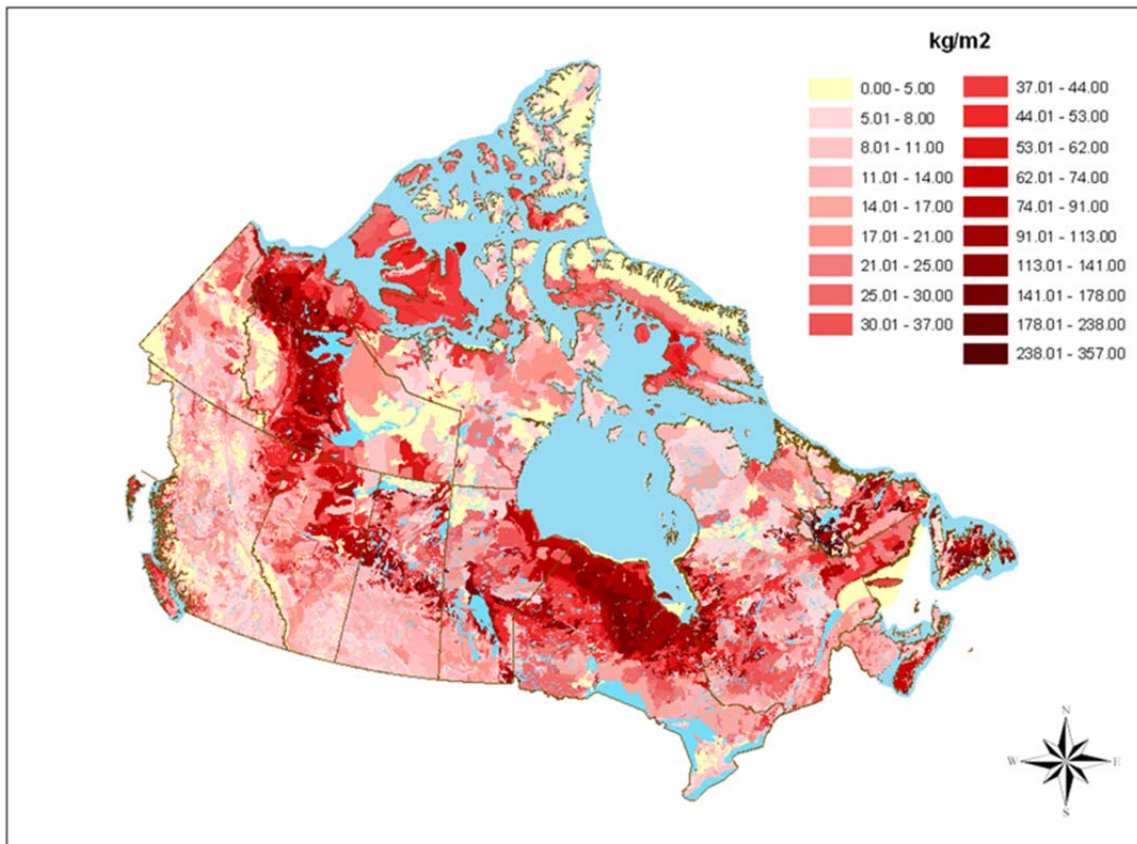


Figure 2. Densité du C du sol au Canada (Source : Tarnocai et Lacelle 1996).

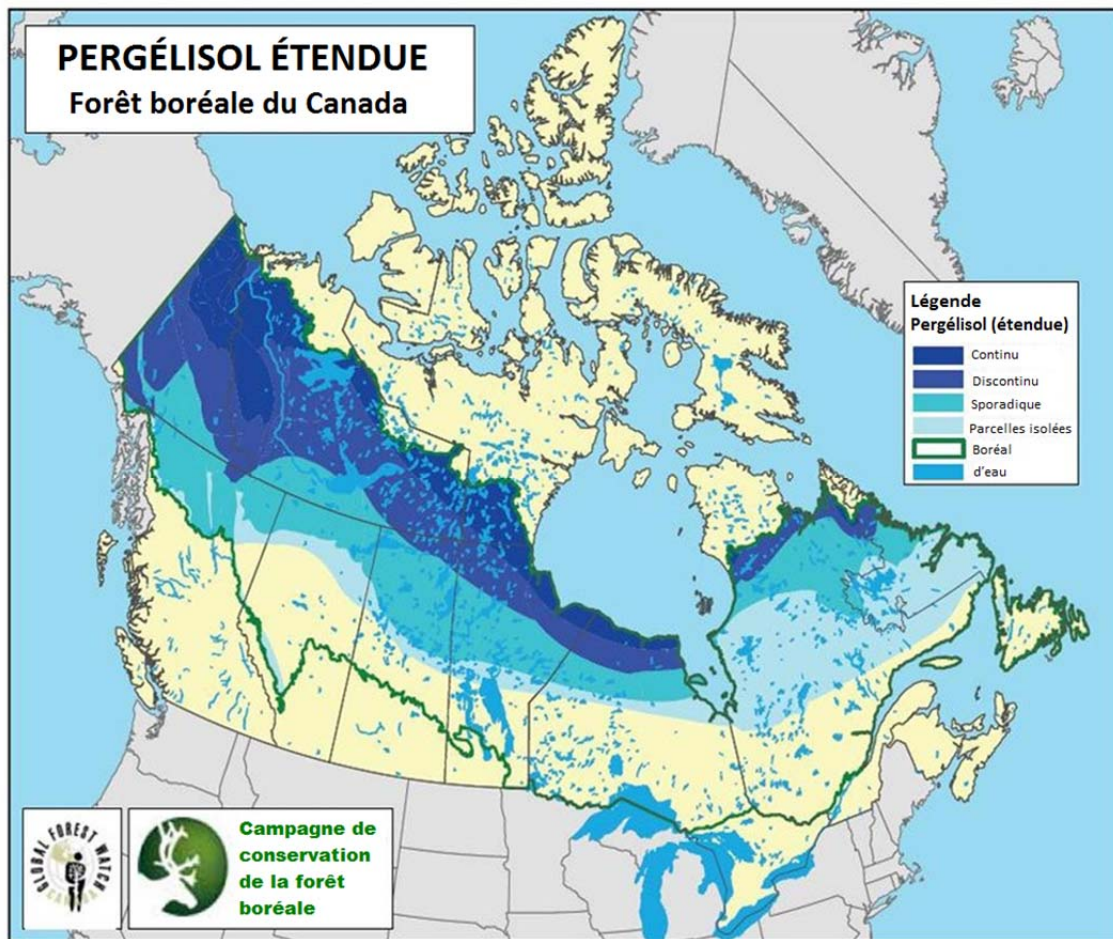


Figure 3. L'étendue du pergélisol du Canada dans la zone boréale (Source : cartographie de l'International Boreal Conservation Campaign, Brown 1998).

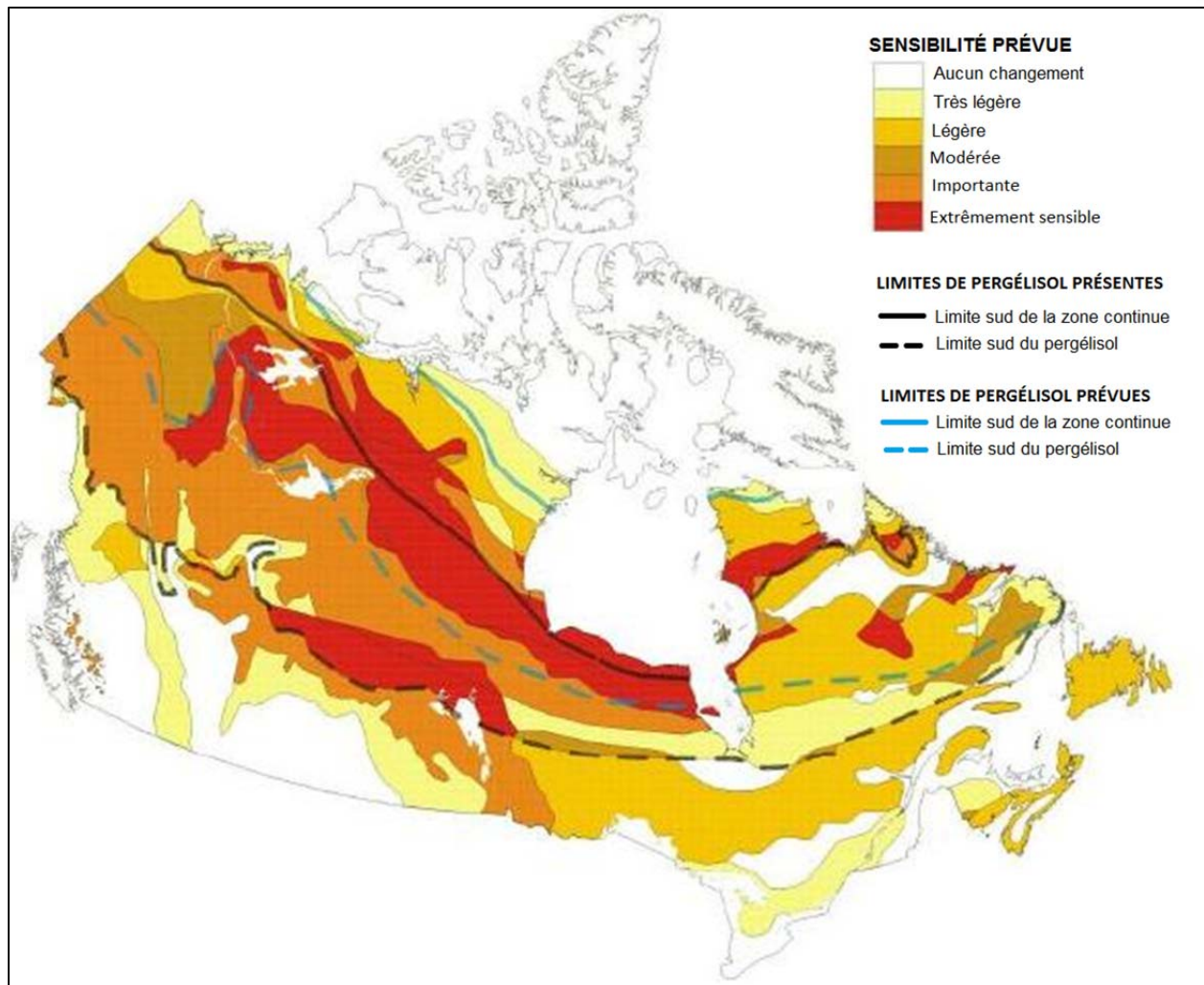


Figure 4. Vulnérabilité du carbone du sol par rapport aux changements climatiques (Source : Tarnocai 2006).

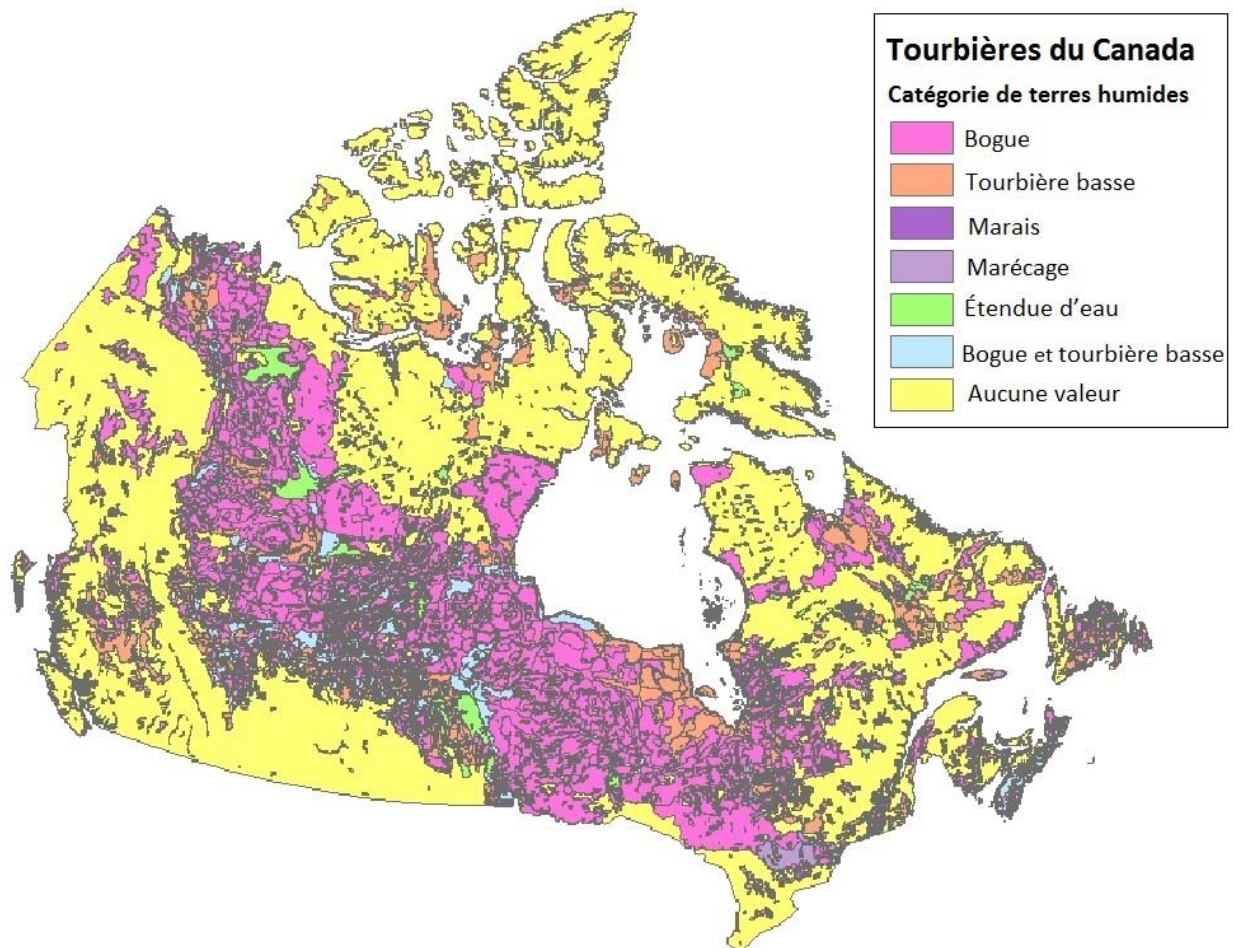


Figure 5. Types de tourbières dominants au Canada (Source : Tarnocai et al. 2011).

2.2 Questions et objectifs scientifiques principaux

L'objectif de ce projet est d'élaborer et de mettre en œuvre un module sur les tourbières pour le MBC-SFC qui permettra de réaliser l'estimation des émissions et éliminations du C provenant des tourbières boisées de la région boréale et, des forêts aménagées et non aménagées, à l'échelle nationale.

Les questions clés auxquelles cette recherche répondra sont notamment les suivantes :

1. Quels sont les principaux types de tourbières à inclure dans le module national de dynamique du C dans les tourbières?
2. Quelles sont la répartition et l'étendue de ces types de tourbières à l'échelle nationale?
3. Quels sont les principaux processus nécessaires pour modéliser les émissions et les éliminations de C dans les tourbières?
4. Quelles données sont nécessaires pour étalonner les principaux processus et valider les données de sortie du module?
5. Quelles données sont disponibles pour étalonner les principaux processus et valider les données de sortie du module?
6. Quelles sont les estimations en matière d'émissions et d'éliminations du C dans les tourbières dans les zones forestières aménagées et non aménagées du Canada?
7. Comment les perturbations naturelles et anthropiques influent-elles sur les processus du cycle du C dans les tourbières et les estimations des émissions et éliminations de C dans les tourbières?

Les résultats attendus de ces travaux seront les suivants :

1. une meilleure compréhension de la dynamique du C dans les forêts reposant sur les sols organiques et les tourbières boréales, notamment les tourbières pergélisolées et leur répartition nationale;
2. des estimations nationales sur les émissions et les éliminations de dioxyde de C, de méthane et (en cas d'incendie) de N₂O qui intègrent la répartition des différents types de tourbières boisées et leurs bilans de gaz à effet de serre, en fonction du climat de la région;
3. une meilleure connaissance des effets des perturbations causées par les activités humaines et les changements climatiques sur les bilans de C des tourbières boisées;
4. l'identification des données clés et des lacunes en matière de connaissances contribuant à l'incertitude dans les estimations des bilans de C des tourbières.

2.3 Orientation du modèle

L'orientation du module du Modèle canadien en matière de tourbières (M_{CaT}) pour le MBC-SFC est un modèle simplifié qui est unidimensionnel (flux vertical) et axé sur la forêt. Le M_{CaT} sera principalement axé sur la compréhension des changements dans les flux de C, et secondairement dans les stocks de C.

On sait que les flux latéraux de C dans d'autres systèmes existent (p. ex., pertes de C dissous dans les systèmes aquatiques), mais une fois qu'ils quittent le système des tourbières boisées, ils sont considérés comme des pertes pour l'écosystème, leur C associé n'est donc pas compté deux fois. Les rétroactions détaillées (p. ex., l'effet fertilisant du CO₂) ne seront pas prises en compte dans ce modèle.

2.4 Stratégie globale du projet (approche par étapes)

Ce projet sera géré selon une approche par étapes. L'étape 1 sera la production d'un modèle simplifié avec une résolution spatiale grossière. L'étape 2 reflètera l'apprentissage adaptatif fondé sur les

résultats de l'étape 1. Par exemple, les difficultés du modèle liées à l'hydrologie (statique à dynamique), l'inclusion des processus du pergélisol, les interactions des processus du cycle du C, les activités perturbantes, et l'affinement de la résolution spatiale de la couverture des tourbières seront pris en compte à l'étape 2.

2.5 Principaux éléments livrables du projet

Les principaux éléments livrables du projet attendus pour l'étape 1 comprennent :

1. ce rapport de l'atelier soulignant les approches et les possibilités d'élaboration du module et d'intégration des couches de données spatiales;
2. un système de classification des types de tourbières fondé sur les groupes de végétaux fonctionnels conçu hiérarchiquement afin que les catégories puissent être étendues au fur et à mesure que les couches de données spatiales des tourbières sont affinées ou alors que les paramètres des données pour les différents types de tourbières sont mises à disposition;
3. les algorithmes pour le module sur le C des tourbières du MBC-SFC – MCaT Version 1 qui permettront de modéliser la dynamique du C des tourbières avec une nappe phréatique statique et sans perturbations;
4. une carte nationale des types de tourbières et du pergélisol, utilisant un ensemble de données spatiales existant, avec l'identification des disparités dans la couverture;
5. des estimations du bilan de C pour les différents types de tourbières boisées à l'aide des données climatiques extrapolées pour la région boréale et dans la forêt aménagée;
6. des estimations de la séquestration et des émissions annuelles nationales de C dans les tourbières, pour la région boréale et dans la forêt aménagée de 1990 à aujourd'hui.

3. Questions relatives à la détermination de la portée

3.1 Échelle temporelle

Pour être cohérents avec la structure du modèle actuel du MBC-SFC, nous proposons d'établir un modèle à des intervalles de temps annuels pour des périodes allant de plusieurs années à plusieurs siècles. Étant donné que de nombreux processus de tourbières varient selon les saisons, une approche de « modificateurs » sera utilisée pour prendre en compte les effets interannuels de la baisse saisonnière de la nappe phréatique sur les processus du cycle du C pour la version 2 du MCaT. Les futures versions du module pourraient établir des modèles explicites à des intervalles saisonniers, mensuels ou quotidiens.

3.2 Échelle spatiale et approche

Nous incluons les tourbières des forêts aménagées et non aménagées du Canada, en reconnaissant que l'intérêt est particulièrement axé sur les prévisions et rapports relatifs aux tourbières boisées de la partie aménagée de la région boréale forestière du Canada. Nous utiliserons une approche géoréférencée ou, à l'échelle sous-nationale, une approche spatialement explicite (résolution de 30 m). Les estimations initiales (étape 1) seront probablement faites selon une approche géoréférencée qui est actuellement soutenue dans le cadre du MBC-SFC dans laquelle les polygones sont délimités à l'aide de l'information sur le pourcentage des types de tourbières. Les estimations révisées (étape 2) viseront à adopter une approche spatialement explicite (référencée en pixels) qui est en cours d'élaboration dans le cadre de la nouvelle structure de modélisation du MBC-SFC version 4.

4. Classification des tourbières

4.1 Le continuum aquatique à terrestre

Les terres humides sont des écosystèmes terrestres où, à long terme, la productivité primaire nette dépasse la décomposition des matières organiques, entraînant une accumulation de tourbe. Les terres humides peuvent être classées comme des étendues d'eau peu profonde, des marais, des marécages, des tourbières basses ou des bogues (Figure 6). Les tourbières sont des terres humides qui ont plus de 40 cm de tourbe et peuvent comprendre des marécages, des tourbières basses et des bogues. Le module en matière de tourbières pour le MBC-SFC sera axé sur ces trois types de tourbières. Cela complète l'orientation existante sur la forêt en haute terre du MBC-SFC et un nouveau module pour la dynamique du carbone de la mousse (Bona et al. 2016) qui sera utilisé pour représenter la dynamique du C des sols minéraux avec d'épaisses couches organiques de mousse.

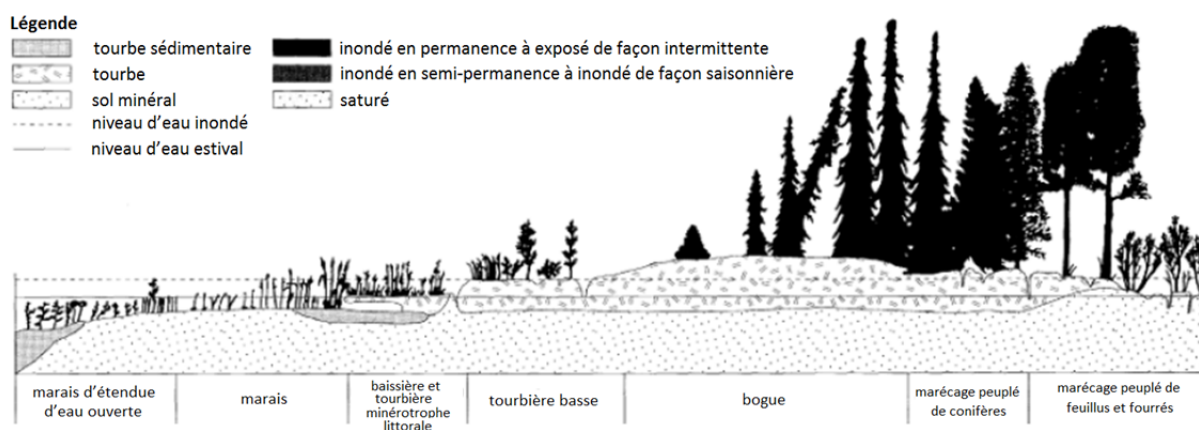


Figure 6. La transition des zones d'eau libre en forêt selon les types de tourbières (Source : Smith, publication non datée).

4.2 Initiation et diversification des tourbières

Dans l'hémisphère Nord, les tourbières se sont largement établies pendant la période suivant la déglaciation. L'initiation des tourbières, juste après la déglaciation ou plus tard, survient soit par paludification soit par terrestrialisation (Figure 7). La paludification (ou la formation des marécages) survient lorsque la tourbe se forme sur des habitats anciennement secs et couverts de végétation sur des sols minéraux et en l'absence d'une étendue d'eau, en raison de la hausse de la nappe phréatique régionale. La terrestrialisation peut former des tourbières sur des étendues d'eau peu profonde, lorsque le bassin se remplit progressivement de végétation qui développe des tapis de tourbe flottants ou enracinés.

Une fois que les tourbières sont formées, de nombreux facteurs (notamment l'hydrologie, la végétation et la flore, les substrats, la succession écologique [hydrosère], le pergélisol et les incendies) déclenchent les processus qui entraînent la diversification des tourbières en différents types.

1. Hydrologie : les tourbières ont besoin d'un approvisionnement constant et à long terme en eau, qu'elle provienne des précipitations (ombrotrophique : bogues) ou des eaux souterraines et de surface (géogène, avec minéraux = tourbières basses), pour conserver les conditions humides qui favorisent le développement de la tourbe. Cette hydrologie est soutenue par le cadre

géologique et le climat régional (température et précipitations) qui favorisent l'approvisionnement en eau et sa répartition dans le paysage.

2. Végétation et flore : les arbres, les arbustes, les bryophytes et le lichen réagissent aux conditions hydrologiques, créant des ensembles d'espèces caractéristiques avec différents types de tourbières. À leur tour, les changements de la composition des espèces, qui passent d'espèces non vasculaires à vasculaires, peuvent augmenter les pertes par évaporation et faire davantage baisser le niveau phréatique. Il existe différentes formes végétales fonctionnelles au sein des tourbières (p. ex., lichen, mousse brune, mousse hypnacée, *sphaigne*, graminées, herbes, arbustes et arbres [décidus ou à feuillage persistant]) (Figure 6). Les différents types de tourbières possèdent des ensembles de végétation caractéristiques (types de végétaux fonctionnels).
3. Substrat : les différences en matière de géologie de surface (p. ex, le granite acide sur le bouclier boréal et le substrat rocheux sédimentaire riche en carbone de la plaine boréale) ont une incidence sur la richesse en nutriments des tourbières géogènes.
4. Hydrosère : l'accumulation de la tourbe élève progressivement le niveau de la surface au-dessus de la nappe phréatique, réduisant l'humidité et les nutriments.
5. Dégénération et extension du pergélisol : la formation de pergélisol a une incidence sur la hauteur de la mousse, créant un effet similaire à la succession par hydrosère. Lorsque le pergélisol dégèle, la diminution de la hauteur entraîne un glissement synsédimentaire et un retour à des conditions plus humides.
6. Perturbations dues aux incendies : les incendies dans les tourbières éliminent les couches organiques de surface et entraînent une baisse de la biomasse de plantes vasculaires, causant l'élévation du niveau phréatique et des conditions plus humides.

Alors que chacun de ces facteurs est important pour le développement des tourbières, l'échelle temporelle du changement est généralement très longue pour certains d'entre eux (p. ex., la succession par hydrosère et l'extension du pergélisol) et d'autres facteurs peuvent intervenir peu fréquemment, mais lorsqu'ils interviennent, ils entraînent d'importants changements à la structure et la fonction des tourbières (p. ex., effondrement du pergélisol et incendies).

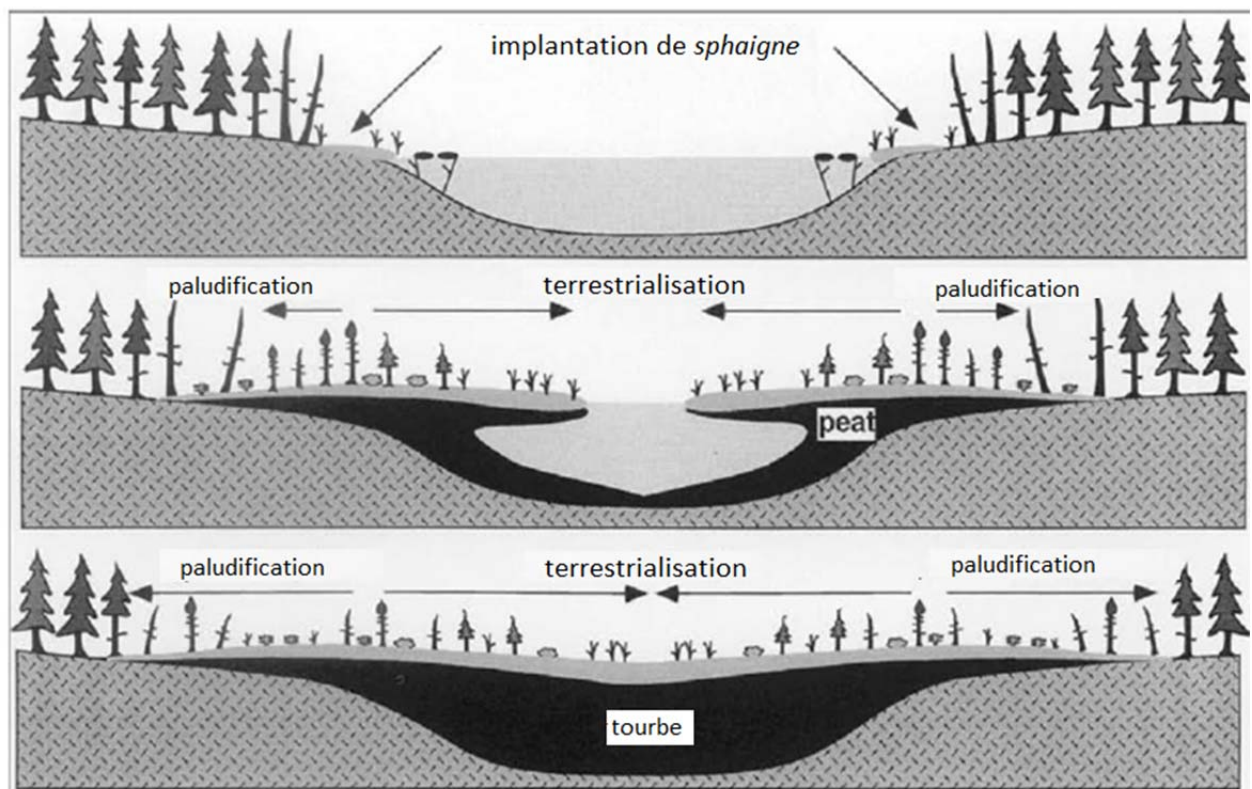


Figure 7. Processus de développement des tourbières par terrestrialisation et paludification (Source : Klinger 1996).

4.3 Système de classification des tourbières

Un système de classification des tourbières est nécessaire pour regrouper les formes similaires de tourbières parmi le continuum des différents états selon lesquels elles se développent. Un système de classification qui définit toutes les catégories possibles est idéal, mais a l'inconvénient de nécessiter un très grand nombre de catégories prédéfinies. Un système de classification des tourbières réaliste devrait comprendre un ensemble exhaustif de catégories, et être scientifiquement exact dans la délimitation de ces catégories, et assez pratique pour répondre aux besoins des différents utilisateurs.

Le système de classification des terres humides du Canada (SCTH) est la base de classification des terres humides au Canada et la base de l'Inventaire canadien des terres humides (ICTH) (Figure 8). La classification comprend les cinq catégories principales de terres humides (bogues, tourbières basses, marécages, marais et étendues d'eau peu profonde) et les sous-catégories sont définies selon les principales couches de végétation (mousse, herbes, arbustes et arbres [conifères ou décidus]). Bien que de nombreuses provinces aient adopté cette classification, les travaux préliminaires pour définir ou cartographier les types de tourbières dataient d'avant la classification et, dans certains cas, les tourbières sont consignées dans des catégories moins précises (p. ex., terres humides arborées par rapport aux terres humides non arborées) que celles du SCTH du Canada. Certaines provinces établissent des rapports à une résolution plus élevée que les catégories du système de classification des terres humides du Canada, en particulier lorsque les habitats spécialisés des terres humides sont identifiés comme zones prioritaires. Par exemple, Ducks Unlimited a un système de classification des terres humides amélioré qui est similaire à celui du SCTH et de l'ICTH, mais avec des catégories supplémentaires de marécages, présentant une différenciation entre les tourbières basses riches et les pauvres.

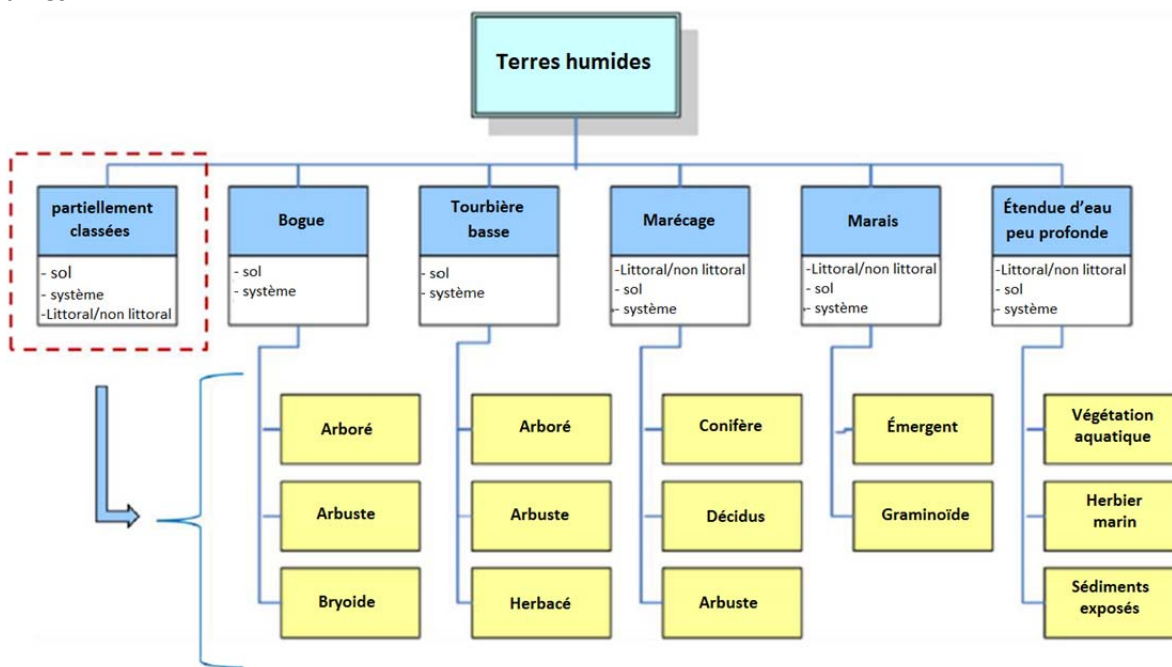


Figure 8. La hiérarchie de classification de l'Inventaire canadien des terres humides avec les catégories principales en bleu, les modificateurs en blanc et les catégories secondaires en jaune (Source : Environnement Canada 2012).

4.4 Catégories cartographiables et importantes

Les catégories des types de tourbières qui seront incluses dans le MCaT comprennent les bogues, les tourbières basses pauvres et riches et les marécages boisés et arborés (tourbières boisées [potentiel d'atteindre un couvert arboré >25 % et une hauteur à maturité >5 m], arborées [potentiel d'atteindre un couvert arboré de 10 à 25 % et une hauteur à maturité <5 m] et ouvertes [couvert forestier <10 % et hauteur à maturité <5 m]) (Shaw et al. 2016). Ces catégories sont cohérentes avec les catégories du SCTH et sont appropriées pour établir le bilan du C, car elles représentent les principaux réservoirs de végétation qui contrôlent la production primaire nette, la production de litière et la profondeur de la tourbe qui influent sur l'hydrologie et sur la production primaire et la décomposition.

5. Principaux processus et examen du modèle

5.1 Points communs et différences entre les systèmes forestiers et les systèmes de tourbières en matière de modélisation du C

Comme le cycle du carbone dans les forêts, le cycle du carbone dans les tourbières suppose des échanges entre les éléments de l'écosystème du sol, de la végétation et de l'atmosphère présents dans le paysage régional. Les transferts de carbone au sein et entre ces éléments varient avec le temps et sont influencés par des facteurs internes (dynamique du peuplement, croissance des plantes) et externes (hydrologie et perturbations). Le fait que le bilan du carbone soit libéré dans l'atmosphère ou séquestré dépend de la différence entre la production primaire nette (PPN) et la respiration hétérotrophe (Rh), avec les taux de chacun dépendant des nombreux facteurs en interaction. Un facteur clé du cycle du carbone au sein des tourbières est la présence d'une nappe phréatique, qui crée une zone anaérobie (milieu réducteur) au sein de la tourbe sous la nappe phréatique (catotelme) et une zone aérobie (milieu oxydé) au-dessus de la nappe phréatique (acrotelme), ce qui a une incidence sur de nombreuses caractéristiques physiques (p. ex., la température) et chimiques (p. ex., potentiel d'oxydoréduction) et sur des processus biologiques (p. ex., profondeur d'enracinement).

La Figure 9 résume les principaux réservoirs et flux présents dans les tourbières. Le carbone est stocké dans la biomasse vivante (p. ex., feuilles, branches, racines), dans la matière organique morte (p. ex., litière, gros débris ligneux), dans le sol (p. ex., tourbe et sol minéral) et dans le carbone organique dissous (COD). Le carbone pénètre dans le système, s'en échappe ou est transféré grâce à la photosynthèse, à la respiration autotrophe et hétérotrophe, à la décomposition ainsi qu'à l'exportation de COD et au transport de gaz (diffusion, ébullition ou par les plantes).

Il existe plusieurs caractéristiques importantes des tourbières qui devraient être prises en considération dans le module.

1. Hydrologie : influence l'humidité du sol, la profondeur de la nappe phréatique, le bilan hydrique et la décomposition.
2. Température du sol : influence la décomposition et la productivité.
3. Type de plante fonctionnel (arbre, arbuste, mousse et carex) : influence les taux de production de la biomasse et de la litière et la qualité de la litière.
4. Qualité de la matière organique : influence la décomposition.
5. Potentiel d'oxydoréduction : influence la voie de la décomposition (aérobie ou anaérobie).
6. Voies de transport pour le méthane (ébullition, diffusion, par les plantes) : influencent les émissions de méthane.

7. Perturbations : influencent la productivité, la décomposition et les émissions directes de carbone (incendies).
8. Pergélisol : influence la productivité et la décomposition.

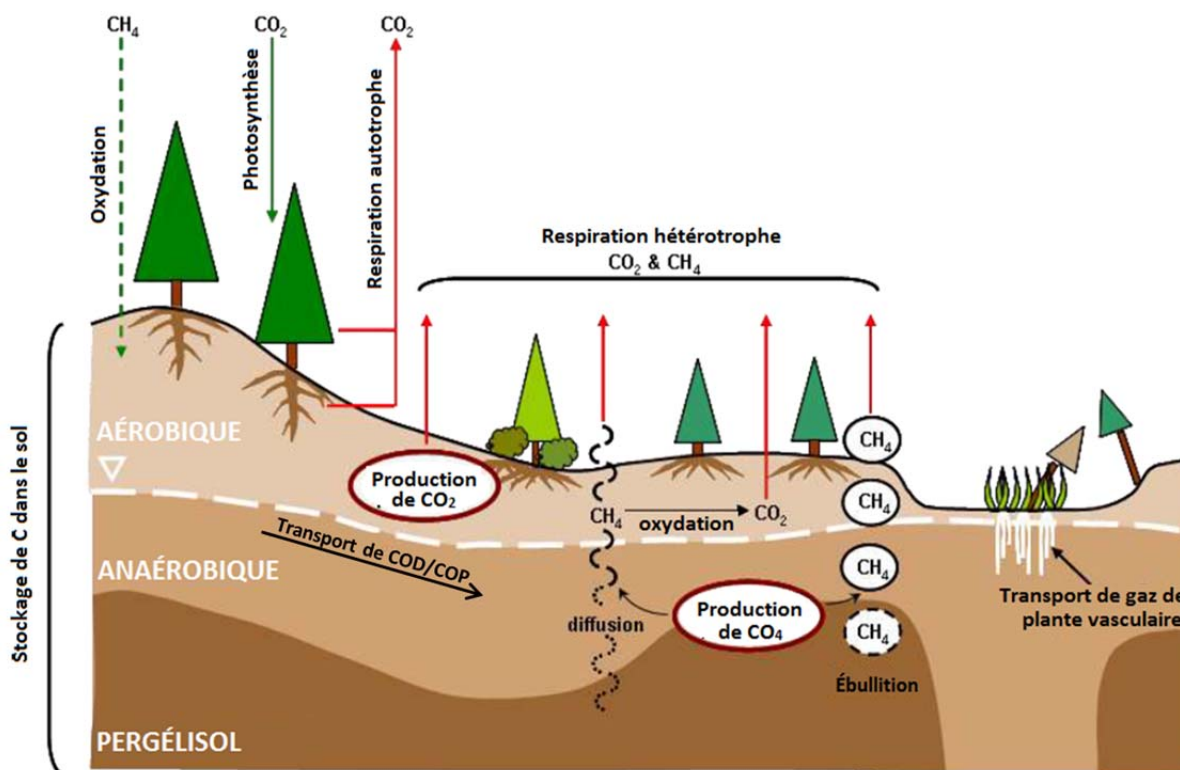


Figure 9. Principaux réservoirs et flux des tourbières (Source : Jagtar Bhatti).

5.2 Connaissances découlant de modèles de tourbières existants

On a examiné et résumé différents modèles de carbone dans les tourbières (Tableau 1). Actuellement, il n'existe pas de modèle unique applicable à l'échelle nationale. La plupart des modèles de tourbières sont des modèles basés sur le procédé exigeant un grand nombre de données et de paramètres et qui sont appliqués selon une échelle de cotation numérique. On peut apprendre de nombreuses choses en étudiant la façon dont les procédés principaux ont été gérés dans chacun de ces modèles; cependant, pour avoir une capacité de modélisation à l'échelle nationale, une approche simplifiée est nécessaire. Possibilités de simplification des processus :

1. saisir les répartitions statistiques des caractéristiques au lieu de modéliser explicitement les processus;
2. processus simplifiés (p. ex., bilan hydrique par rapport à nappe phréatique statique, par rapport à nappe phréatique dynamique, représentation 3D à 1D);
3. caractériser les réactions en fonction des types de tourbières à partir de mesures empiriques;
4. modélisation basée sur le procédé des types de tourbières selon différents régimes climatiques avec des données de sortie mises à l'échelle à partir d'un point jusqu'à l'ensemble du paysage.

Tableau 1. Résumé des caractéristiques des modèles de tourbières généralement utilisés.

| Modèle | Gaz simulés | Hydrologie | TVF ¹ | Type | Données d'entrée | Perturbations | Incertitudes |
|---------------------------------|---|--------------------------|---------------------------|---|--|---------------|--|
| Modèle de tourbe de l'Holocène | Aucun – taux d'accumulation du C | oui | TVF simulés (12) | Basé sur le procédé | Conditions météorologiques, productivité des TVF, humidité du sol, NP ² , propriétés hydrologiques de la tourbe, profondeur de la tourbe, MVV ³ , température terrestre ⁴ | Non | Intervalle annuel à l'échelle des millénaires. Simule la perte totale de C et non le GES ⁵ ; variables thermiques influencent ou modifient la décomposition de la tourbe. |
| Modèle de terres humides McGill | CO ₂ | Non | TVF comme donnée d'entrée | Basé sur le procédé à l'aide de l'approche des réservoirs | Rayonnement de courtes longueurs d'onde à venir, [CO ₂] atmosphérique, température aérienne et terrestre, hydratation du sol, NP, MVV | Non | Sous-estimation des pics saisonniers de production de CO ₂ ; manque les relations entre l'eau et les plantes. |
| ECOSSE | CO ₂ , N ₂ O, CH ₄ | NP comme donnée d'entrée | TVF simulés | Basé sur le procédé à l'aide de l'approche des réservoirs | Conditions météorologiques, nombre de couches organiques du sol, teneur en carbone, MVV, pH du sol, texture et autres propriétés de base, profondeur de la NP, végétation | Oui | |
| TOURBIÈRE | CO ₂ , CH ₄ | NP comme donnée d'entrée | TVF simulés | Basé sur le procédé à l'aide de l'approche des réservoirs | NP, T aérienne, propriétés du sol, végétation | Non | Les exigences en matière de données sont très élevées; très sensibles à la faible humidité du sol. |

| Modèle | Gaz simulés | Hydrologie | TVF ¹ | Type | Données d'entrée | Perturbations | Incertitudes |
|---|--|---|-----------------------------------|---|---|--|--|
| DNDC | CO ₂ , N ₂ O, CH ₄ | NP comme donnée d'entrée ou simulée | TVF simulés | Basé sur le procédé à l'aide de l'approche des réservoirs | Conditions météorologiques, propriétés physiques du sol, température du sol et eau contenue dans le sol, dépôt d'azote | Oui, avec l'effet sur l'environnement du sol | Les exigences en matière de données sont très élevées; les émissions de CH ₄ sont extrêmement sensibles à l'eau. |
| Écosys | CO ₂ , N ₂ O, CH ₄ , NH ₃ , NO | NP simulée | TVF simulés | Basé sur le procédé à l'aide de l'approche des réservoirs | Conditions météorologiques (P, T aérienne, HR, vitesse du vent, rayonnement d'onde), paramètre du sol (conductivité thermique et hydraulique, CO, pH), transformations chimiques et biogéochimiques | Oui, avec l'effet sur l'environnement du sol | Les exigences en matière de données sont très élevées; incertitudes quant aux paramètres qui interagissent; limites computationnelles. |
| MET (Modèle de l'écosystème terrestre) | Include permafrost CO ₂ , CH ₄ and N ₂ O are considered | Se référer à McGuire et al. 2012. Biogéosciences | TVF simulés | Basé sur le procédé | Spatialement explicites avec des données mensuelles sur le climat, la végétation et les niveaux | Oui | Très forte sensibilité au facteur de la radiation quant à la productivité fonctionnelle des plantes pendant la période de croissance. |
| NEST (modèle de température du sol de l'écosystème du Nord) | Soil T, permafrost | Se référer à Zhang et al. 2012. Biologie du changement climatique | Type de végétation pris en compte | Basé sur le procédé | Climat, topographie, végétation, profondeur de la neige, densité de la neige, couverture morte, couches de tourbe et sols minéraux | Non | Il s'agit d'un modèle à une dimension, alors le flux latéral de chaleur et d'eau a été ignoré. La dynamique des GES n'est pas prise en compte. |

1. TVF; type de végétaux fonctionnels

2. NP; nappe phréatique

3. MVV; masse volumique en vrac

4. T; température

5. GES; gaz à effet de serre

6. Étude de définition du modèle et liens avec le MBC-SFC

6.1 Version actuelle du MBC-SFC

Le MBC-SFC (Kurz et al. 2009) est l'un des éléments principaux du Système national de surveillance, de comptabilisation et de production de rapports concernant le carbone des forêts (SNSCPRCF) (Kurz et Apps 2006) utilisé pour l'établissement de rapports et de projets internationaux (Figures 10 et 11) depuis 1990 (Stinson et al. 2011). Le MBC-SFC est un modèle à échelle opérationnelle de la dynamique du carbone forestier fondé sur des courbes de croissance et de rendement. Il contient des renseignements détaillés de l'inventaire forestier ainsi que des connaissances et des cartographies sur les événements perturbants (exploitation et perturbations naturelles, comme les incendies et les insectes) notamment sur les changements d'affectation des terres (déforestation, boisement). Le modèle représente 22 réservoirs de C et le transfert de C.

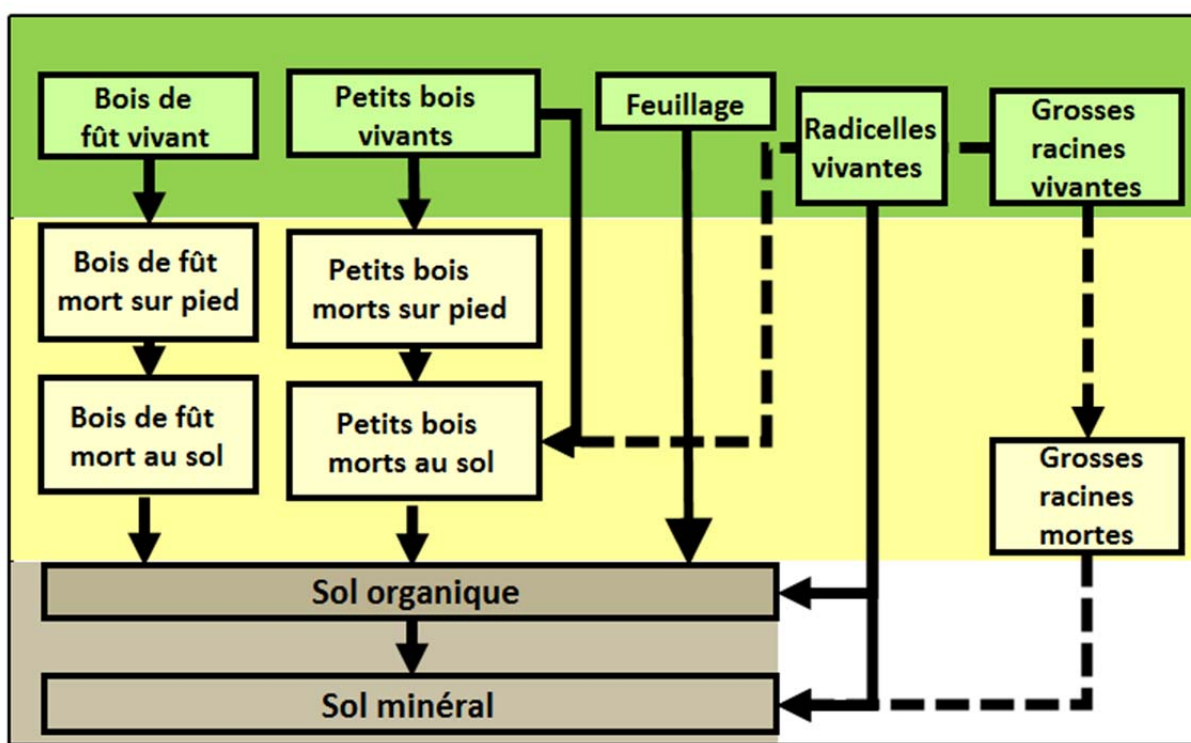


Figure 10. Structure de réservoir simplifiée du MBC-SFC3.

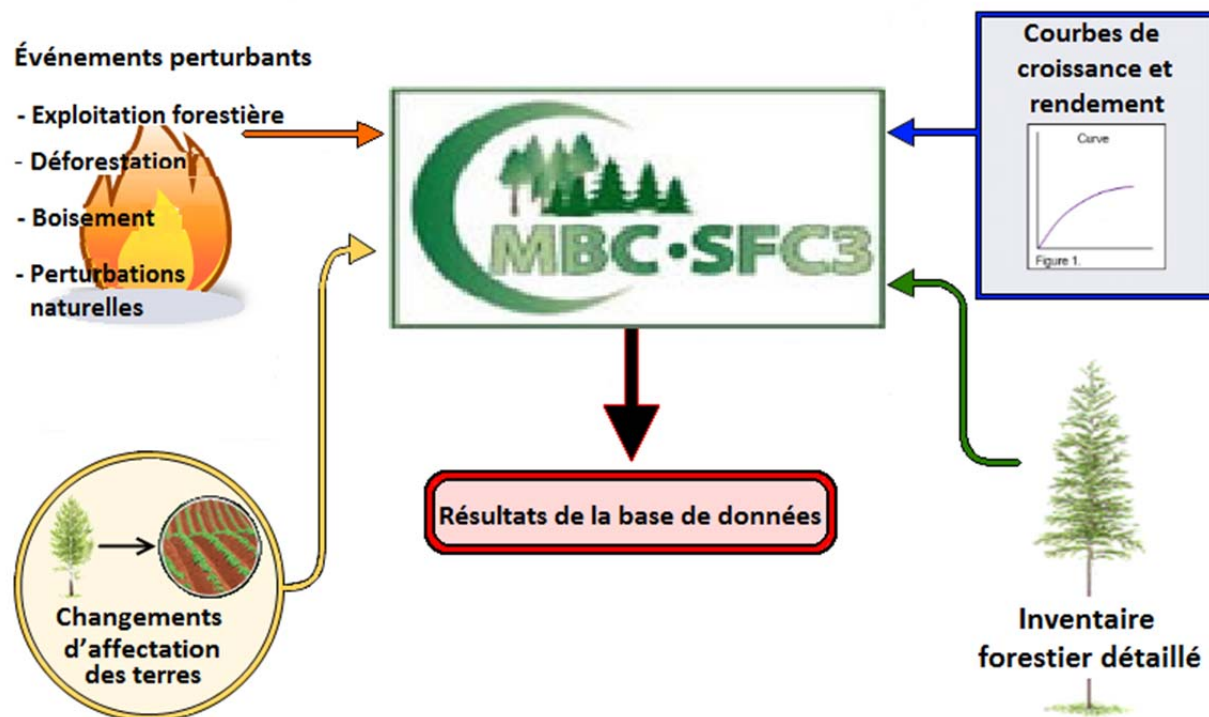


Figure 11. Éléments du SCS-CRFB (Source : Groupe de travail chargé de la comptabilisation du carbone du SCF). Le modèle s'appuie sur 25 ans de travaux scientifiques du Service canadien des forêts (SCF) et permet aux exploitants de forêts d'évaluer les répercussions du C dans la gestion forestière sur les sources des GES et les puits. Le modèle est référencé selon 635 unités d'analyse spatiales (intersection géographique des écozones terrestres, des barrières politiques et des unités de gestion forestière) comprenant environ 2,7 millions de peuplements qui sont regroupés dans 18 zones de déclaration à l'échelle de l'écozone (Figure 12).

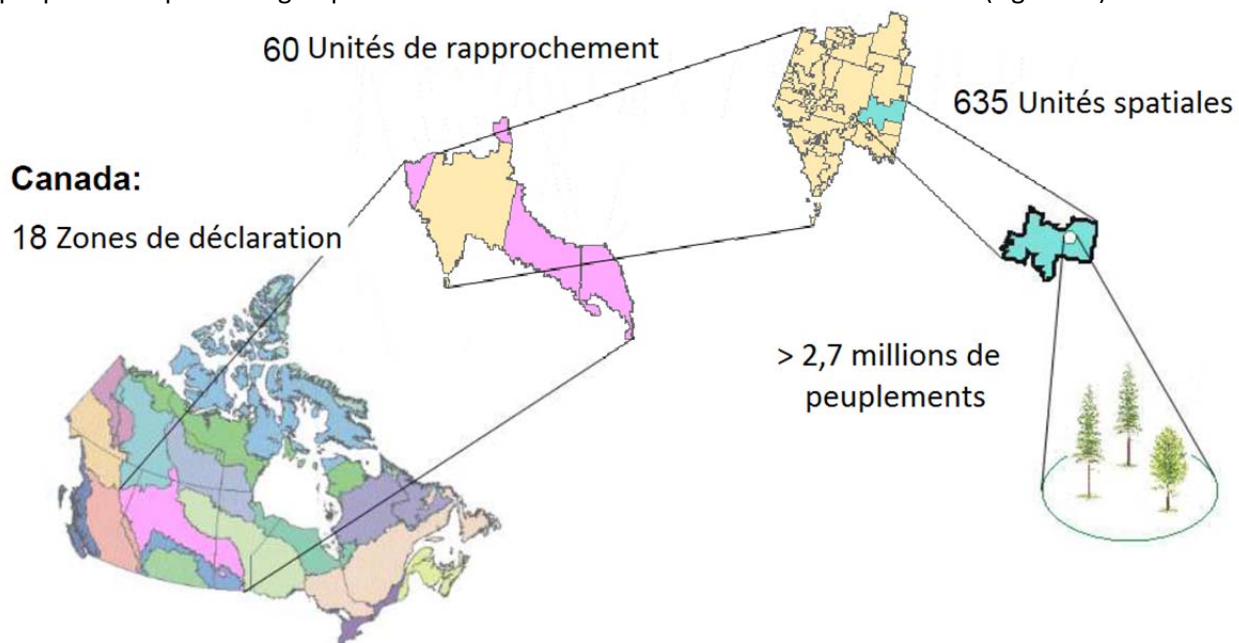


Figure 12. Structure spatiale au sein du MBC-SFC3 (Source : Groupe de travail chargé de la comptabilisation du carbone du SCF).

6.2 Prochaine génération du MBC-SFC

La version actuelle du MBC-SFC est la version 3.0. La prochaine version, MBC-SFC3.5, en cours d'élaboration, présentera une nouvelle technologie informatique. Elle comportera une nouvelle génération de plateforme de modélisation avec traitement parallèle, des algorithmes plus rapides et des processus représentés dans des modules distincts, mais interactifs. La nouvelle approche modulaire permet une plus grande polyvalence et une meilleure souplesse tout en offrant une excellente efficacité computationnelle. Les modules s'appuieront sur des couches de données spatiales partagées (p. ex., climat, environnement, perturbations, etc.) et interagiront avec un modèle d'intégration globale qui vérifie la conservation de la masse et met à jour les données sur les réservoirs de C (référencés selon 5 réservoirs de carbone du GIEC), et assurera le suivi et le résumé des flux par catégorie.

Le MBC-SFC3.5 sera guidé par les événements, à l'aide d'un intervalle de temps variable (1 an ou moins). Il sera possible d'exécuter le modèle à l'aide de mises en œuvre spatialement explicites (p. ex., résolution de 30 m) ou à référence spatiale (polygone). Les questions liées à la mise en œuvre des processus spatialisés (p. ex., la contagion) comme la propagation du feu et les flux latéraux doivent encore être traitées. Le MBC-SFC3.5 est encore en phases d'avant-projet et d'élaboration.

Le MBC-SFC4 représentera la nouvelle science en matière de C appliquée à une approche modulaire qui facilitera l'assimilation des données, et les analyses sur la vulnérabilité et les incertitudes. Par exemple, le modèle de croissance empirique pourrait être remplacé par un modèle de croissance basé sur le processus qui comprend la sensibilité de la croissance liée aux changements environnementaux. Le MBC-SFC4 sera la version dans laquelle le module sur les tourbières se trouvera.

Les changements apportés au MBC-SFC seront également apportés au SNSPCRCF. Le SNSPCRCF2 sera un nouveau système d'établissement de rapports comprenant toutes les répercussions anthropiques qui réduisent la dépendance aux données de l'inventaire territorial ou provincial et augmentent la dépendance aux produits de télédétection à l'échelle nationale pour les forêts aménagées et non aménagées. Les produits de télédétection auront une résolution élevée avec une représentation spatialement explicite des répercussions des perturbations naturelles et anthropiques. Les données de sortie du module sur les tourbières seront intégrées au SNSPCRCF2 dans le but de documenter les rapports et les estimations sur les émissions de GES nationaux, une fois que les essais, les évaluations par les pairs et autres experts seront terminés.

6.3 Approche et intégration modulaires globales

Le MBC-SFC modélise actuellement les forêts sur des sols minéraux. Ce module sur les tourbières (Modèle canadien en matière de tourbières – MCaT) traitera des émissions et des éliminations de C pour les systèmes qui développent une couche organique profonde (tourbe) avec une nappe phréatique, en modélisant les flux de C des tourbières (CO₂, CH₄) associés à l'hydrologie simulée, à la biomasse des tourbières et aux transferts de C à l'intérieur et à l'extérieur des tourbières. Le MCaT peut être exécuté en tant que programme autonome ou dans le cadre du MBC-SFC. On fera des estimations aux échelles spatiales et temporelles compatibles avec celles du MBC-SFC. Le MCaT maintiendra une structure de programme qui permettra d'intégrer facilement un plus grand nombre d'approches de modélisation basées sur les processus détaillés, qui seront ajoutées à l'avenir lorsque l'on bénéficiera d'une meilleure compréhension des processus des tourbières et de leurs contrôles. La structure du programme permettra également de faire des prévisions spatiales (paysage, site) et temporelles (mensuelles, quotidiennes) plus précises (c.-à-d. infranationales), au besoin.

6.4 Résumé des catégories de modélisation

Le M_{CaT} sera conçu et appliqué pour les différents types de tourbières; en particulier, les bogues boisés, arborés et ouverts, les tourbières basses pauvres et riches et les marécages boisés et arborés. La quantité et la présence d'arbres, d'arbustes, de carex et de mousse varieront selon ces types de tourbières. Puisque ces types de tourbières varient en matière de types de végétaux fonctionnels et de régimes hydrologiques, de nutriments et de pH, ils seront représentés en fonction de leurs taux de décomposition et de transfert propres au type de tourbière.

6.5 Résumé du module sur les tourbières

Le M_{CaT} sera conçu en étroite collaboration avec le Groupe de travail chargé de la comptabilisation du carbone du SCF avec des similitudes conceptuelles et structurelles par rapport au MBC-SFC3 (Kurz et al. 2009) en matière de mise en œuvre en tant que module dans la prochaine génération du MBC (MBC-SFC4) qui est en cours de développement. Pour la première version du modèle, le M_{CaT} sera appliqué à l'échelle nationale, pour les zones forestières aménagées et non aménagées, conformément aux approches à référence spatiale et spatialement explicites du MBC-SFC (les futures résolutions spatiales seront anticipées aussi bas que 30 m). Le M_{CaT} fonctionnera selon un intervalle annuel, selon un cadre temporel de modélisation allant de plusieurs années à un siècle ou plus, après l'augmentation de la cadence du modèle d'initialisation du réservoir de C. Pour répondre aux défis de la modélisation à l'échelle nationale, le M_{CaT} aura une représentation du processus simplifiée (c.-à-d. représentation à 1 dimension) des processus thermiques et hydrologiques, à l'aide d'un ensemble d'algorithmes empiriques et basés sur le procédé. Le modèle s'appuiera sur les données déjà accessibles et applicables à l'échelle nationale. Le M_{CaT} vise à simuler les flux de carbone dans les 100 cm supérieurs de la tourbe qui réagissent le plus aux changements climatiques et édaphiques, selon des cadres temporels contemporains (1990 à aujourd'hui) et futurs (dans 10 à 100 ans). Un résumé des principales caractéristiques du M_{CaT} est présenté ci-dessous et on invite le lecteur à se référer au document de conception du module du M_{CaT} (Shaw et al. 2016) pour de plus amples renseignements.

Plusieurs nouveaux réservoirs, flux, paramètres, modificateurs et algorithmes qui n'existent pas dans la version actuelle du MBC-SFC3 seront intégrés au nouveau M_{CaT} (Figures 13a et 13b). Les nouveaux types de plantes pour le module sur les tourbières comprennent une couche ligneuse (arbustes et petits arbres), du carex et de la mousse. L'inclusion de ces nouveaux types de plantes dans le M_{CaT} nécessitera des estimations de leur croissance nette en tant que catalyseur principal du modèle. Lorsque cela sera possible, le M_{CaT} s'appuiera sur le module ou le développement conceptuel relatif à la mousse de Bona et al. (2016) pour les mousses forestières. Des réservoirs de matière organique morte (MOM) supplémentaires seront également nécessaires pour les données d'entrée provenant des nouveaux réservoirs de biomasse et pour les réservoirs de la tourbe (acrotelme et catotelme). Les réservoirs de COD et de carbone inorganique dissous (CID) ne seront pas simulés dans le M_{CaT} pour l'instant, mais pourraient être ajoutés à l'avenir.

Les nouveaux flux et leurs taux seront nécessaires pour prendre en compte le renouvellement de la biomasse et les transferts de la chute de litière provenant des réservoirs de la biomasse ligneuse (tiges et branches, racines et feuillages), du carex (racines et feuillage) et de la mousse (sphaigne et hypnacée), ainsi que les taux de décroissance de base du réservoir de la MOM et de la tourbe et des proportions de répartition du carbone décomposé entre le transfert vers la MOM en aval ou les réservoirs de tourbe et l'atmosphère. Dans la version 2.0 (V2) du M_{CaT}, des modificateurs de la température et de l'humidité

seront introduits pour la croissance de la couche ligneuse, du carex et de la mousse, ainsi que des modificateurs de l'humidité pour la décomposition microbienne dans les réservoirs aérobiques et anaérobiques. Dans la version 1.0 (V1), l'émission nette de méthane (CH_4) libéré dans l'atmosphère sera simulée en fonction de la profondeur de la nappe phréatique selon Kurz et al. (1994), avec une complexité supplémentaire ajoutée dans les versions futures du modèle, notamment un modificateur qui reflétera les répercussions du transport par les plantes.

L'hydrologie est un facteur dominant de nombreux processus de tourbières. Un algorithme d'hydrologie spécialement conçu pour simuler la profondeur de la nappe phréatique sera un élément clé du module du MCaT et favorisera les modificateurs de l'humidité directement ou par l'intermédiaire de l'hydratation du sol simulée en fonction de la profondeur de la nappe phréatique. La V1 du MCaT simulera une nappe phréatique statique, alors que la V2 comportera une nappe phréatique dynamique. En modélisant directement la profondeur de la nappe phréatique, les deux approches évitent les simulations des écoulements latéraux et, par conséquent, réduisent la modélisation complexe hydrologique à 3 dimensions à une simulation unidimensionnelle au sein de chaque unité du modèle. Concernant l'approche de la nappe phréatique statique, une profondeur moyenne de nappe phréatique peut être prédite en fonction de l'indice de sécheresse (IS) de la Méthode canadienne de l'indice Forêt-Météo (IFM) (Waddington et al. 2012). Les nombreuses mesures historiques de la nappe phréatique de Zoltai et al. (2000) seront normalisées par l'indice de sécheresse (qui a été cartographié au Canada de façon quotidienne depuis 1980) et stratifiées par écozone et type de tourbière afin d'en tirer un modèle simple de nappe phréatique de tourbière en fonction des conditions météorologiques. Concernant l'approche de la nappe phréatique dynamique, la nappe phréatique sera estimée selon l'indice de sécheresse, puis mise à l'échelle temporelle à l'aide des mesures de contrôles environnementaux et écologiques aériens comme les caractéristiques de la végétation de surface, les paramètres du terrain et les paramètres climatiques.

Le pergélisol est un état qui touche une grande partie des tourbières du Canada. Dans le cadre de la V2 du développement du module, le régime thermique du sol sera simulé en intégrant le modèle NEST (Zhang et al. 2003) ou en intégrant des algorithmes du modèle NEST ou d'autres modèles au sein du MCaT. NEST est un modèle établi comportant des algorithmes mis à l'épreuve pour simuler une dynamique thermique du sol unidimensionnelle associée au dégel et au gel du pergélisol.

Les changements d'affectation des terres touchant les tourbières seront également intégrés au développement de la V2 du MCaT. Les flux de matières prélevées en raison de l'exploitation des arbres ou des tourbes seront également intégrés, ainsi que les pertes de biomasses dues aux perturbations causées par les incendies ou les inondations (p. ex., provenant de la création d'un réservoir hydroélectrique). Des matrices sur les perturbations seront mises en place pour s'adapter aux types de perturbations propres aux tourbières qui ont des répercussions sur les émissions et les éliminations de C.

6.6 Exécution du module sur les tourbières

Le M_{CaT} sera paramétré avec les données propres aux tourbières provenant des ouvrages et des bases de données existants. Ces paramètres contrôlent les flux du modèle de transferts carboniques de la mortalité, de décomposition et de redistributions carboniques des détritiques et de transferts physiques des détritiques. Une analyse de la sensibilité des paramètres du module sera réalisée pour déterminer les facteurs qui ont les répercussions les plus importantes sur les émissions et éliminations de CO₂ et les émissions de CH₄. Les détails au sujet des données propres aux types de tourbières provenant des ouvrages et des bases de données peuvent être consultés à la section 8 de ce document.

L'initialisation du M_{CaT} sera réalisée par l'exécution du module, étalonné pour chaque type de tourbière. Le M_{CaT} initialisera ses réservoirs de biomasse, ses réservoirs de MOM et de tourbe de façon à prendre en compte les effets des perturbations précédentes (Kurz et al. 1992; 2009). Les réservoirs de carbone du modèle seront initialisés à l'aide d'une base de données du carbone des tourbières (Tarnocai et al. 2005) pour laquelle on calculera la densité en carbone de la tourbe (acrotelme et catotelme) de différentes catégories de profondeurs pour différentes combinaisons de types de tourbières et d'écozones. Les connaissances combinées sur la densité carbonique des couches de tourbe et sur la couche allant jusqu'à 100 cm (déterminée au préalable par la profondeur de la nappe phréatique) permettront de calculer la teneur en carbone de la tourbe dans les réservoirs de tourbes. Le M_{CaT} simulera ensuite un ou plusieurs cycles en finissant par la dernière perturbation destructrice du site connue, puis le modèle s'exécutera en fonction des conditions contemporaines ou de scénarios d'avenir.

À la suite de l'initialisation, les simulations du module seront exécutées pour chaque site de tourbières à partir de la dernière perturbation jusqu'à l'année en cours. Les estimations des émissions nationales de carbone des tourbières seront produites en regroupant tous les sites de tourbières pour : 1) une période historique à l'aide d'une nappe phréatique (statique) moyenne à long terme, 2) la période contemporaine (1990 à aujourd'hui) à l'aide de l'historique de la nappe phréatique dynamique et des perturbations connues, et 3) des périodes futures à l'aide d'une nappe phréatique dynamique, du climat prévu et de scénarios de perturbations.

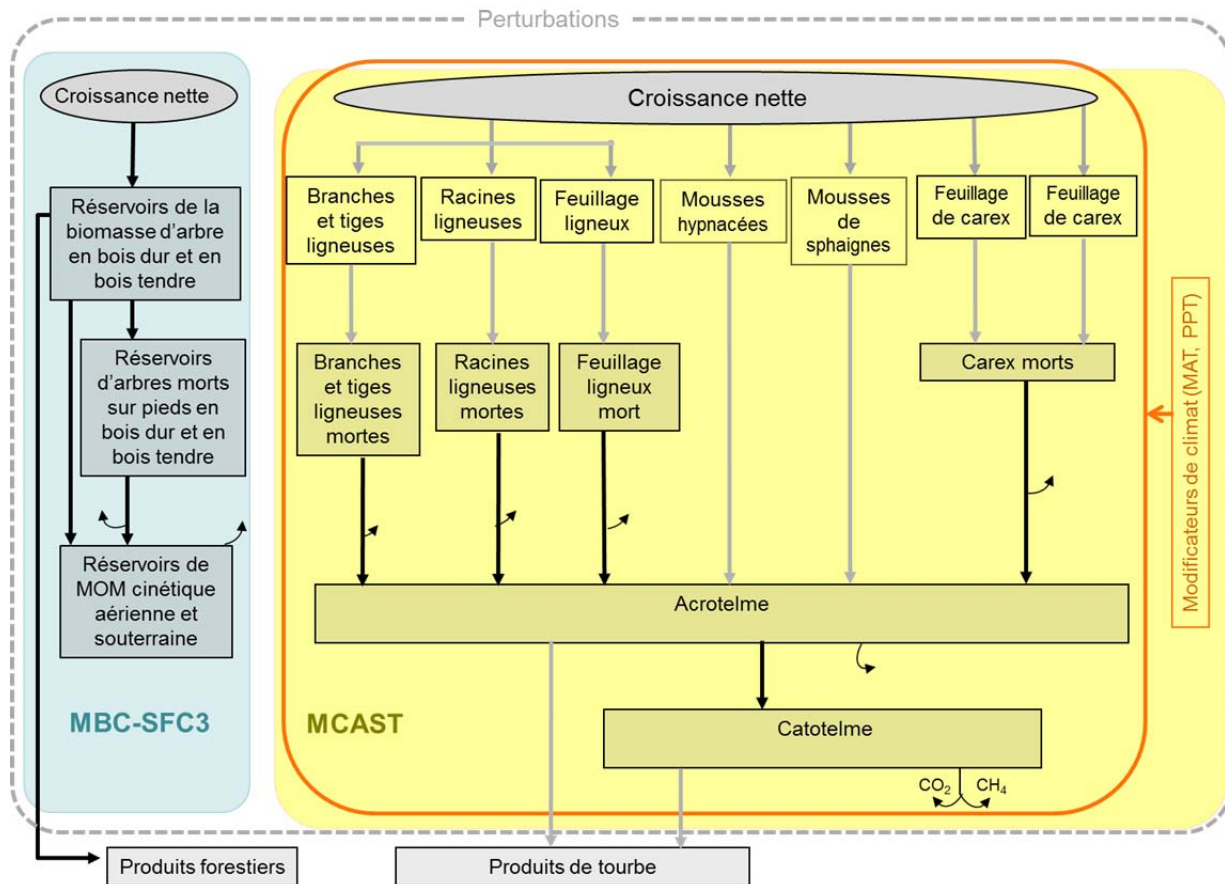


Figure 13a. La structure de modélisation du Modèle canadien en matière de tourbières (MCAst) version 1 avec une nappe phréatique statique (jaune), avec une structure simplifiée du Modèle du bilan du carbone du secteur forestier canadien (MBC-SFC3) (bleu). Les ellipses représentent les données d'entrée qui alimentent le modèle. La rangée de cases du haut représente les réservoirs de biomasse et toutes les cases en dessous représentent les réservoirs de matières organiques mortes (MOM) ou de tourbes (acrotelme et catotelme). Les flèches grises représentent les transferts de C à l'intérieur et à l'extérieur des réservoirs de biomasse en raison de la croissance ou de la mortalité, respectivement. Les autres transferts directs de C proviennent des tourbes (acrotelme et catotelme) et passent des réservoirs de tourbes au réservoir de produits de tourbe. Les flèches noires représentent le C prélevé d'un réservoir de MOM ou de tourbes en raison de la décomposition, et le sort de ce C qui est émis en tant que CO₂ (flèches courbées) (ou méthane dans le cas des tourbes catotelmes) ou transféré (flèche droite) vers les réservoirs en aval. Les modificateurs de climat peuvent donner des informations sur la croissance, la mortalité et les fonctions de décomposition de tout réservoir du MCAst et les perturbations peuvent avoir des répercussions sur le MCAst et le MBC-SFC3. AG, aérienne; MAT, température moyenne annuelle; PPT, précipitation; Vfast, très rapide.

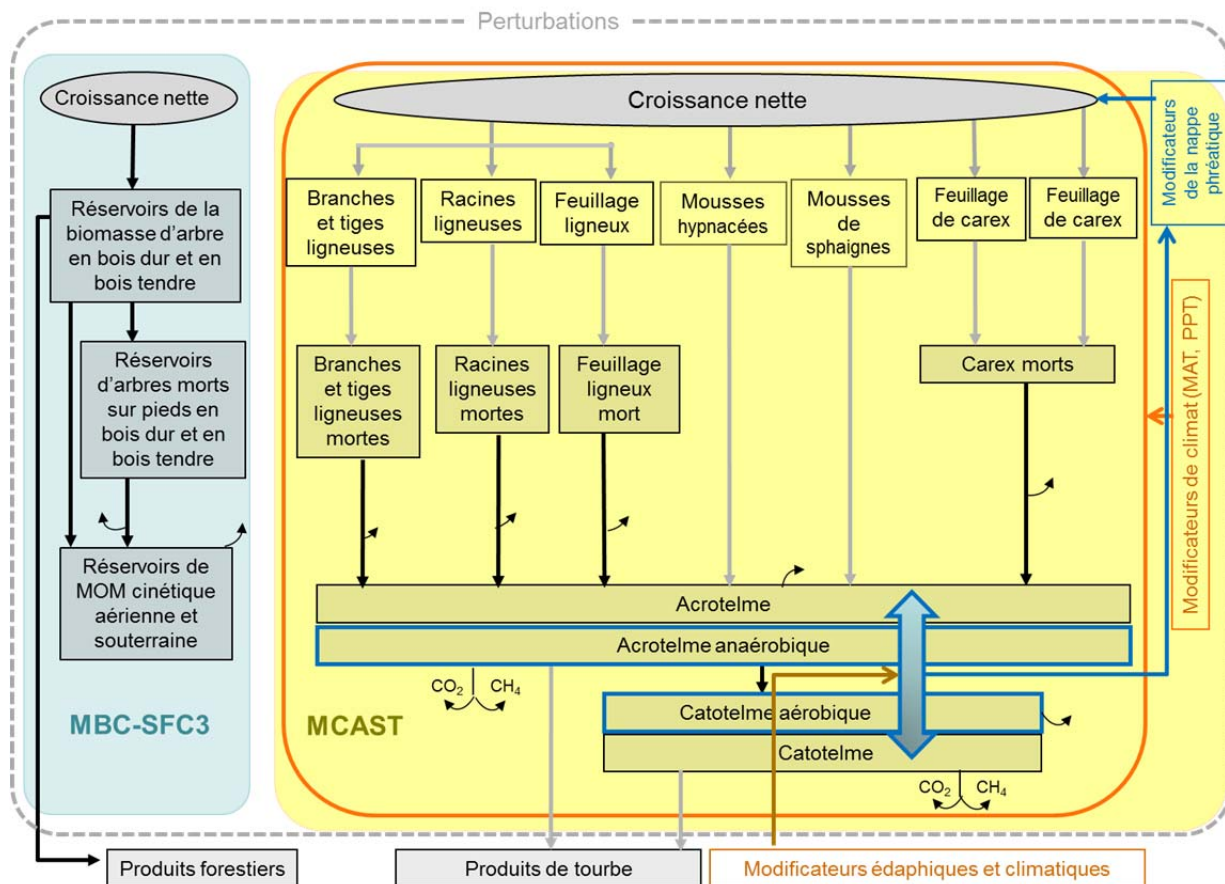


Figure 13b. La structure de modélisation du Module canadien en matière de tourbières (MCA_T) version 2 avec une nappe phréatique dynamique. La structure est la même que celle du MCA_T avec une nappe phréatique statique (Figure 2) avec l'ajout d'une nappe phréatique variable (flèche bidirectionnelle bleue) qui peut être influencée par les modificateurs édaphiques et climatiques (flèche brune). Les changements au sein de la nappe phréatique influencent à leur tour les modificateurs de la nappe phréatique (flèche bleue fine) en matière de productivité. Se référer à la Figure 6 pour plus de détails sur la mise en œuvre d'une nappe phréatique variable.

7. Couches spatiales

7.1 Quantité d'information et adéquation à la tâche

La modélisation réussie des émissions de C provenant des tourbières à l'échelle nationale nécessite des cartes des principaux types de tourbières à l'échelle nationale. Un grand nombre de cartes de tourbières ont été réalisées pour le Canada (Tableau 2). Dans l'idéal, nous souhaiterions avoir une représentation spatialement explicite de tous les types de tourbières à une résolution précise (30 m) indiquant les principaux éléments aériens de chaque type de tourbière (p. ex., tourbière ouverte, boisée ou arborée). En réalité, ces données idéales existent pour très peu de zones. Des données spatiales provenant de plusieurs sources ont été recueillies et chaque source de données a été évaluée pour vérifier son utilité dans le cadre de ce projet, conformément aux critères suivants :

1. Étendue spatiale : Les données couvrent-elles l'ensemble du pays, une écorégion précise, une province, un territoire ou une région locale?
2. Type de couverture : La couverture est-elle spatialement explicite ou à référence spatiale (c.-à-d. quantifie-t-elle l'étendue et l'emplacement des types de tourbières au sein de la région établie)?
3. Types de tourbières : Quelles sont les catégories de tourbières cartographiées?
4. Résolution spatiale : Quelle est la résolution (taille des pixels) des données?
5. Type de données : Les données sont-elles au format de trame ou vectoriel?

Une échelle d'évaluation a été élaborée selon ces critères (Tableau 2). La plupart des documents cartographiques ont été jugés comme étant seulement d'utilité moyenne aux fins de ce projet. La carte des terres humides de Ducks Unlimited (DU) représentait les meilleures données spatiales en matière de qualité. Cependant, à ce jour, nous possédons uniquement des données qui couvrent une petite zone pilote. L'étendue totale des données de DU, bien qu'elle ne soit pas nationale, couvre une grande partie de la forêt boréale du Nord (Figure 14).

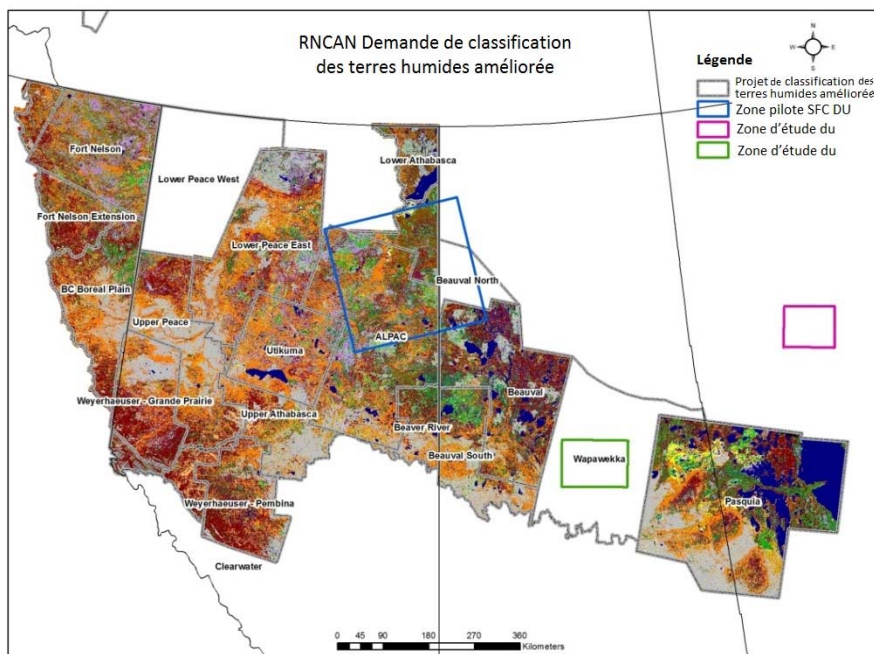


Figure 14. Zone pilote (rectangle aux frontières de l'Alb. et de la Sask.) demandée à Ducks Unlimited et étendue de leur carte sur l'ensemble de l'Ouest du Canada.

Le meilleur document national est la Base canadienne de données sur les tourbières qui offre une représentation à référence spatiale des zones des tourbières basses, des bogues et des marécages. Les cartes de l'inventaire national des terres humides du Canada d'Environnement Canada prévaudront probablement sur cette carte en tant que meilleur document national lorsqu'elles seront accessibles au public. Le sous-projet de cartographie spatiale tentera de synthétiser la meilleure carte nationale sur les tourbières mise à disposition, en synthétisant d'autres sources de données spatiales (p. ex., OTDD) et non spatiales (p. ex., la base canadienne de données sur les tourbières de l'Ouest) pour délimiter les principaux types de tourbières.

En raison de la fusion de couches de données dont la résolution et la qualité diffèrent, l'identification des tourbières sera plus précise pour certaines zones, et par conséquent, les estimations produites seront plus fiables que celles des zones dont la précision de l'identification des tourbières est plus faible. Des efforts seront déployés pour éliminer les incertitudes et les erreurs dans les zones où la couverture est de moins bonne qualité. La zone pilote pour laquelle DU a fourni les données de cartographie à haute résolution servira de zone de test pour la comparaison des cartes et pour évaluer notre capacité à associer plusieurs cartes afin d'améliorer nos connaissances sur les types de tourbières et la représentation de la couverture.

Tableau 2. Résumé des ensembles et composants de données spatiales saisies à partir des couches de données et classement de leur utilité pour ce projet. Un « X » indique que l'ensemble de données comporte des renseignements répondant à nos critères. Utilité de l'ensemble de données pour ce projet : « élevée » représente les ensembles de données dont la note est comprise entre 11 et 14, « moyenne » représente les ensembles de données dont la note est comprise entre 7 et 10 et « faible » les ensembles de données dont la note est inférieure à 7.

| Ensemble de données | Personne-ressource/ source | Descripteurs de l'ensemble de données | Catégories souhaitées de terres humides | | | | Étendue spatiale | | | | Description de la couverture | | Résolution spatiale | | Type de données | | Utilité des données | | | |
|--|---|--|---|-------|----------|--------|------------------|------------|----------|--------|------------------------------|------------------------|---------------------|--------|-----------------|-------|---------------------|-------|-------|--|
| | | | Tourbière basse | Bogue | Marécage | Marais | Canada | Provincial | Régional | Boréal | Occurrence | Spatialement explicite | ≤ 30 m | > 30 m | Vecteur | Trame | faible | moyen | élevé | |
| Base canadienne de données sur les tourbières | Géogratis ou http://ouvert.canada.ca/fr Tarnocai et al. 2005. | Bogue, tourbière basse, marais, marécage, étendue d'eau, bogue et tourbière basse | X | X | X | X | X | | | | | X | | X | | X | | | X | |
| Codes du descripteur : B = bogue, Mge = marécage, Tb = tourbière basse, X = bogue et tourbière basse, E = étendue d'eau, Q = aucune valeur. Des polygones sont attribués à l'une des catégories de terres humides, mais contiennent des renseignements sur le pourcentage de chaque catégorie de terres humides présente dans chaque polygone. | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Système d'information sur les sols du Canada | Ag Canada (Peter Schut, SISCAN). | Bogue, tourbière basse, terrain marécageux, toundra – arbuste haut, toundra – arbuste moyen, toundra – arbuste bas, toundra – herbes brisées – arbuste bas, baissière – humide. Marécage | X | X | X | X | X | | | | | X | | | X | X | | X | | |
| Cet ensemble de données présente trois caractéristiques, toutes des vecteurs : hydro (comprend les terres, les océans et l'eau douce), prov. (comprend les limites provinciales) et slc_v2r2. « slc_v2r2 » représente ce que comprennent les polygones des limites au sol. Cela doit être relié à un certain nombre de tableaux de descripteurs pour avoir un sens. Il y a un tableau de catégories de la végétation (veget_e) qui contient les descripteurs indiqués ci-dessus. [Le tableau pmdep fournit la catégorie Marécage.] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

| Ensemble de données | Personne-ressource/ source | Descripteurs de l'ensemble de données | Catégories souhaitées de terres humides | | | | Étendue spatiale | | | | Description de la couverture | | Résolution spatiale | | Type de données | | Utilité des données | | |
|--|------------------------------------|---|---|-------|----------|--------|------------------|------------|----------|--------|------------------------------|------------------------|---------------------|--------|-----------------|-------|---------------------|-------|-------|
| | | | Tourbière basse | Bogue | Marécage | Marais | Canada | Provincial | Régional | Boréal | Occurrence | Spatialement explicite | ≤ 30 m | > 30 m | Vecteur | Trame | faible | moyen | élevé |
| Base canadienne de données sur les tourbières de l'Ouest | Vitt et al. 2000 | Bogue, tourbière basse, marais, marécage, étendue d'eau peu profonde, terres non humides. (*voir ci-dessous) | X | X | X | X | | | | X | | X | | X | | | | X | |
| <p>Les catégories de terres humides sont sous-divisées en 4 catégories/divisions. La première division comprend les catégories indiquées ci-dessus. Les codes des descripteurs sont, dans l'ordre : B, Tb, M, Mge, E et Z ou MINL (lorsque le document indique Z dans les données réelles, cela est représenté par le descripteur MINL). Cet ensemble de données pourrait être divisé en plusieurs catégories : tourbières basses arborées et tourbières basses non arborées, au besoin. Il y a également une catégorie TOURBE qui représente à la fois les bogues et les tourbières basses dans chaque polygone. Chaque catégorie (définie par les 4 divisions) contient un % de couverture pour chaque polygone.</p> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Base de données compilées d'Environnement Canada | Shari Hayne (shari.hayne@ec.gc.ca) | | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | | | | | | | |
| <p>Selon les échanges par courriel, la récolte des données est toujours en cours, et aucune donnée n'est disponible à ce jour, mais un petit échantillon sera envoyé.</p> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Zones de pergélisol du Canada | Brown 1998 | Groupes des principales catégories : pergélisol continu, pergélisol discontinu, pergélisol isolé et pergélisol sporadique | | | | | X | | | | X | | X | X | | | X | | |
| <p>L'ensemble de données comporte un total de 13 catégories basées sur les 4 catégories principales susmentionnées. Aucune catégorie relative aux terres humides.</p> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

| Ensemble de données | Personne-ressource/ source | Descripteurs de l'ensemble de données | Catégories souhaitées de terres humides | | | | Étendue spatiale | | | | Description de la couverture | | Résolution spatiale | | Type de données | | Utilité des données | | |
|---|---|---|---|-------|----------|--------|------------------|------------|----------|--------|------------------------------|------------------------|---------------------|----------|-----------------|-------|---------------------|-------|-------|
| | | | Tourbière basse | Bogue | Marécage | Marais | Canada | Provincial | Régional | Boréal | Occurrence | Spatialement explicite | ≤ 30 m | > 30 m | Vecteur | Trame | faible | moyen | élevé |
| Inventaire forestier national (cartographie kNN) | Beaudoin et al. 2014 | | | | | | X | | | | | X | | X 250 | | X | | X | |
| Aucune catégorie relative aux terres humides. Les trames proposées sont les suivantes : 1. vég, 2. non vég, 3. vég arborée et 4. vég non arborée. Les trames pour les arbres sont proposées en tant que groupes de genre et espèces individuelles pour tous les arbres du Canada. Pour chaque trame, les descripteurs sont représentés comme un % de couverture de chaque cellule de trame. L'ensemble de données d'origine peut uniquement être ouvert dans ArcGIS 10. | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Carte de la couverture terrestre du Grand Nord | Adam Hogg | tourbière basse ouverte, tourbière basse arborée, bogue ouverte, bogue arborée, marécage, marais, étendue d'eau | X | X | X | X | | | | X | | | X | X | | X | | X | |
| Cette couche a été ajoutée à l'ensemble de données sur les terres humides de l'Ontario. Voir ci-dessous. | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Ensemble de données de l'inventaire des ressources forestières (IRF) | Adam Hogg | tourbière arborée (grands arbres) | | | | | | | | X | | | X | X | | X | | X | |
| Cette couche a été ajoutée à l'ensemble de données sur les terres humides de l'Ontario. Voir ci-dessous. | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Ducks Unlimited (T.N.-O., Yn., Alb., Sask., Man.) | Al Richard (a_richard@ducks.ca, 780-930-1254) | 19 catégories améliorées de terres humides | X | X | X | X | | | | X | | | X | X | | X | | | X |
| 19 catégories améliorées de terres humides ont été intégrées aux catégories Tourbière basse, Bogue, Marécage, Marais. La catégorie Tourbière basse arborée peut être séparée, au besoin. | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

| Ensemble de données | Personne-ressource/ source | Descripteurs de l'ensemble de données | Catégories souhaitées de terres humides | | | | Étendue spatiale | | | | Description de la couverture | | Résolution spatiale | | Type de données | | Utilité des données | | |
|---|--|---|---|-------|----------|--------|------------------|------------|----------|--------|------------------------------|------------------------|---------------------|--------|-----------------|-------|---------------------|-------|-------|
| | | | Tourbière basse | Bogue | Marécage | Marais | Canada | Provincial | Régional | Boréal | Occurrence | Spatialement explicite | ≤ 30 m | > 30 m | Vecteur | Trame | faible | moyen | élevé |
| Tourbières du Sud – Société protectrice du patrimoine écologique du Manitoba (fait partie de l'inventaire national des terres humides) | Stephen Carlyle (scarlyle@mhhc.mb.ca 204-784-4355) | Bogue, tourbière basse, marécage, marais, eau libre | X | X | X | X | | | X | | | X | | | | X | | X | |
| Labrador – Lac Minipi et Nebr. Avalon (fait partie de l'inventaire national des terres humides) T.-N.-L. | Mathew Mahoney (mathew.mahoney@ec.gc.ca) | Bogue, tourbière commerciale, tourbière basse, marais, étendue d'eau ouverte, étendue d'eau peu profonde, marécage, tourbière | X | X | X | X | | | X | | | X | | X | | X | | X | |
| mxd peut uniquement être ouvert dans ArcGIS 10. | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Carte des lacs nationaux | Mike Wulder et Joanne White | Plans d'eau | | | | | X | | | | | | | | | | | | |

| Ensemble de données | Personne-ressource/ source | Descripteurs de l'ensemble de données | Catégories souhaitées de terres humides | | | | Étendue spatiale | | | | Description de la couverture | | Résolution spatiale | | Type de données | | Utilité des données | | |
|--|--|---|---|-------|----------|--------|------------------|------------|----------|--------|------------------------------|------------------------|---------------------|--------|-----------------|-------|---------------------|-------|-------|
| | | | Tourbière basse | Bogue | Marécage | Marais | Canada | Provincial | Régional | Boréal | Occurrence | Spatialement explicite | ≤ 30 m | > 30 m | Vecteur | Trame | faible | moyen | élevé |
| Ensemble de données de l'OTDD | Mike Wulder (SCF) et Morgan Cranny (RNCan) | Herbe des terres humides, arbuste des terres humides, zone arborée des terres humides | | | | | X | | | | | X | | X | | X | | X | |
| <p>À partir d'un document de GéoBase : Couverture du sol, circa 2000-vectorielle Spécifications de produit Éd. 1.0 (www.geobase.ca/doc/specs/pdf/GeoBase_LCC200V_product_specifications_en.pdf) La liste de code d'origine et les équivalents en trame : Zone arborée des terres humides = 81 - maintenant 2, arbuste des terres humides = 83 - maintenant 3, herbe des terres humides = 83 - maintenant 4</p> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Terres humides de l'Ontario | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <p>Il s'agit de la fusion de trois ensembles de données : Terres humides de l'Ontario, Inventaire des ressources forestières et Carte de la couverture terrestre du Grand Nord. Les descripteurs de la trame sont les suivants : 0 = bogue, 1 = tourbière basse, 2 = marécage, 3 = marais, 4 = tourbière arborée, 5 = inconnu, 6 = étendue d'eau ouverte. La majeure partie de la zone du centre/sud de l'Ontario est référencée comme « inconnu », car il s'agit d'un projet de cartographie en cours.</p> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

8. Bibliothèque de données sur les parcelles pour l'initialisation du modèle, la vérification des liens, l'étalonnage et l'évaluation

Une liste des ensembles de données de terrain à utiliser pour le paramétrage, l'étalonnage et la validation du modèle est fournie dans le tableau 3. Les descripteurs principaux proposés dans chaque ensemble de données et pertinents pour notre projet de modélisation sont fournis. Les critères pour juger l'utilité des ensembles de données sont fondés sur le nombre de variables pertinentes incluses. À ce jour, aucun des ensembles de données ne contient toutes les variables nécessaires, par conséquent plusieurs ensembles de données doivent être évalués, intégrés et interprétés afin de vérifier leur adéquation pour être utilisés dans le modèle et par rapport aux différents types de tourbières fonctionnels. Les réservoirs et les paramètres du modèle sont rarement, voire jamais, équivalents aux réservoirs et paramètres mesurés sur le terrain. Par conséquent, une grande partie des données collectées sur le terrain et intégrées à cette liste doit être convertie et réinterprétée pour pouvoir être utilisée pour les réservoirs et paramètres du modèle.

Tableau 3. Résumé des ensembles de données de source ponctuelle sur le terrain, composants à saisir dans la base de données et classement du contenu d'information et de l'utilité des données pour ce projet. Un « X » indique que l'ensemble de données a été examiné et qu'il comporte des renseignements répondant à nos critères. Le nombre dans la colonne « classement de la valeur potentielle » est le nombre de « X » calculés pour une source et représente l'étendue des types de données au sein d'une source.

| Ensembles de données | Personne-ressource ou référence | Profondeur de la nappe phréatique | Date de mesure de la nappe phréatique | Profondeur de la tourbe | Type de terres humides | % couverture par couche de végétation | Masse volumique en vrac | Densité de la matière organique | Carbone organique | Densité de la tourbe | pH | Chimie du sol | Données sur l'âge de la tourbe | Flux de CH ₄ /CO ₂ | Biomasse aérienne et répartition | Rapports biomasse aérienne/souterraine | Biomasse souterraine et répartition | Taux de productivité/renouvellement | Temps jusqu'à la concentration maximale de biomasse | Intervalles entre les perturbations | Décomposition et taux de transfert de la litière aérienne | Décomposition et taux de transfert de la litière souterraine | Décomposition de la tourbe acrotelme (taux, Q10) | Décomposition de la tourbe catotelme (taux, Q10) | Taux d'accumulation de la tourbe à court terme | Taux d'accumulation de la tourbe à long terme | Évapotranspiration | Classement de l'utilité | | |
|--|---|-----------------------------------|---------------------------------------|-------------------------|------------------------|---------------------------------------|-------------------------|---------------------------------|-------------------|----------------------|----|---------------|--------------------------------|--|----------------------------------|--|-------------------------------------|-------------------------------------|---|-------------------------------------|---|--|--|--|--|---|--------------------|-------------------------|------------------|---|
| ÉcoAtlas du Canada | Geogratias ¹ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | X | 1 | |
| Base canadienne de données sur les tourbières | Tarnocai et al. 2005 ² , Tarnocai et al. 2011 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 0 |
| Base canadienne de données des tourbières de l'Ouest | Halsey et al. 2003 ³ | X | X | X | X | X | | | | | X | X | | | | | | | | | | | | | | | | | 7 | |
| | Zoltai et al. 2000 ⁴ | X | X | X | X | X | X | | X | X | X | X | | | | | | | | | | | | | | | | | 10 | |
| | Vitt et al. 2000 ^{5,15} | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | NR ¹⁶ | |
| Bassin de MacKenzie | Beilman et al. 2008 ^{6,15} | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | NR | |
| Données de Riley | Riley 1994, 2011 ⁷ , Riley et Michaud 1989 | X | | X | | | | | X | | X | X | | | | | | | | | | | | | | | | | 5 | |
| Base de données de la région circumpolaire Nord | Hugelius et al. 2013a ⁸ and Hugelius et al. 2013b ⁸ | | | | | | | | X | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 1 | |
| Données diverses de base sur la tourbe du CGC | MacDonald et al. 2006 ⁹ | | | | | | | | | | | | X | | | | | | | | | | | | | | | | 1 | |

| Ensembles de données | Personne-ressource ou référence | Profondeur de la nappe phréatique | Date de mesure de la nappe phréatique | Profondeur de la tourbe | Type de terres humides | % couverture par couche de vég | Masse volumique en vrac | Densité de la matière organique | Carbone organique | Densité de la tourbe | pH | Chimie du sol | Données sur l'âge de la tourbe | Flux de CH ₄ /CO ₂ | Biomasse aérienne et répartition | Rapports biomasse aérienne/souterraine | Biomasse souterraine et répartition | Taux de productivité/renouvellement | Temps jusqu'à la concentration maximale de biomasse | Intervalles entre les perturbations | Décomposition et taux de transfert de la litière aérienne | Décomposition et taux de transfert de la litière souterraine | Décomposition de la tourbe acrotelme (taux, Q10) | Décomposition de la tourbe catotelme (taux, Q10) | Taux d'accumulation de la tourbe à court terme | Taux d'accumulation de la tourbe à long terme | Évapotranspiration | Classement de l'utilité | |
|--|---|-----------------------------------|---------------------------------------|-------------------------|------------------------|--------------------------------|-------------------------|---------------------------------|-------------------|----------------------|----|---------------|--------------------------------|--|----------------------------------|--|-------------------------------------|-------------------------------------|---|-------------------------------------|---|--|--|--|--|---|--------------------|-------------------------|----|
| Base de données sur la tourbe de Lehigh | Loisel et al. 2014 ¹⁰ | | | | | | X | X | X | X | | | X | | | | | | | | | | | | | | | | 5 |
| Données de McLaughlin | McLaughlin et Webster 2013 ^{11,15} | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | NR |
| | Akumu et McLaughlin 2013 ¹² | | | X | | | X | | X | X | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 4 |
| Données sur la biomasse et la productivité | Campbell et al. 2000 ¹³ | | | | X | | | | | | | | | | X | | | X | | | | | | | | | | | 3 |
| | autres sources de références ¹³ | | | | X | | | | | | | | | | X | X | | | X | | | | | | | | | | 5 |
| Données sur la décomposition | Thormann et al. 2001 ¹⁴ et autres sources | | | | X | | | | | | | | | | | | | | | | X | X | | | | | | | 3 |
| Mer Bleue | Murphy et al. 2009 ¹⁵ et autres sources | | | | X | | | | | | | | | | X | X | X | | | | | | | | | | | | 4 |
| | Moore et al. 2002 ¹⁵ | | | | X | | | | | | | | X | X | X | | X | | | | | | | | X | | | | 6 |
| IFN | G Stinson et G Russo ¹⁵ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | NR |
| Classification canadienne des écosystèmes forestiers | K Chapman et K Baldwin ¹⁵ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | NR |
| ABMI | http://www.abmi.ca/home/data/welcome-data-portal.html ou abmiinfo@ualberta.ca ¹⁵ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | NR |

- ¹ données saisies
- ² base de données spatiale saisie, pas de données de sources ponctuelles
- ³ 3 tableaux, 100 sites saisies
- ⁴ 3 tableaux, 626 sites saisies
- ⁵ base de données avec 818 dossiers non trouvés (mais comprend les 626 sites de Zoltai et al. 2000)
- ⁶ données pas encore saisies (demande - J Bhatti) : 203 sites terrestres d'échantillonnage
- ⁷ ensembles de données fournis par EDR_database OFRI
- ⁸ ensembles de données ponctuelles et polygones
- ⁹ 83 dossiers saisies pour l'emplacement, l'âge, la recherche de références d'origine pour le type, les données sur la profondeur de base
- ¹⁰ 30 des 96 principaux dossiers canadiens saisies
- ¹¹ données non saisies
- ¹² données sur les 27 sites de la mine Victor saisies, publication en attente
- ¹³ tous les tableaux saisies
- ¹⁴ tableaux saisies
- ¹⁵ données non saisies
- ¹⁶ non classé

9. Évaluation du modèle et analyses d'incertitude

Les données provenant des sites expérimentaux de tourbières (Tableau 4) contenant des mesures d'émissions et d'éliminations de C sur plusieurs années seront utilisées pour l'évaluation initiale des données de sortie du module en fournissant les mesures des réservoirs et flux sélectionnés qui peuvent être utilisées pour comparer les prévisions du modèle.

Les analyses de sensibilité et d'incertitude du modèle seront réalisées dans une phase future du projet pour quantifier la sensibilité des données de sortie du modèle par rapport aux données d'entrée des paramètres. Les analyses d'incertitude réalisées à l'aide des simulations Monte-Carlo avec des écarts simultanés de paramètres pour toute une série de valeurs seront utilisées pour estimer l'incertitude globale relative aux prévisions du modèle.

Tableau 4. Liste des sites d'évaluation, leurs emplacements, leurs types de tourbières et leurs données

| Nom du site | Emplacement | Types de tourbe | Données | Années |
|---|---|--|--|--|
| White River | Écozone du bouclier boréal (ON) | Tourbière basse riche Tourbière basse intermédiaire Tourbière basse pauvre | CO ₂ , CH ₄ , échange net de l'écosystème, nappe phréatique, biomasse | 2004-aujourd'hui (nappe phréatique) 2009-2012 (CO ₂ , CH ₄ , échange net de l'écosystème) |
| Mine Victor | Plaine hudsonienne (ON) | Tourbière basse riche Tourbière basse intermédiaire Tourbière basse pauvre Bogue Palse | Nappe phréatique Biomasse, CO ₂ , CH ₄ , échange net de l'écosystème | 2010-aujourd'hui (nappe phréatique) 2011-aujourd'hui (tour de flux CO ₂ , CH ₄ , échange net de l'écosystème pour la bogue et la tourbière basse) |
| Tourbière arctique et bogue boisée Churchill (Man.) | Tourbière subarctique et terres humides boisées | Tourbière pauvre et bogues boisées | Nappe phréatique, flux de chaleur, biomasse, CO ₂ , échange net de l'écosystème | 1994 à 1998 |
| BOREAS Nord | Plaines boréales | Tourbière basse pauvre | Surface foliaire, flux de chaleur, nappe phréatique, flux de CO ₂ , CH ₄ | 1994, 1995, 1996 |
| BOREAS Sud | Plaines boréales | Tourbière basse riche | Surface foliaire, flux de chaleur, nappe phréatique, flux de CO ₂ , CH ₄ | 1994, 1995, 1996 2004 à 2008 |
| BOREAS Sud | Plaines boréales | Bogue | Surface foliaire, flux de chaleur, nappe phréatique, flux de CO ₂ , CH ₄ | 1994, 1995, 1996 |

| Nom du site | Emplacement | Types de tourbe | Données | Années |
|-----------------------|------------------|-------------------------------------|---|-------------|
| Sites Fluxnet Alberta | Plaines boréales | Tourbière basse et bogue | Surface foliaire, flux de chaleur, nappe phréatique, flux de CO ₂ , CH ₄ | 2004 à 2008 |
| Vallée du Mackenzie | Alb, T.-N.-O. | Bogues et cicatrices d'effondrement | Surface foliaire, flux de chaleur, nappe phréatique, flux de CO ₂ , CH ₄ (mesures statiques) | 2008 à 2010 |
| Transect de la tourbe | Sask. | Bogue et tourbière basse riche | Surface foliaire, flux de chaleur, nappe phréatique, changements de végétation, biomasse aérienne et souterraine, décomposition | 2002 à 2005 |

10. Activités prévues à l'étape 1 (1^{re} et 2^e années)

Nous présentons à présent les activités et éléments livrables de l'étape 1 du projet :

10.1 Base de données spatiales des types de tourbières

Une étude des couches de données spatiales sur les tourbières consultables sera réalisée. On demandera la permission d'obtenir des couches de données pertinentes pour le projet et de les compiler dans une base de données de géosciences. On réalisera un résumé des couches de données pour créer une couche des « meilleures données disponibles » sur les principaux types de tourbières identifiés afin de les intégrer à ce module. On établira des critères d'évaluation de l'utilité des couches de données pour ce projet. On évaluera les lacunes et les incertitudes relatives aux couches de données.

10.2 Bases de données de terrain sur les sources ponctuelles et zones de validation des données

On réalisera une étude des données de terrain basées sur un système de points concernant les propriétés des tourbières. On demandera la permission d'obtenir des couches de données pertinentes pour le projet à des fins d'étalonnage, de paramétrage et de réalisation de tests.

10.3 Module

On rédigera un document de conception du module pour le M_{Ca}T qui comprend une structure de réservoir révisée, des algorithmes et les exigences en matière de données qui indiquent les processus uniques qui surviennent dans les tourbières. Le document de conception comprendra une liste des paramètres nécessaires pour chaque type de tourbière.

10.4 Distribution spatiale des catégories de terres humides et facteurs d'émission

À l'aide des facteurs d'émission provenant d'études sur le terrain publiées antérieurement au sujet de différents types de tourbières du Canada et de la zone des types de tourbières trouvée dans la base de

données canadienne sur les tourbières, les estimations nationales initiales sur l'émission de méthane et les émissions brutes et nettes de dioxyde de carbone seront préparées pour améliorer les valeurs existantes (Kurz et al. 1992, Moore et Roulet 1995, Roulet 2000).

10.5 MCaT avec simulation de nappe phréatique statique

La version 1 du MCaT sera encodée à l'aide de l'hypothèse d'une nappe phréatique statique. Le module sera testé et évalué avec les données provenant de la base de données de validation. À l'aide de la couche des « meilleures données disponibles » sur les tourbières (indiquée à la section 10.1), on exécutera le MCaT à l'échelle nationale pour obtenir des estimations des émissions et éliminations de dioxyde de carbone et de méthane provenant des tourbières.

10.6 Documentation du modèle et publication des résultats

On documentera les détails du module du MCaT et on résumera, dans un bref rapport, les résultats initiaux obtenus grâce au module. On préparera un ou plusieurs manuscrits sur les méthodes et les résultats en vue de leur évaluation par des pairs scientifiques.

11. Activités de l'étape 2 (3^e année)

Nous présentons à présent les activités et éléments livrables de l'étape 2 du projet :

11.1 MCaT avec simulation de nappe phréatique dynamique

La version 2 du MCaT sera mise en œuvre à l'aide d'un algorithme de nappe phréatique dynamique. Le module sera testé et évalué avec les données provenant de la base de données de validation. À l'aide de la couche des « meilleures données disponibles » sur les tourbières (indiquée à la section 10.1), on exécutera le MCaT à l'échelle nationale pour obtenir des estimations des émissions et éliminations de dioxyde de carbone et de méthane provenant des tourbières.

11.2 Pergélisol

On évaluera les approches visant à intégrer le modèle NEST ou à mettre en œuvre les algorithmes principaux du modèle NEST ou d'autres modèles. L'intégration de la température terrestre permettrait à la future version du MCaT de simuler la dynamique du pergélisol.

11.3 Données d'activités

Les incendies, le dégel du pergélisol, l'infestation d'insectes, l'exploitation forestière, l'exploitation des tourbières, les inondations provenant du développement hydroélectrique, le développement industriel et l'infrastructure associée et le prélèvement de la tourbe pour l'exploitation minière sont des activités majeures qui influent sur les réservoirs et les flux au sein des tourbières. On réalisera une étude des couches de données disponibles décrivant ces activités et on demandera la permission d'obtenir des couches de données.

11.4 Représentation des perturbations anthropiques et naturelles

On réalisera une étude des ouvrages et des consultations auprès d'experts pour créer des matrices sur les perturbations, pour les différents types de perturbations qui surviennent au sein des systèmes de tourbières.

11.5 Estimations des émissions et éliminations nationales de C dans les tourbières

À l'aide de la couche des « meilleures données disponibles » sur les types de tourbières, d'une nappe phréatique dynamique et de la simulation des températures terrestres (pergélisol) avec les matrices sur les perturbations, le modèle générera des estimations historiques, contemporaines et futures basées sur des scénarios des émissions et éliminations nationales de C dans les tourbières. Ces informations pourront être intégrées dans les futurs rapports internationaux, une fois que leur évaluation par des pairs et autres processus de diligence raisonnable auront été réalisés.

11.6 Documentation du modèle et publication des résultats

On documentera les détails du module du MCaT de l'étape 2 et on résumera, dans un bref rapport, les résultats initiaux obtenus grâce au module révisé. On préparera un ou plusieurs manuscrits sur les méthodes et les résultats en vue de leur évaluation scientifique par des pairs.

12. Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier le Programme de développement des marchés du gouvernement du Canada, qui soutient les recherches scientifiques liées à la mise en œuvre de l'Entente sur la forêt boréale canadienne (EFBC), pour le financement accordé. Nous souhaitons également remercier Shari Hayne pour les renseignements fournis sur les exigences internationales en matière de rapports sur les sols organiques.

13. Références citées

- Akumu, C. E.; McLaughlin, J. W. 2013. Regional variation in peatland carbon stock assessments, northern Ontario, Canada. *Geoderma* 209-210: 161-167.
- Beaudoin, A.; Bernier, P.Y.; Guindon, L.; Villemaire, P.; Guo, X.J.; Stinson, G.; Bergeron, T.; Magnussen, S.; Hall, R. J. 2014. Mapping attributes of Canada's forests at moderate resolution through k NN and MODIS imagery. *Can. J. For. Res.* 44(5), 521-532.
- Beilman, D. W.; Vitt, D. H.; Bhatti J. S.; Forest, S. 2008. Peat carbon stocks in the southern Mackenzie River Basin: uncertainties revealed in a high-resolution case study. *Global Change Biol.* 14(6): 1221-1232.
- Bernier, P.; Kurz, W.A.; Lempriere, T.; Ste-Marie, C. 2012. Plan d'action sur la science du carbone forestier au Canada : 2012–2020. Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts, Ottawa, Ontario. 56 p.
- Brown, J. 1998. Frozen Ground. *The News Bulletin of the International Permafrost Association.* No. 22, December 1998, 48 pp.
- Bona, K.A.; Shaw, C.H.; Fyles, J.; Kurz, W.A. 2016. Modelling moss-derived carbon in upland black spruce forests. *Canadian Journal of Forest Research* (in press) doi:10.1139/cjfr-2015-0512
- Campbell, C.; Vitt, D.H.; Halsey, L.A.; Campbell, I.D.; Thormann, M.N.; Bayley, S.E. 2000. Net primary production and standing biomass in northern continental wetlands. *Nat. Resour. Can., Can. For. Serv., North. For. Cent., Edmonton, Alberta. Inf. Rep. NOR-X-369.*
- Centre for Land and Biological Resources Research. 1996. Version 2.2 des Pédo-paysages du Canada, v.2.2. Direction de la recherche, Agriculture et Agroalimentaire Canada. Ottawa. Disponible à : <http://sis.agr.gc.ca/siscan/nsdb/slc/v2.2/index.html> [consulté mars 2015].
- Environment Canada. 2012. Developing wetland indicators under the Canadian Environmental Sustainability Indicators Initiative (CESI). Wetlands Indicators development Phase 2. Report for fiscal year 2011-2012. Canadian Wildlife Service, Habitat and Ecosystem Conservation, Landscape and Protected Areas Policy and Planning Section. Unpublished report.
- Halsey, L. A.; Vitt, D. H.; Beilman, D. W.; Crow, S.; Mehelicic, S.; Wells, R. 2003. Alberta wetland inventory classification system version 2.0. Alberta Sustainable Resource Development, Pub. No. T/031, Edmonton, Alberta Canada. 118 pp.
- Hugelius, G.; Tarnocai, C.; Broll, G.; Canadell, J. G.; Kuhry P.; Swanson, D. K. 2013a. The Northern Circumpolar Soil Carbon Database: spatially distributed datasets of soil coverage and soil carbon storage in the northern permafrost regions. *Earth Syst. Sci. Data* 5(1): 3-13.
- Hugelius, G.; Bockheim, J. G.; Camill, P.; Elberling, B.; Grosse, G.; Harden, J. W.; Johnson, K.; Jorgenson, T.; Koven, C. D.; Kuhry, P.; Michaelson, G.; Mishra, U.; Palmtag, J.; Ping, C. L.; O'Donnell, J.; Schirrmeister, L.; Schuur, E.A.G.; Sheng, Y.; Smith, L. C.; Strauss J.; Yu, Z. 2013b. A new data set for estimating organic carbon storage to 3 m depth in soils of the northern circumpolar permafrost region. *Earth Syst. Sci. Data* 5(2): 393-402.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2013a. Supplement to the 2006 Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Wetlands (Wetlands Supplement). Available from <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/home/wetlands.html> [date d'accès au site Web 2015-03-16].
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2013b. Climate change 2013: The physical science basis. Contribution to the 5th Assessment Report, the SRES (Special Report on Emission Scenarios). Available from <http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/> [dernière date d'accès 2015-03-16].

- Klinger, L.F. 1996. The myth of the classic hydrosphere model of bog succession. *Arct. Alp. Res.* 28: 1-9.
- 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. *Miti. Adapt. Strat. Global Change*, 11(1): 33-43.
- Kurz, W.A.; Apps, M.J.; Bellan, D.; Gignac, D.; Hogg, E.; Seburn, D.; Warner, B.; Wein, R.; Vitt, D.; Zoltai, S.C. 1994. A carbon dynamics model of Canadian peatlands. Draft design document.
- Kurz, W.A.; Apps, M.J.; Webb, T.M.; McNamee, P.J. 1992. Le bilan du carbone du secteur des forêts du Canada: Phase I. Forêts Canada, Région du Nord-Ouest, Centre de foresterie du Nord, Edmonton (Alberta). Rapport d'information NOR-X-326F.
- 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.; Apps, M.J. 2009. CBM-CFS3: a model of carbon-dynamics in forestry and land-use change implementing IPCC standards. *Ecol. Model.* 220(4): 480-504.
- Kurz, W.A.; Shaw, C.H.; Boisvenue, C.; Stinson, G.; Metsaranta, J.; Leckie, D.; Dyk, A.; Smyth, C.; Neilson, E.T. 2013. Carbon in Canada's boreal forest – a synthesis. *Environ. Rev.* 21: 260 – 292.
- Loisel, J.; Yu, Z.; Beilman, D.W.; Camill, P.; Alm, J.; Amesbury, M.J.; Anderson, D.; Andersson, S.; Bochicchio, C.; Barber, K.; Belyea, L.R.; Bunbury, J.; Chambers, F.M.; Charman, D.J.; De Vleeschouwer, F.; Fiałkiewicz-Kozieł, B.; Finkelstein, S.A.; Gałka, M.; Garneau, M.; Hammarlund, D.; Hinchcliffe, W.; Holmquist, J.; Hughes, P.; Jones, M.C.; Klein, E.S.; Kokfelt, U.; Korhola, A.; Kuhry, P.; Lamarre, A.; Lamentowicz, M.; Large, D.; Lavoie, M.; MacDonald, G.; Magnan, G.; Mäkilä, M.; Mallon, G.; Mathijssen, P.; Mauquoy, D.; McCarroll, J.; Moore, T.R.; Nichols, J.; O'Reilly, B.; Oksanen, P.; Packalen, M.; Peteet, D.; Richard, P.J.; Robinson, S.; Ronkainen, T.; Rundgren, M.; Sannel, A.B.K.; Tarnocai, C.; Thom, T.; Tuittila, E.-S.; Turetsky, M.; Väiranta, M.; van der Linden, M.; van Geel, B.; van Bellen, S.; Vitt, D.; Zhao, Y.; Zhou, W. 2014. A database and synthesis of northern peatland soil properties and Holocene carbon and nitrogen accumulation. *Holocene* 24(9): 1028-1042.
- MacDonald, G.M.; Beilman, D.W.; Kremenetski, K.V.; Sheng, Y.; Smith L. C.; Velichko, A.A. 2006. Rapid early development of circumarctic peatlands and atmospheric CH₄ and CO₂ variations. *Science* 314: 285-288.
- McGuire, A.D.; Christensen, T.R.; Hayes, D.; Heroult, A.; Euskirchen, E.; Kimball, J.S.; Koven, C.; Lafleur, P.; Miller, P.A.; Oechel, W.; Peylin, P.; Williams, M.; Ti, Y. 2012. An assessment of the carbon balance of Arctic tundra: comparisons among observations, process models, and atmospheric inversions. *Biogeosciences* 9: 3185-3204.
- McLaughlin, J.; Webster, K. 2013. Effects of climate change on peatlands in the far north of Ontario, Canada: A Synthesis. *Arct. Antarct. Alp. Res.* 46(1): 84-102.
- Moore, T.R.; Roulet, N.T. 1995. Methane emissions from Canadian peatlands. P. 153-164. In R. Lal, J. Kimble, E. Levine, and B.A. Stewart (eds.) *Soils and Global Change*. Lewis Publishers, Boca Raton, FL, USA.
- Moore, T. R.; Bubier, J. L.; Froking, S. E.; Lafleur P. M.; Roulet, N. T. 2002. Plant biomass and production and CO₂ exchange in an ombrotrophic bog. *J. Ecol.* 90(1): 25-36.
- Murphy, M.; Laiho, R.; Moore, T. R. 2009. Effects of water table drawdown on root production and aboveground biomass in a boreal bog. *Ecosystems* 12(8): 1268-1282.
- Ressources naturelles Canada, Secteur des sciences de la Terre, Centre canadien de cartographie et d'observation de la Terre. Geogratings API v1.6.3 Date de modification 2013-10-02, de la <http://geogratings.gc.ca/api/en/nrcan-rncan/ess-sst/9099a060-77ea-57f6-b1b9-50f9eeef435b.html>, [date d'accès au site Web 2015-03-13].

- Riley, J. L. 1994. Peat and peatland resources of northeastern Ontario. Miscellaneous Paper 153. Ontario Geological Survey. Ministère du Développement du Nord et Mines de l'Ontario, (Ontario). 186 pp.
- Riley, J.L. 2011. Wetlands of the Ontario Hudson Bay Lowland: A Regional Overview. Nature Conservancy of Canada. Toronto, Ontario, Canada, 156 pp.
- Riley, J. L.; Michaud, L. 1989. Peat and peatland resources of northwestern Ontario. Miscellaneous Paper 144. Ministère du Développement du Nord et Mines de l'Ontario (Ontario). 175pp.
- Roulet, N.T. 2000. Peatlands, carbon storage, greenhouse gases, and the Kyoto Protocol: Prospects and significance for Canada. *Wetlands* 20: 605-615.
- Shaw, C.; Bona, K.A.; Thompson, D.; Dimitrov, D.; Bhatti, J.; Hilger, A.B.; Webster, K.; Kurz, W.A. 2016. Canadian model for peatlands (CaMP): a model design document. Service canadien des forêts, Centre de foresterie du Nord, Edmonton (Alberta). 62 pp.
- Smith, K.B., undated. A User's Guide to the Enhanced Wetland Classification for the Al-Pac Boreal Conservation Project. Ducks Unlimited, Inc. Western Regional Office, Rancho Cordova, CA.
- Stinson, G.; Kurz, W.A.; Smyth, C.E.; Neilson, E.T.; Dymond, C.C.; Metsaranta, J.M.; Boisvenue, C.; Rampley, G.J.; Li, Q.; White, T.M.; Blain, D. 2011. An inventory-based analysis of Canada's managed forest carbon dynamics, 1990 to 2008. *Global Change Biol.* 17(6): 2227-2244.
- Tarnocai, C. 2006. The effect of climate change on carbon in Canadian peatlands. *Global Planet. Change* 53(4): 222-232.
- Tarnocai, C.; Lacelle, B. 1996. The soil organic carbon digital database of Canada. Agriculture et Agroalimentaire Canada, Direction générale de recherche, (Ottawa) 1996.
- Tarnocai, C.; Kettles, I.M.; Lacelle, B. 2002. Peatlands of Canada Database. La commission géologique du Canada, Open File 4002.
- Tarnocai, C.; Kettles, I.M.; Lacelle, B. 2005. Peatlands of Canada. Agriculture et Agroalimentaire Canada, Direction générale de recherche, (Ottawa) (la base de données numériques).
- Tarnocai, C.; Kettles, I.M.; Lacelle, B. 2011. Peatlands of Canada; La commission géologique du Canada, Open File 6561 (la base de données numériques). CD-ROM.
- Thormann, M. N.; Bayley S. E.; Currah, R. S. 2001. Comparison of decomposition of belowground and aboveground plant litters in peatlands of boreal Alberta, Canada. *Can. J. Bot.* 79(1): 9-22.
- Vitt, D. H.; Halsey, L. A.; Bauer I. E.; Campbell, C. 2000. Spatial and temporal trends in carbon storage of peatlands of continental western Canada through the Holocene. *Can. J. Earth Sci.* 37(5): 683-693.
- Waddington, J.M.; Thompson, D.K.; Wotton, M.; Quinton, W.L.; Flannigan, M.D.; Benscoter, B.W.; Baisley, S.A.; Turetsky, M.R. 2012. Examining the utility of the Canadian Forest Fire Weather Index System in Canadian Boreal Peatlands. *Can. J. For. Res.* 42: 47-58.
- Webster, K.L.; Beall, F.D.; Creed, I.F.; Kreuzweiser, D.P. 2015. Impacts and prognosis of natural resource development on water and wetlands in Canada's boreal zone. *Enviro. Rev.* 23(1): 78-131.
- Zhang, Y.; Chen, W.; Cihlar, J. 2003. A process-based model for quantifying the impact of climate change on permafrost thermal regimes. *J. Geophys. Res. Atmos.* (1984-2012), 108, no. D22.
- Zhang, Yu.; Sachs, T.; Li, C.; Boike, J. 2012 Upscaling methane fluxes from closed chambers to eddy covariance based on a permafrost biogeochemistry integrated model. *Glob. Change Biol.* 18(4): 1428-1440.
- Zoltai, S.C.; Siltanen, R.M.; Johnson, J.D. 2000. Une base de données portant sur les milieux humides des régions arctique, subarctique et boréale de l'ouest du Canada. Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts, Centre de foresterie du Nord, Edmonton (Alberta). Rapport d'information NOR-X-368F. 29 p.