

SYNTHÈSE DE LA VALEUR ET LA RÉPARTITION DU STOCK DE CARBONE TERRESTRE AU QUÉBEC

Rapport final

présenté

au

Ministère du Développement durable, Environnement et Lutte contre les
changements climatiques du Québec

Par

Michelle Garneau, professeure

et

Simon van Bellen, stagiaire postdoctoral

Chaire DÉCLIQUE, Centre GEOTOP et Département de géographie
Université du Québec à Montréal

Avril 2016

UQÀM
Université du Québec à Montréal

geotop



DÉCLIQUE



Sommaire à l'intention des décideurs

L'objectif de ce rapport a été de quantifier, à l'aide de données récemment acquises sur le terrain et de synthèses cartographiques de données existantes, les stocks de carbone contenus dans les écosystèmes terrestres du biome boréal québécois. La consolidation de ces connaissances est nécessaire afin d'évaluer la capacité naturelle des écosystèmes à atténuer les émissions de carbone dans l'atmosphère, et estimer la hausse de leur vulnérabilité face aux changements récents du climat, ainsi qu'aux changements d'utilisation des terres.

Le projet réalisé s'inscrit dans le cadre de la Stratégie d'adaptation aux changements climatiques ainsi que du Plan d'action 2013-2020 sur les changements climatiques visant l'adaptation de la société québécoise au phénomène des changements climatiques et la réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES). Il est également en cohérence avec la mise en œuvre du Plan Nord, un plan d'aménagement pour l'ensemble du territoire nordique caractérisé en grande partie par la forêt boréale. Considérant qu'une grande partie du Nord demeure encore à être développée, les puits de carbone terrestre du biome boréal ont besoin d'être quantifiés plus en détail afin d'en déterminer l'ampleur, d'autant plus que la majorité des données existantes concernent les forêts et non les sols tourbeux.

Trois objectifs spécifiques étaient visés avec ce travail : 1) une revue de littérature accompagnée de la synthèse de données existantes, 2) une quantification des valeurs et une cartographie de leur répartition intégrées dans les unités des provinces écologiques du Cadre Écologique de Référence du Québec (CERQ) du MDDELCC, et 3) une projection de l'impact des changements climatiques et des changements d'utilisation des terres sur la dynamique de ce carbone terrestre en utilisant les projections du modèle régional de climat développées par le Consortium Ouranos. Tous les objectifs ont été rencontrés et des recommandations ont été émises pour combler les lacunes dans les régions identifiées comme étant à risque d'être vulnérabilisées par le changement anticipé.

Suite aux quantifications et aux comparaisons des valeurs obtenues à partir de valeurs publiées antérieurement, il est maintenant possible d'identifier les sources d'incertitude les plus importantes dans les calculs des masses et stocks de carbone pour les sols des tourbières et des forêts du Québec. Les valeurs sont donc présentées avec des niveaux de fiabilité qui vont de très fiables à faibles selon les méthodes utilisées et le type de données disponibles.

À la suite du calcul de la quantification des stocks de carbone des sols des écosystèmes tourbeux et forestiers du Québec, la valeur totale obtenue est de **18,00 gigatonnes (Gt) de carbone** contenues dans les sols des écosystèmes terrestres (tourbières et forêts). Cette valeur correspond à **66,0 Gt équivalent en CO₂** et couvre 95% de l'ensemble des provinces naturelles excluant celles des Basses-terres du Saint-Laurent, des Appalaches et des Adirondacks.

Même si, selon notre classification, les tourbières n'occupent que 108 073 km², comparé à 718 808 km² pour les peuplements forestiers (ou 663 277 km² si on tient compte seulement des peuplements pour lesquels les masses de carbone pouvaient être quantifiées), les tourbières représentent plus que la moitié (10,77 Gt C) du stock de carbone terrestre au Québec.

La valeur moyenne de la **masse de carbone (kg C m⁻²) des tourbières est neuf fois plus élevée que celle dans les forêts**, avec une moyenne de 100,0 kg C m⁻² pour les tourbières et de 10,9 kg C m⁻² pour les peuplements forestiers. Les tourbières, qui sont beaucoup moins affectées par les perturbations (feux, épidémies) que les forêts, transforment, capturent (piègent) et stockent de plus importantes quantités de carbone puisqu'une grande partie est emmagasinée depuis plusieurs milliers d'années dans leurs horizons organiques. Ils méritent donc une considération toute particulière dans les politiques de conservation du gouvernement.

Équivalent d'émissions anthropiques

Pour fins de compréhension, en 2013, l'ensemble des émissions liées aux activités anthropiques au Québec a atteint 82,6 Mt en équivalent de CO₂ (Environnement Canada, 2015), soit 1,25 ‰ de la valeur du stock de carbone contenu dans les écosystèmes terrestres du Québec. La valeur du **stock total de carbone terrestre représente donc un équivalent d'environ 800 années d'émissions anthropiques** au rythme actuel, réparties entre 478 années pour les tourbières et 321 années pour les sols forestiers.

Les politiques d'atténuation du climat ont besoin de s'appuyer sur les données scientifiques acquises sur le carbone des écosystèmes terrestres afin de tenir compte de leur gestion dans les pratiques futures d'aménagement du territoire. **Une augmentation des investissements dans la conservation, la réhabilitation et la gestion des tourbières, des forêts et des milieux humides pourrait contribuer à limiter les émissions de gaz à effet de serre et éviter qu'ils ne s'échappent dans l'atmosphère.** De plus, afin de mieux positionner le Québec sur la scène internationale à l'égard du rôle joué par ces écosystèmes dans la séquestration du carbone et l'atténuation des GES, il apparaît judicieux de continuer à parfaire les connaissances en la matière. Ces connaissances serviront également à mieux orienter les décisions et les politiques gouvernementales en lien avec la gestion du carbone terrestre et l'aménagement du territoire.

Différentes recommandations sont proposées dans le rapport afin d'améliorer l'état de connaissances pour une meilleure gestion des stocks de carbone terrestre tel que recommandé notamment par l'Accord de Paris sur les changements climatiques, où le rôle de première importance des forêts dans l'atténuation des changements climatiques a été officiellement reconnu.

Résumé

Les processus de séquestration de carbone terrestre du nord du Québec proviennent principalement des tourbières et des forêts. Les tourbières sont caractérisées par un sol organique épais et une biomasse vivante relativement limitée, alors que les peuplements forestiers possèdent un sol relativement mince composé d'une strate organique et d'un horizon minéral sur lesquels se trouve une biomasse aérienne généralement bien développée.

Méthodologie

Le stock de carbone organique (C_{stock}) pour chaque type d'écosystème et pour une superficie donnée de l'ensemble du Québec a été calculé à partir d'inventaires de superficie des deux types d'écosystèmes (km^2) et de leurs moyennes de masse de carbone organique (C_{masse}) par unité de surface (kg m^{-2}).

Les superficies et les valeurs de C_{stock} et C_{masse} ont été calculées pour chaque région naturelle du Cadre Écologique de Référence du Québec (CERQ) (niveau 2) et moyennées pour chaque province naturelle (niveau 1 du CERQ). Plusieurs bases de données ont été considérées. Ce sont les quantifications les plus probables qui sont présentées et elles sont exprimées avec un degré de fiabilité qui va de très fiable (estimé à $\pm 10\%$) à peu fiable ($\pm 25\%$ et plus) selon l'incertitude des données. Le rapport présente donc l'ensemble des quantifications selon chaque base de données utilisée ainsi que la répartition des stocks et l'évaluation de leur vulnérabilité en utilisant les projections d'un ensemble de modèles régionaux de climat dont le modèle régional développé par le Consortium Ouranos, et initialement conçu par l'UQAM.

Base de données

Tourbières

Superficie Les données spatiales sur la répartition des tourbières proviennent du quatrième programme (2000-2010) de la carte écoforestière du Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP) où les dépôts organiques sont distingués par le code D_7. Deux versions de cet inventaire écoforestier ont été considérées : 1) la version originale du MFFP et 2) une mise à jour de cette version à partir des districts écologiques (niveau 4) du CERQ. Un troisième inventaire issu d'une synthèse de bases de données développée par Bissonnette et Lavoie (2015) (MDDELCC) a aussi été utilisé. Dans tous les cas, les données sont manquantes pour les provinces naturelles de la Péninsule d'Ungava et du Labrador septentrional.

C_{masse} Les valeurs de C_{masse} ont été quantifiées à partir de l'extrapolation des résultats de 28 carottes de tourbe prélevées dans des écosystèmes tourbeux de différentes régions naturelles du Québec.

Une modélisation des valeurs de C_{masse} a été réalisée en fonction de la latitude des sites et a été appliquée à la fois à l'inventaire du MFFP et à la mise à jour des données à partir des districts écologiques (niveau 4) du CERQ et de la synthèse récente effectuée par Bissonnette et Lavoie (2015) (MDDELCC).

C_{stock} La valeur du C_{stock} est définie comme le produit de la C_{masse} et la superficie de la région écologique.

Peuplements forestiers

Superficie La répartition des peuplements forestiers a été réalisée à partir de la classification de la carte écoforestière du MFFP pour le domaine de la forêt commerciale et complétée par celle de Ressources Naturelles Canada pour les régions au nord de celle-ci.

C_{masse} Les valeurs de C_{masse} ont été modélisées à partir des inventaires du ministère des Ressources Naturelles du Québec (Gagnon et al., 1994) pour les régions de la forêt tempérée nordique et commerciale (méthode de Tremblay et al., 2002). Pour les régions au nord de celles-ci, les données sur les valeurs de C_{masse} sont très limitées. Les valeurs disponibles font partie de l'inventaire de Ressources Naturelles Canada (Siltanen et al., 1997) et ont été moyennées par région naturelle. Tous les inventaires considèrent à la fois le carbone contenu dans la strate organique et celui dans l'horizon minéral.

C_{stock} La valeur du C_{stock} est définie comme le produit de la C_{masse} et la superficie de la région écologique.

Résultats

Tourbières

La superficie totale des tourbières du Québec se situe entre 88 620 et 113 727 km² selon les différentes bases de données, avec une estimation la plus probable de **108 073 km²**.

- La valeur moyenne de la C_{masse} des tourbières du Québec est de **100,0 kg C m⁻²**. La C_{masse} diminue généralement du sud vers le nord. Cette tendance est le résultat d'un potentiel de séquestration limité par une saison de croissance plus courte avec des températures plus basses (Garneau et al, 2014).
- L'estimation la plus probable de la valeur du C_{stock} des tourbières du Québec est de **10,77 Gt C (±2,43)**. Les tourbières des biomes « nordiques », donc ce qui exclut les provinces naturelles A, B et N représentent **10,42 Gt C (±2,07)**. Ce stock de carbone est l'équivalent de **39,5 Gt de CO₂**. Les valeurs de C_{stock} les plus importantes se trouvent dans la province naturelle des Basses-terres de l'Abitibi avec **2,62 Gt C** ou **24,2%** du C_{stock} total du Québec.
- L'estimation de la superficie des tourbières de **108 073 km²** est considéré comme **très fiable** suivant la méthode et les incertitudes associées. Il est toutefois probable que ces valeurs représentent une légère sous-estimation car les deux provinces naturelles les plus septentrionales ne sont pas incluses dans la quantification.

- Tarnocai et al. (2011) avaient estimé la superficie des tourbières du Québec à 115 891 km².
- La valeur moyenne de **100,0 kg C m⁻²** pour la C_{masse} des tourbières du Québec est donc **assez fiable**. La modélisation de la C_{masse} avec latitude pourrait être améliorée par une augmentation du nombre de valeurs sur l'ensemble du territoire, notamment dans le domaine de la forêt mixte ainsi que dans la toundra forestière et arbustive.
 - La valeur de **10,77 Gt C (±2,43)** pour le C_{stock} total des tourbières du Québec est **assez fiable**. La quantification du C_{stock} total pourrait être améliorée par une meilleure connaissance de la distribution des épaisseurs des dépôts tourbeux et des C_{masse} à l'échelle de la province et une bonification de la cartographie des tourbières comprises dans les provinces naturelles de la toundra arbustive et herbacée.
 - Pour le moment, les données publiées par Tarnocai et al (2011) pour les territoires subarctiques et arctiques n'ont pas été intégrées à notre cartographie. L'intégration de ces données, basée sur une méthode différente de celle que nous avons définie dans ce travail, aurait nécessité un redécoupage des polygones et un calcul différent pour ces régions et rallongé le calendrier du contrat. Par contre, sans tenir compte des limites des régions naturelles, nous pouvons suggérer un ajout supplémentaire de **0,88 Gt C** en considérant leurs données pour les tourbières arctiques et subarctiques pergélisolées.

Peuplements forestiers

- Au Québec, le domaine bioclimatique boréal couvre une superficie de ~1 068 400 km², dont ~216 500 km² est occupé par la toundra forestière, alors que l'ensemble de la toundra arbustive et herbacée représente ~236 000 km² du territoire (MFFP, 2015). La superficie occupée par les peuplements forestiers atteint **718 808 km²** (Bissonnette et Lavoie, 2015). Cependant, la quantification des valeurs de C_{masse} et des C_{stock} n'est disponible que pour **663 277 km²**, car il n'y a pas d'inventaire pour les provinces naturelles J, K, L, U et X (sauf la région naturelle X04), ni pour les régions naturelles H07, I03, I05, I07, U2 et U10.
- La valeur moyenne de la C_{masse} des peuplements forestiers du Québec est quantifiée à **10,89 kg C m⁻²**, dont **6,23 kg C** sont répartis parmi les horizons minéraux et **4,67 kg C** parmi la strate organique des sols.
- La valeur du C_{stock} des peuplements forestiers du Québec pour lesquels des données sont disponibles est quantifiée à **7,22 Gt C**, dont **4,13 Gt C (57%)** sont contenus dans les horizons minéraux et **3,10 Gt C (43%)** dans les horizons organiques. Ce C_{stock} serait l'équivalent de **26,5 Gt de CO₂**. Les forêts nordiques, donc excluant les provinces naturelles A, B et N, représentent ~92% de ce total ou **6,66 Gt C**.
- Si on extrapole la valeur moyenne de C_{masse} aux régions sans données, on obtient un total de **7,78 Gt C**, soit l'équivalent de **28,5 Gt de CO₂**. Les forêts nordiques, donc

excluant les provinces naturelles A, B et N, représentent ~93% de ce total ou **7,21 Gt C**.

- L'estimation à **718 808 km²** de la superficie des peuplements forestiers couvrant l'ensemble du Québec est **très fiable**. 92% de cette superficie correspond au Québec nordique.
- La valeur moyenne de **10,89 kg C m⁻²** de la C_{masse} des peuplements forestiers du Québec est **moyennement fiable**. La valeur est **très fiable** pour les domaines de la forêt tempérée nordique (décidue et mixte) et boréale continue, puisque le modèle utilisé a été créé à partir de données dans ces domaines. La valeur est **peu fiable** pour la zone de la forêt boréale ouverte et la toundra forestière, notamment par la rareté des données de carbone pour la forêt boréale ouverte, et l'absence complète d'inventaire pour la toundra forestière.
- La valeur de **7,22 Gt C** du C_{stock} des peuplements forestiers du Québec est **moyennement fiable**. Une amélioration de la quantification nécessiterait la caractérisation des C_{masse} dans les domaines de la forêt boréale ouverte et, surtout, de la toundra forestière.

Le cumul des valeurs des tourbières et des peuplements forestiers

La valeur totale du C_{stock} des sols des écosystèmes terrestres (tourbières et forêts) du Québec est estimée à **18,00 Gt C** ou **66,0 Gt équivalent en CO₂**. **95%** de ces valeurs correspond au territoire nordique du Québec. La valeur moyenne de C_{masse} (kg C m⁻²) des tourbières est neuf fois plus élevée que celle dans les forêts, avec une moyenne de 100,0 kg C m⁻² pour les tourbières et de 10,9 kg C m⁻² pour les peuplements forestiers.

Équivalent d'émissions anthropiques

En 2013, l'ensemble des émissions liées aux activités anthropiques au Québec a atteint 82,6 Mt en équivalent de CO₂ (Environnement Canada, 2015), soit 1,25 ‰ de la valeur du C_{stock} contenue dans les écosystèmes terrestres du Québec. La valeur du C_{stock} total du Québec représente donc un équivalent d'environ 800 années d'émissions anthropiques au rythme actuel, réparties entre 478 années pour les tourbières et 321 années pour les sols forestiers.

Table des matières

Sommaire à l'intention des décideurs	ii
Équivalent d'émissions anthropiques	iii
Résumé	iv
Liste des figures	x
Liste des tableaux	xi
Introduction	1
Cycle du carbone	1
Méthodologie	3
Les tourbières	4
Méthodes 1 et 2	6
Méthodes 3 et 4	9
Méthode 5	11
Les peuplements forestiers	12
Méthode 6	12
Méthode 7	13
Données spatiales.....	13
Résultats	14
Tourbières	14
Provinces naturelles A, B, C et N	14
Provinces naturelles D, E, F, G, P, U et X (à l'exception des régions naturelles E06, E07 et G05).....	14
Provinces naturelles H et I et les régions naturelles E06, E07 et G05.....	15
Province naturelle du Bassin de la Baie d'Ungava (K)	16
Le Québec	16
Peuplements forestiers	17
Provinces naturelles A, B, C et N	17
Provinces naturelles D, E, F, G, P, U et X (à l'exception des régions naturelles E06, E07 et G05).....	17
Provinces naturelles H et I et les régions naturelles E06, E07 et G05.....	18
Le Québec	18

Discussion et vulnérabilité des stocks de carbone au changement climatique.....	19
<i>Tourbières</i>.....	19
<i>Estimations des stocks</i>	19
<i>Les peuplements forestiers</i>.....	20
<i>Estimations des stocks</i>	20
Estimation de l'ensemble des stocks de carbone des tourbières et des peuplements forestiers.....	21
Vulnérabilité des stocks de carbone au changement climatique	21
<i>Changements climatiques : scénarios pour 2041-2070</i>	21
<i>Tourbières</i>	25
<i>Peuplements forestiers</i>	27
<i>Recommandations</i>.....	29
<i>Recommandations pour l'amélioration des connaissances sur les superficies des stocks cartographiés : tourbières</i>	29
<i>Recommandations pour l'amélioration des connaissances sur les superficies des stocks cartographiés : forêts</i>	30
<i>Recommandations de pistes de recherche face à l'impact des changements globaux sur la dynamique du carbone terrestre</i>	30
Conclusion.....	31
Équivalent d'émissions anthropiques.....	32
Remerciements.....	33
Références.....	33
Annexe.....	37

Liste des figures

Figure 1 : Processus et stocks de carbone des tourbières et peuplements forestiers.	2
Figure 2 : Localisation des 28 sites d'échantillonnage (tourbières) retenus dans l'étude.....	5
Figure 3 : Relation entre l'épaisseur du dépôt tourbeux et sa masse de carbone pour 28 carottes de tourbières échantillonnées sur le territoire québécois ($r^2 = 0.84, p < 0.0001$)...	6
Figure 4 : Distribution par histogramme des 683 épaisseurs sondées dépassant 100 cm. Le diagramme en boîte représente la moyenne (losange), la médiane, l'écart interquartile (boîte) et les 2 ^e et 98 ^e percentiles.....	8
Figure 5 : Relation C_{masse} - Latitude appliquée dans la modélisation ($r^2 = 0.38, p = 0.0005, n = 28$).....	10
Figure 6 : a) Ratio épaisseur moyenne/épaisseur maximale des sondages pour 12 tourbières préalablement étudiées; b) distribution des sondages effectués.	11
Figure 7 : Projections du changement de la température entre 1971-1999 et 2041-2070 pour les quatre saisons (DJF : décembre-février; MAM : mars-mai; JJA : juin-août; SON : septembre-novembre). x représente la moyenne des changements des températures ; x représente la moyenne des valeurs absolues de changements.....	23
Figure 8 : Projections du changement du bilan précipitation-évapotranspiration entre 1971-1999 et 2041-2070 pour les quatre saisons (DJF : décembre-février; MAM : mars-mai; JJA : juin-août; SON : septembre-novembre). x représente la moyenne des changements du bilan; x représente la moyenne des valeurs absolues de changements.	24
Figure S1 : Identification des méthodes utilisées pour la quantification des C_{masse} par région naturelle.	37
Figure S2 : C_{stock} des tourbières par région naturelle selon la méthode 4.....	38
Figure S3 : C_{stock} des peuplements forestiers par région naturelle selon les méthodes 6 et 7.	39
Figure S4 : Régions naturelles devant être priorisées dans le cadre de futurs projets de quantification de C_{masse} et sites actuellement disponibles.....	40
Figure S5 : C_{stock} de l'ensemble des tourbières (méthode 4) et des peuplements forestiers par région naturelle.....	41

Liste des tableaux

Tableau 1 : Conversion des épaisseurs de dépôt D_7 de l'inventaire PEU4 en épaisseurs minimales, moyennes et maximales et valeurs de C_{masse} correspondantes (méthode 1).....	8
Tableau 2 : Conversion des épaisseurs de dépôts D_7 et D_0B de l'inventaire du MDDELCC en épaisseurs minimales, moyennes et maximales et valeurs de C_{masse} correspondantes (méthode 2).	9
Tableau 3 : Valeurs des superficies, C_{masse} et C_{stock} dans les différentes publications.....	32
Tableau S1 : Détails sur l'application et les bases de données utilisées dans les méthodes différentes.....	42
Tableau S2 : Superficie, C_{masse} et C_{stock} des tourbières par province naturelle selon la méthode 1.	43
Tableau S3 : Superficie, C_{masse} et C_{stock} des tourbières par province naturelle selon la méthode 2.	44
Tableau S4 : Superficie, C_{masse} et C_{stock} des tourbières par province naturelle selon la méthode 3.	45
Tableau S5 : Superficie, C_{masse} et C_{stock} des tourbières par province naturelle selon la méthode 4.	46
Tableau S6 : Superficie, C_{masse} et C_{stock} des tourbières par province naturelle selon la méthode 5.	47
Tableau S7 : Superficie et C_{stock} pour l'horizon minéral et la strate organique des peuplements forestiers des provinces naturelles selon les méthodes 6 et 7. Les valeurs obtenues avec la méthode 7 sont affichées en rouge.....	48
Tableau S8 : Résumé des superficies, C_{masse} et C_{stock} selon les différentes méthodes, par type d'écosystème et regroupement de province/région naturelle.....	49

Introduction

Le cycle naturel du carbone est le cycle biogéochimique qui fait l'objet de nombreux échanges entre les divers compartiments terrestre, atmosphérique et océanique de la planète. Dans les océans, le carbone se trouve surtout sous forme de carbonate et de biomasse planctonique alors que sur les continents, ce sont principalement les tourbières, les forêts et les prairies qui interviennent dans le stockage du carbone.

Le carbone organique (dioxyde de carbone - CO₂ et méthane - CH₄) fait partie des gaz à effet de serre qui contribuent actuellement au réchauffement de la planète. En 2013, le dernier rapport du Groupe de travail I du GIEC confirmait avec 95% de certitude que les **émissions de gaz à effet de serre provenant de l'activité humaine**, notamment sous forme de CO₂, **constituaient la principale cause du réchauffement climatique (GIEC, 2013)**.

Le cycle naturel du carbone des océans et des milieux terrestres est menacé par les changements climatiques. En vue de la lutte contre les changements climatiques en cours, des mesures d'atténuation des émissions anthropiques sont envisagées à grande échelle. C'est pour une meilleure connaissance et compréhension du cycle naturel du carbone à l'échelle du Québec que nous avons quantifié les stocks de carbone terrestre des sols des écosystèmes tourbeux et forestiers. Le carbone dans les systèmes biologiques terrestres doit en effet être géré de façon à préserver les stocks de carbone existants, réduire les émissions et optimiser le potentiel des zones naturelles à atténuer le relâchement vers l'atmosphère.

Cycle du carbone

Les processus d'échange de carbone entre l'atmosphère, la végétation et les sols se font via la photosynthèse ainsi que la respiration (autotrophe et hétérotrophe). La photosynthèse est le processus qui permet à la végétation d'absorber le CO₂ de l'atmosphère. La respiration autotrophe de la végétation correspond à l'ensemble des processus qui provoquent une libération de CO₂ dans l'atmosphère. La respiration hétérotrophe est causée par l'activité microbienne qui transforme et relâche aussi le CO₂ dans l'atmosphère. C'est le résultat entre l'absorption de CO₂ par la photosynthèse et les diverses formes de respiration (décomposition) qui détermine si un écosystème constitue un puits ou une source de carbone. Alors que les processus sont essentiellement les mêmes pour les écosystèmes tourbeux et forestiers, les taux d'absorption et de respiration varient entre ceux-ci. Les tourbières sont caractérisées par un sol organique épais (>30 ou 40 cm selon les classifications) et une biomasse vivante relativement basse, alors que les peuplements forestiers possèdent un sol relativement mince composé d'une strate organique et d'un

horizon minéral sur lesquels se trouve une biomasse aérienne généralement bien développée (Figure 1).

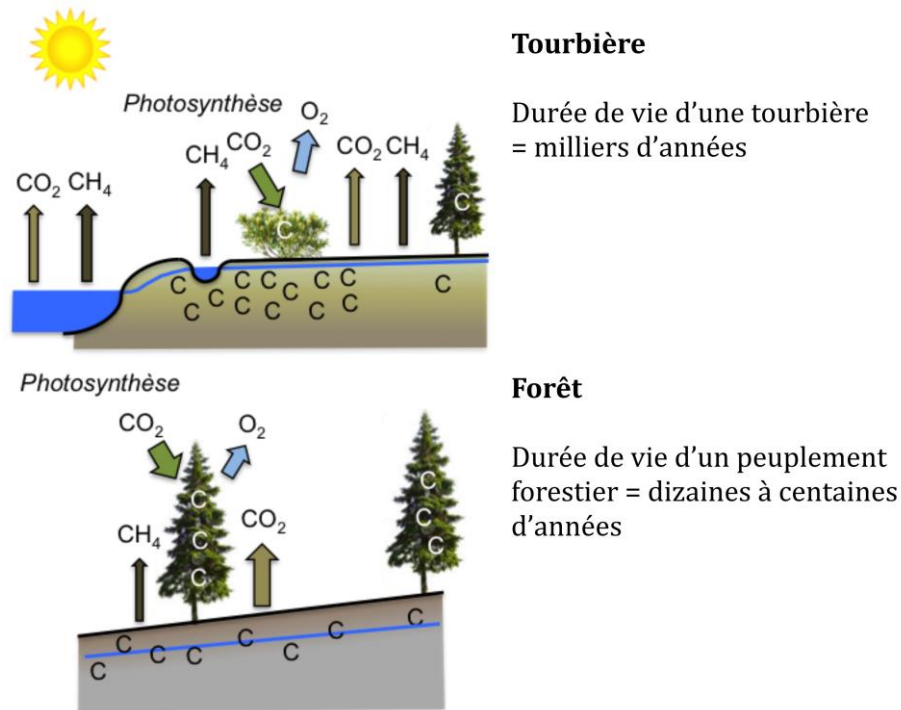


Figure 1 : Processus et stocks de carbone des tourbières et peuplements forestiers.

Le processus de séquestration du carbone dans les tourbières et les forêts est influencé par les conditions climatiques et plus spécifiquement par le bilan hydrique (évapotranspiration – précipitation) au cours de la saison de croissance. Les taux de productivité et de décomposition sont plus faibles dans les tourbières que dans les forêts à cause de la présence d'une nappe phréatique élevée qui favorise la fonction de séquestration. Les tourbières sont donc caractérisées par une production de la matière organique qui dépasse la décomposition formant ainsi d'importants réservoirs de carbone. De plus, les tourbières sont moins affectées que les forêts par les perturbations naturelles comme les feux ou les épidémies d'insectes, ce qui accroît leur potentiel de séquestration du carbone et d'atténuation du changement climatique.

Les peuplements forestiers qui dominent sur les territoires bien drainés sont considérés comme un puits de carbone lorsque, pour une période donnée, la quantité de CO₂ absorbée par la photosynthèse est supérieure à la quantité libérée par la respiration. Ils sont considérés comme une source de carbone lorsque les processus sont inversés. Ces processus (absorption et respiration) fluctuent selon les stades de développement de la forêt.

Au Québec, les peuplements forestiers de la région boréale ont un cycle de vie influencé par la fréquence des incendies (Bergeron et al., 2001) et des épidémies de la tordeuse des bourgeons de l'épinette (Boulanger et Arseneault, 2004). La dynamique et les variations spatiotemporelles de ces perturbations, en plus des activités anthropiques comme la coupe forestière, favorisent des conditions très variables en termes de dynamique de végétation. Cette dynamique complexe engendre donc un défi pour la quantification des stocks de carbone.

L'objectif du projet qui a été réalisé visait la quantification et la cartographie des stocks de carbone terrestre pour le territoire nordique du Québec et excluait la biomasse aérienne. Les résultats comprennent les valeurs totales des stocks pour les écosystèmes tourbeux et forestiers ainsi que leur distribution spatiale à l'échelle des régions naturelles (niveau 2) du Cadre Écologique de Référence du Québec (CERQ) du MDDELCC. À l'aide de projections climatiques pour la période 2041-2070 produits par le Consortium Ouranos, nous avons aussi tenté d'estimer la vulnérabilité de ces stocks de carbone terrestre au cours du 21^e siècle. Finalement, nous avons identifié des pistes d'action en lien avec l'atténuation naturelle du carbone atmosphérique pour la lutte aux changements climatiques.

Méthodologie

Les valeurs présentées dans ce rapport proviennent de plusieurs sources puisqu'aucune source de données unique ou uniformisée n'est encore disponible. Afin d'obtenir le portrait le plus précis possible à l'échelle du Québec, nous avons utilisé les données du CERQ validées par des inventaires dans certains secteurs, celles du MFFP (carte écoforestière, quatrième programme - 2010-2014, et mise à jour de 2015 ; PEU4), ainsi que les données acquises par le groupe de recherche de Michelle Garneau (Chaire DÉCLIQUE ; GEOTOP-UQAM). Nous avons aussi utilisé certaines données publiées du ministère des Ressources Naturelles du Québec (Tremblay et al., 2002; Gagnon et al., 1994) et du Canada (RNCAN) (Siltanen et al., 1997). Ces différentes sources de documentation sont complémentaires et elles nous ont permis de produire un document original caractérisé par une base de données actualisée sur la valeur des stocks de carbone à l'échelle du Québec.

Les stocks de carbone ont été quantifiés à partir de deux types de données, soient la masse de carbone (C_{masse}) par unité de surface (S) (kg m^{-2}), généralement mesurée après des inventaires sur le terrain, et la superficie (m^2). Le stock de carbone (C_{stock}) par unité analysée est alors défini comme :

$$C_{\text{stock}} = C_{\text{masse}} * S$$

La somme des unités de surface constitue donc le stock total de carbone pour le territoire à l'étude. Il a ensuite été intégré dans les limites des régions naturelles (niveau 2) du CERQ et cumulé pour chaque province naturelle (niveau 1). La dynamique de séquestration du carbone par les tourbières et les peuplements forestiers est différente, donc les méthodes de quantification des stocks et de leur variabilité spatiale sont différentes également (Tableau S1).

Dans le texte, les valeurs du C_{stock} des régions et provinces naturelles sont exprimées en gigatonnes (Gt) (1 Gt = 1000 Mt = 1000 000 000 000 kg). Cependant, afin de réduire le nombre de décimales et ainsi d'optimiser la lisibilité des cartes (Figures S2, S3 et S5), les valeurs présentées dans les régions naturelles ont été exprimées en mégatonnes (Mt).

Les tourbières

La quantification des C_{stock} des tourbières est basée sur les estimations de C_{masse} moyenne (en kg C m⁻²) et la superficie qu'occupent les tourbières au Québec. Les estimations des C_{masse} ont initialement été basées sur les résultats de 28 tourbières réparties parmi différentes régions naturelles du Québec, échantillonnées sur le terrain et analysées en laboratoire (Figure 2) (Lamarre et al., 2012; Garneau et al., 2014; van Bellen et al., 2011; Magnan et Garneau, 2014; Gorham et al., 2003; Turunen et al., 2004). Le protocole d'échantillonnage consiste à prélever une carotte dans les parties les plus profondes des tourbières puis, pour chaque carotte récoltée, quantifier le carbone accumulé par des mesures en laboratoire de la densité sèche de la tourbe et d'analyses de perte-au-feu (Dean, 1974). Ces analyses permettent de 1) quantifier le volume de matière organique contenue dans les sédiments et 2) estimer la quantité de carbone associée en assumant que 50% de la masse de matière organique correspond au carbone organique (Gorham, 1991).

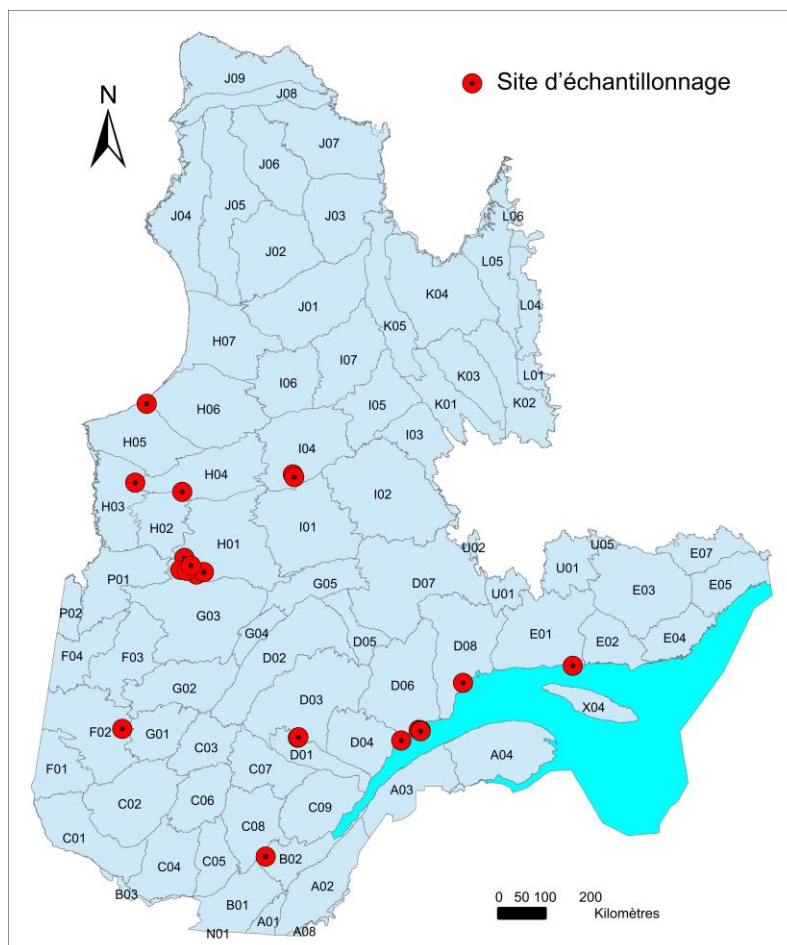


Figure 2 : Localisation des 28 sites d'échantillonnage (tourbières) retenus dans l'étude.

Alors que les valeurs de C_{masse} ont été basées sur les résultats des analyses des carottes de tourbe, cinq méthodes différentes ont été appliquées afin d'associer les C_{masse} aux données spatiales et ainsi obtenir les C_{stock} des dépôts tourbeux dans l'ensemble du Québec. Pour quantifier la distribution spatiale du C_{stock} , trois bases de données d'inventaire ont été utilisées. La première base de données générée provient des méthodes 1 et 2, la deuxième des méthodes 3 et 4, et la troisième de la méthode 5. Les détails de ces méthodes auxquelles sont associées les bases de données spatiales d'inventaire sont présentées dans le texte qui suit. La comparaison des bases de données et des résultats de quantification permet de reconnaître les points forts et les limites de chaque méthode. Les bases de données disponibles n'incluaient pas d'estimations d'incertitudes dans tous les cas, et lorsqu'elles ont été combinées pour le calcul des C_{masse} et C_{stock} , les estimations d'incertitude n'étaient donc pas quantifiables. Pour cette raison, les estimations basées sur les données originales sans incertitude sont évaluées par un système semi-quantitatif tel qu'appliqué également dans le résumé (mentions de très fiable à peu fiable). Dans ce système, les estimations sont exprimées avec un degré de fiabilité qui va de très fiable (estimé à $\pm 10\%$) à peu fiable

(±25% ou plus) selon l'incertitude des données. La priorisation du choix de certaines méthodes est présentée dans la discussion des résultats.

Méthodes 1 et 2

Les valeurs obtenues de C_{masse} ont été associées aux longueurs totales des carottes de tourbe (épaisseur du dépôt de tourbe) et elles ont fait l'objet d'une analyse statistique de régression simple (Figure 3). La relation linéaire obtenue ($r^2 = 0.84$, $p < 0.0001$) a été utilisée pour calculer les C_{masse} en fonction de l'épaisseur E (cm) du dépôt de tourbe :

$$C_{\text{masse}} = 9,3744697 + 0,4141187 * E$$

La relation linéaire obtenue a ensuite été appliquée à la quantification spatiale.

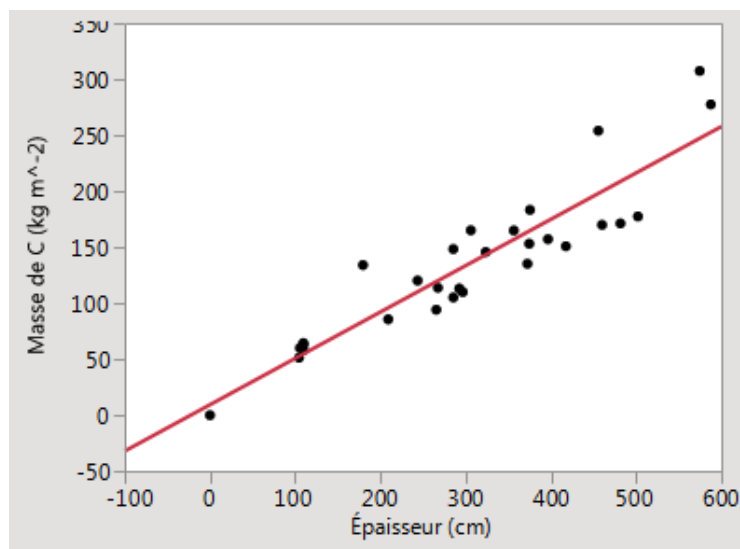


Figure 3 : Relation entre l'épaisseur du dépôt tourbeux et sa masse de carbone pour 28 carottes de tourbières échantillonnées sur le territoire québécois ($r^2 = 0.84$, $p < 0.0001$).

Les méthodes 1 et 2 sont basées sur la même relation « épaisseur du dépôt - C_{masse} ». La différence entre celles-ci se situe dans l'applicabilité de la relation en fonction de la disponibilité des données spatiales. Les données sur la répartition et la superficie des écosystèmes tourbeux ainsi que les épaisseurs des sédiments proviennent des résultats de l'inventaire écoforestier du MFFP (PEU4). Alors que la méthode 1 utilise les données originales de l'inventaire écoforestier, la méthode 2 est basée sur la mise à jour de cette version à partir des districts écologiques (niveau 4) du CERQ (Tableau S1).

La méthode 1 est basée sur l'inventaire PEU4 du MFFP, disponible pour la partie méridionale du territoire québécois, située au sud du 51^e parallèle. Cette cartographie divise la répartition des dépôts organiques D_7 en deux classes d'épaisseur : <1 m (D_7T) et >1 m (D_7E) (Tableau 1) (MRN, 2008). Nous avons estimé la C_{masse} (kg C m^{-2}) moyenne pour chaque classe en utilisant la relation épaisseur du dépôt - C_{masse} . Pour la classe D_7T de <1 m, nous avons retenu une valeur moyenne de 0,60 m (Tableau 1). Pour la classe de >1 m, l'estimation est plus critique, puisqu'elle n'implique pas de valeur maximale d'épaisseur de tourbe. Afin de justifier la quantification d'une valeur moyenne, nous avons choisi de regrouper les résultats de 783 sondages manuels effectués dans 12 différentes tourbières préalablement étudiées avec l'objectif d'estimer la géométrie du bassin tourbeux (van Bellen et al., 2011; Laterreur, 2009; Magnan et Garneau, 2014; Thibault, 2015). La moyenne des épaisseurs sondées est de 2,55 m. Cependant, sur ces 783 sondages, 100 sondages ne dépassaient pas 1,0 m d'épaisseur et ont donc été éliminés. La valeur moyenne des épaisseurs sondées dépassant 1,0 m est de 2,82 m (Figure 4), et correspond à la valeur que nous avons retenu pour quantifier les C_{masse} pour les unités qualifiées >1 m (Tableau 1). Les limites minimales et maximales de 1,56 m et 4,08 m ont été retenues à partir de la taille de l'écart-type de la moyenne. Un inventaire détaillé des épaisseurs des dépôts tourbeux au nord de la limite de l'inventaire PEU4, donc au nord du 51^e parallèle, pourra être disponible au cours de 2016 avec le développement du programme d'inventaire écoforestier nordique (PIEN) du MFFP et il permettra de préciser les valeurs sur ce territoire.

Tableau 1 : Conversion des épaisseurs de dépôt D_7 de l'inventaire PEU4 en épaisseurs minimales, moyennes et maximales et valeurs de C_{masse} correspondantes (méthode 1).

Code	Épaisseur classifiée (m)	Épaisseur appliquée minimale (m)	Épaisseur appliquée moyenne (m)	Épaisseur appliquée maximale (m)	C_{masse} minimale (kg C m^{-2})	C_{masse} moyenne (kg C m^{-2})	C_{masse} maximale (kg C m^{-2})
D_7E	>1	1,56	2,82	4,08	74,0	126,2	178,3
D_7T	<1	0,40	0,60	0,80	25,9	34,2	42,5

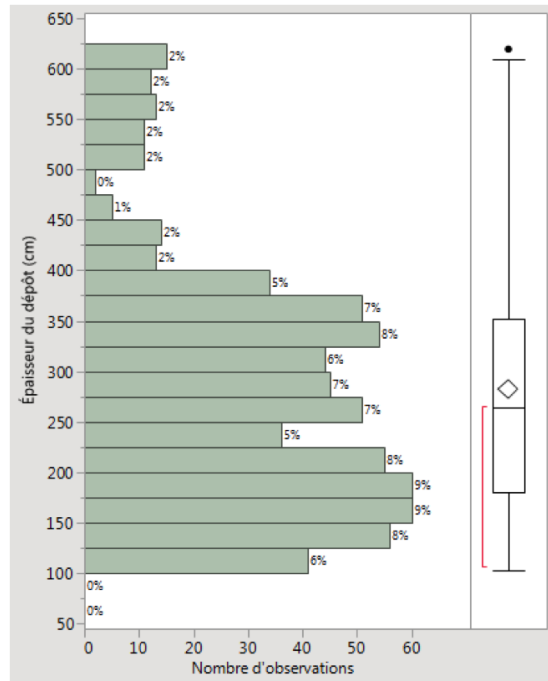


Figure 4 : Distribution par histogramme des 683 épaisseurs sondées dépassant 100 cm. Le diagramme en boîte représente la moyenne (losange), la médiane, l'écart interquartile (boîte) et les 2^e et 98^e percentiles.

Les données spatiales utilisées dans la méthode 2 proviennent de l'inventaire écoforestier du MFFP dont la mise à jour à partir des districts écologiques (niveau 4) du CERQ a été réalisée avec l'interprétation de photos aériennes et d'images satellitaires corrélées aux données d'inventaire de terrain et de données cartographiques disponibles.

Ces données couvrent à peu près tout le territoire du Québec, à l'exception des provinces naturelles de la Péninsule d'Ungava (J) et du Labrador septentrional (L). Dans cette méthode, les tourbières sont définies par les dépôts D_7 ainsi que D_0B. Contrairement à l'approche de la méthode 1, les dépôts D_7 ne sont pas sous-divisés en <1 m et >1 m. Dans la méthode 2, les dépôts D_0B correspondent au « Placage de tourbe sur roc » avec une épaisseur de matière organique variant entre 0 et 0,30 m. Suivant le raisonnement pour les dépôts de <1 m d'épaisseur (D_7T) de la méthode 1, nous avons estimé que l'épaisseur moyenne de ces dépôts serait de l'ordre de 0,25 m et donc, ne feraient pas partie des tourbières quoique leurs valeurs de carbone ont été intégrées dans les calculs (Tableau 2).

Tableau 2 : Conversion des épaisseurs de dépôts D_7 et D_0B de l'inventaire du MDELCC en épaisseurs minimales, moyennes et maximales et valeurs de C_{masse} correspondantes (méthode 2).

Code	Épaisseur classifiée	Épaisseur appliquée minimale	Épaisseur appliquée moyenne	Épaisseur appliquée maximale	C_{masse} minimale	C_{masse} moyenne	C_{masse} maximale
	(m)	(m)	(m)	(m)	(kg C m ⁻²)	(kg C m ⁻²)	(kg C m ⁻²)
D_7	>1	1,56	2,82	4,08	74,0	126,2	178,3
D_0B	0-0,3	0,20	0,25	0,30	17,7	20,0	21,8

Méthodes 3 et 4

Les méthodes 3 et 4 constituent une approche différente pour la quantification de la C_{masse} (kg C m⁻²). En effet, une approche de modélisation par régression multiple a été effectuée avec les 28 carottes de tourbe en utilisant d'abord les variables indépendantes : latitude, longitude, température annuelle moyenne, nombre de degré-jours de croissance >0 °C (ndj0), précipitation annuelle moyenne et âge maximal du dépôt. Le meilleur modèle obtenu ($r^2 = 0.38$, $p = 0.0005$, $n = 28$) correspond à la relation linéaire avec la latitude comme seule variable indépendante (Figure 5) :

$$C_{\text{masse}} = 978,52927 - 16,250556 * \text{Latitude}$$

L'inclusion des variables longitude et ndj0 aurait pu produire un modèle légèrement plus performant, cependant ces dernières ont montré une importante multicolinéarité. De plus, étant donné le nombre relativement restreint d'échantillons ($n = 28$), l'utilisation d'une simple variable indépendante nous a semblé plus adéquate (Figure 5). Les variables C_{masse} et Latitude sont représentées par une distribution normale (Test de Shapiro-Wilk, Prob < W = 0.20 et 0.07, respectivement). La diminution du potentiel de séquestration du carbone avec la latitude est conforme aux conclusions de Charman et al. (2013) et Garneau et al. (2014), qui ont démontré que la capacité des tourbières nordiques à emmagasiner du carbone est positivement influencée par la longueur et la température de la saison de croissance.

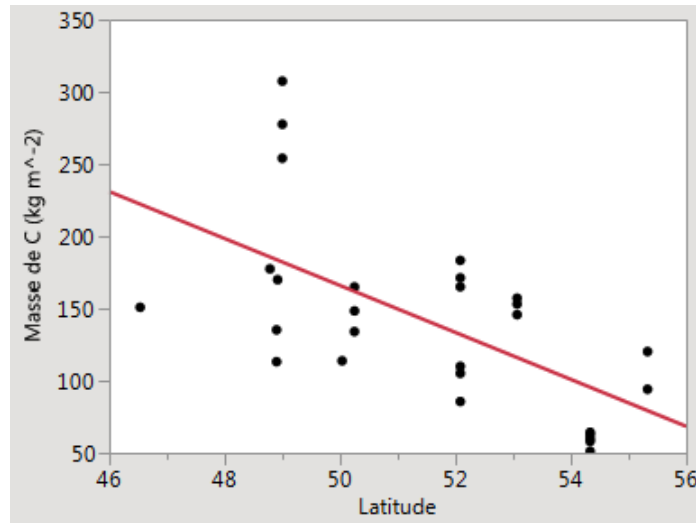


Figure 5 : Relation C_{masse} - Latitude appliquée dans la modélisation ($r^2 = 0.38$, $p = 0.0005$, $n = 28$).

Avec cette relation, les C_{masse} peuvent ainsi être estimées en fonction de la latitude d'un site et sur l'ensemble d'un territoire. Par contre, puisque la relation est basée sur les carottes échantillonnées au centre des tourbières, et étant donné que ces carottes centrales ont tendance à surestimer la quantité de carbone dans les écosystèmes (van Bellen et al., 2011), une correction pour ce biais a été nécessaire. Basé sur la distribution des valeurs d'épaisseur obtenue par les 783 sondages manuels mentionnés précédemment, nous avons déterminé une valeur moyenne d'épaisseur de tourbe à partir de sa valeur maximale. Le ratio épaisseur moyenne/épaisseur maximale a été calculé par tourbière. L'écart pour l'ensemble des 12 tourbières variait de 0,48 (tourbière LLC, région d'Eastmain-1) à 0,90 (tourbière Lebel, Baie-Comeau) (Figure 6). Les ratios élevés correspondent aux sites où la topographie sous-jacente à la tourbière est plutôt plane, résultant en une distribution d'épaisseur de dépôts de tourbe relativement uniforme, comme par exemple sur le delta de la rivière Manicouagan (tourbière Lebel ; Figure 6).

La moyenne de l'ensemble des ratios calculés est de 0,65 avec un intervalle de confiance (95%) de 0,56 à 0,74. Nous avons retenu ces valeurs afin d'optimiser la formule des variations de la C_{masse} en fonction de la latitude.

Pour la moyenne :

$$C_{\text{masse}} = 636,0440255 - 10,5628614 * \text{Lat}$$

Pour l'estimation minimale :

$$C_{\text{masse-min}} = 547,9763912 - 9,10031136 * \text{Lat}$$

Pour l'estimation maximale :

$$C_{\text{masse-max}} = 724,1116598 - 12,02541144 * \text{Lat}$$

Les C_{masse} ont été calculées pour chacune des régions naturelles (niveau 2) du CERQ pour lesquelles des données de superficie étaient disponibles. Les C_{stock} ont été quantifiés en multipliant les valeurs de C_{masse} par la superficie occupée par les tourbières dans la région naturelle. Pour la méthode 3, la base de données de la superficie des tourbières correspond à la distribution des dépôts D_7 de l'inventaire du MFFP, alors identique à celle utilisée dans la méthode 1. La méthode 4 est basée sur l'adaptation des valeurs de l'inventaire écoforestier du MFFP par le MDDELCC, tout comme dans la méthode 2 (Tableau S1).

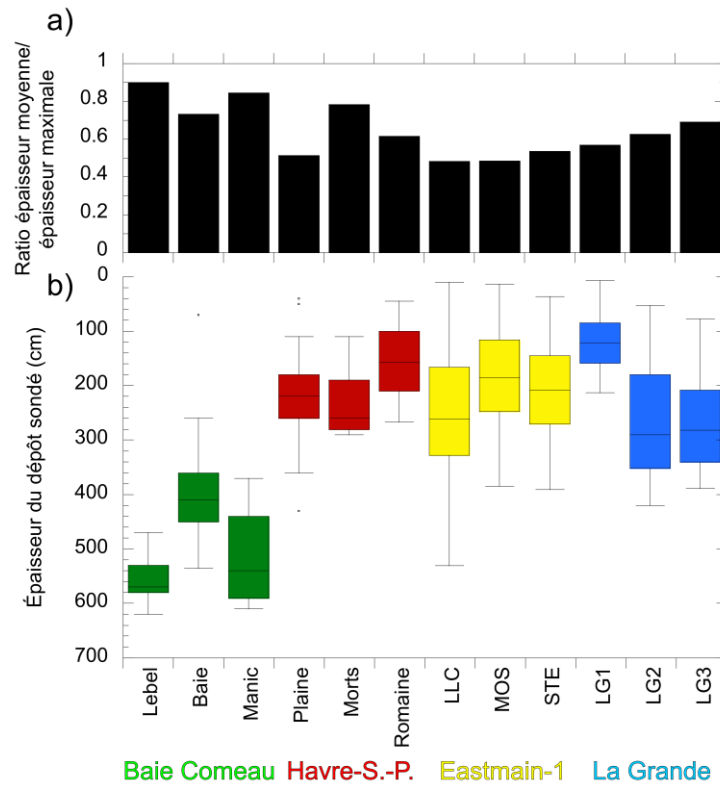


Figure 6: a) Ratio épaisseur moyenne/épaisseur maximale des sondages pour 12 tourbières préalablement étudiées; b) distribution des sondages effectués.

Méthode 5

Comme les méthodes 3 et 4, la méthode 5 est basée sur la relation « C_{masse} – Latitude ». Par contre, la superficie des tourbières par région naturelle a été quantifiée à partir d'informations synthétisées dans le document de Bissonnette et Lavoie (2015) du MDDELCC. Ce document a été réalisé à partir d'un ensemble de données géographiques

disponibles selon différentes ententes, notamment celle établie dans le cadre de l'entente ACRIGéo. Les données au nord du 50^e parallèle incluent aussi la base de données topographiques à l'échelle 1 : 50 000 du gouvernement fédéral (CANVEC; RNCan).

Les peuplements forestiers

La C_{masse} (kg C m^{-2}) des peuplements forestiers est très variable spatialement à cause de leur dynamique naturelle (âge et perturbations) et des pressions anthropiques auxquels ils sont soumis. Le carbone organique est présent à la fois dans la biomasse aérienne ainsi que dans les horizons organiques et minéraux des sols. La biomasse aérienne vivante n'a pas été considérée dans notre travail à la demande du ministère. Étant donné la grande variabilité spatiale des peuplements, la modélisation de la C_{masse} en fonction de la latitude comme simple variable indépendante n'a pas été considérée. La quantification des C_{masse} a plutôt été basée sur les données des inventaires des ministères des Ressources Naturelles du Québec (Gagnon et al., 1994) et RNCan (Siltanen et al., 1997). Les méthodes pour quantifier les C_{stock} et C_{masse} des sols des peuplements forestiers ont varié selon la disponibilité des données de ces inventaires. Pour la partie du Québec couverte par l'inventaire PEU4, au sud du 51^e parallèle, ou l'ensemble des provinces naturelles A, B, C, D, E (moins E06 et E07), F, G (moins G05), N, P, U et X, une modélisation a été effectuée selon Tremblay et al. (2002) (méthode 6). Pour les provinces et régions naturelles au nord de ce territoire et jusqu'à la limite des arbres, les valeurs ont été calculées en moyennant des valeurs obtenues lors de mesures sur le terrain (méthode 7 ; Siltanen et al., 1997) (Figure S1).

Méthode 6

Les C_{masse} ont été quantifiées pour les régions naturelles couvertes par l'inventaire PEU4, ou l'ensemble des provinces naturelles A, B, C, D, E (moins E06 et E07), F, G (moins G05), N, P, U et X à partir des résultats de la modélisation de Tremblay et al. (2002). Ces auteurs ont développé deux modèles pour la quantification du carbone dans les sols forestiers dont un pour la strate organique et un second pour l'horizon minéral. Le modèle de quantification pour la strate organique est composé de trois variables indépendantes : épaisseur de la strate organique, latitude et longitude. Le modèle de quantification pour l'horizon minéral est défini par la couleur du sol, l'épaisseur de l'horizon minéral jusqu'à l'horizon C, et le pH. Il est important de souligner que le modèle de C_{masse} pour la strate organique aurait théoriquement pu être applicable jusqu'à la toundra forestière, mais il ne l'a pas été faute de disponibilité de mesures sur le terrain. Le modèle pour l'horizon minéral est applicable aux sols de la forêt tempérée nordique jusqu'à la limite nord de la forêt boréale continue (Tremblay et al., 2002).

Les deux modèles ont ensuite été appliqués aux 5547 pédoncs de la base de données du MRNQ (Gagnon et al. 1994). Une interpolation spatiale a été réalisée par krigeage. Les valeurs de C_{masse} ont été moyennées par provinces (niveau 1) et régions (niveau 2) naturelles du CERQ réparties sur le territoire de la forêt commerciale.

Méthode 7

Faute de données de terrain, la modélisation tirée de Tremblay et al. (2002) n'a pas été possible dans les régions au nord de la région couverte par l'inventaire PEU4 du MFFP et donc une autre méthode a été utilisée pour quantifier les C_{masse} sur ce territoire. Les valeurs utilisées sont tirées de la base de données de Siltanen et al. (1997), constituée de 52 sites incluant à la fois la strate organique et l'horizon minéral des sols situés entre le 51^e et le 55^e parallèle. Les valeurs de C_{masse} disponibles ont été moyennées dans les limites des régions naturelles. Lorsque les données à l'intérieur d'une région naturelle étaient inexistantes, c'était la valeur moyenne de C_{masse} de la province qui a été calculée. C'est le cas des régions naturelles E07, H07, I03, I05, I07 qui n'étaient pas couvertes par la base de données de Siltanen et al. (1997) (Figure S1). Puisque les provinces naturelles J, K et L ne figuraient pas non plus dans la base de données de Siltanen et al. (1997), aucune valeur n'a pu être quantifiée (Figure S1). La base de données spatiales (section « Données spatiales » ci-bas) indique néanmoins la présence de peuplements forestiers dans ces provinces naturelles les plus septentrionales du Québec et donc, nous considérons que nos valeurs de C_{stock} total sont sous-estimées.

Données spatiales

Afin d'obtenir les C_{stock} , les valeurs de C_{masse} ont été multipliées par les superficies des peuplements forestiers par région et province naturelle. À l'instar de la méthode 5 pour les tourbières, la superficie des peuplements a été déterminée en utilisant les bases de données présentées par Bissonnette et Lavoie (2015). Cette base de données constitue la référence la plus à jour pour quantifier la superficie des peuplements forestiers et calculer le C_{stock} de chaque province et région naturelle.

Résultats

Afin d'optimiser les comparaisons entre les différentes méthodes, les résultats des quantifications des C_{masse} et C_{stock} sont regroupés par province naturelle et discutés par zone et sous-zone de végétation (*sensu* MFFP) selon chaque méthode (Tableaux S2 à S8). Le niveau de précision et la qualité des données intègrent les incertitudes associées aux valeurs obtenues.

Tourbières

Provinces naturelles A, B, C et N

Les tourbières des provinces naturelles A, B, C et N correspondant à la zone de la forêt tempérée nordique, couvrent une superficie de 8953 à 11 798 km², selon les différentes bases de données. Pour la quantification des C_{stock} et des C_{masse} , la méthode 1 est relativement fiable dans ces provinces naturelles, car elle distingue deux classes d'épaisseur de tourbe dans les tourbières. La méthode 2 est peu fiable, car elle n'implique qu'une classe d'épaisseur. Les méthodes 3, 4 et 5 sont assez fiables, car elles réfèrent à une modélisation de la C_{masse} avec la latitude basée sur 28 mesures, ce qui atténue la possibilité de créer des valeurs extrêmes.

Les estimations du C_{stock} varient de 1,00 à 1,60 Gt C et celles des C_{masse} moyennes de 84,8 à 136,7 kg C m⁻². En excluant la méthode 2, jugée moins fiable pour ces provinces naturelles, la meilleure estimation est établie en moyennant les valeurs obtenues des méthodes 1, 3, 4 et 5 à **1,30 Gt C ($\pm 0,24$)**, ce qui correspond à une C_{masse} moyenne de **121,9 kg C m⁻² ($\pm 22,6$)** (Tableau S8).

Provinces naturelles D, E, F, G, P, U et X (à l'exception des régions naturelles E06, E07 et G05)

Les provinces naturelles D, E, F, G, P, U et X, excluant les régions naturelles E06, E07 et G05, correspondent à la sous-zone de la forêt boréale continue. Le calcul de la superficie des tourbières est différent selon les méthodes et varie entre 57 822 km² (méthode 5) et 78 634 km² (méthode 3).

Les valeurs moyennes de C_{masse} varient entre 102,9 à 117,9 kg C m⁻² et les C_{stock} entre 6,1 et 8,6 Gt C. En moyennant les valeurs obtenues à partir des méthodes 1, 3, 4 et 5, la meilleure estimation de la C_{masse} moyenne est de **107,7 kg C m⁻² ($\pm 23,4$)** et celle du C_{stock} de **7,47 Gt C ($\pm 1,62$)** (Tableau S8).

Provinces naturelles H et I et les régions naturelles E06, E07 et G05

Les provinces naturelles H et I et les régions naturelles E06, E07 et G05 correspondent aux limites de la taïga (forêt boréale ouverte) et elles sont couvertes par les bases de données du MFFP (dépôts D_7 >1 m ; méthode 3), les deux bases de données du MDDELCC qui considèrent les dépôts D_7 uniquement (méthodes 2 et 4) et celle issue de la synthèse des données de Bissonnette et Lavoie (2015) (méthode 5 ; Tableau S1). Les valeurs de superficie des tourbières sont identiques pour les méthodes 2 et 4 (25 646 km²) puisqu'elles proviennent du même inventaire avec une classe de dépôt unique (D_7, sans différenciation des épaisseurs <1 m et >1 m pour ces provinces naturelles). L'inventaire de la méthode 5 quantifie la superficie des tourbières à 8882 km².

L'estimation de la superficie la plus fiable serait celle obtenue à partir des méthodes 2 et 4 car elles sont basées sur les travaux de l'Inventaire du capital-nature (MDDELCC) (Marie-Josée Côté, Direction de l'Expertise en Biodiversité, communication personnelle). La superficie des tourbières estimée par la méthode 5 à 8882 km² constitue une sous-estimation de la valeur réelle. Cette sous-estimation est possiblement liée au fait que les tourbières forestières sont souvent classifiées de façon erronée comme des forêts, particulièrement dans la province naturelle des Basses-terres de la baie James (P) et au sud-ouest de la province naturelle des Collines de la Grande Rivière (H) (Frédéric Poisson, Direction de l'Expertise en Biodiversité, communication personnelle).

Quant à la quantification de la C_{masse} , la méthode 2 est peu fiable pour ces provinces naturelles, car elle est calculée à partir d'une moyenne globale d'épaisseur du dépôt à 2,82 m pour une valeur de C_{masse} moyenne à 126,2 kg C m⁻² (dépôt D_7 ; Tableau 2), ce qui implique probablement une surestimation des valeurs réelles.

Les C_{masse} estimées varient donc entre 63,4 et 126,2 kg C m⁻² et les C_{stock} entre 0,56 à 3,24 Gt C. Nous avons identifié la méthode 4 comme celle présentant la meilleure estimation. À partir de cette méthode, le calcul du C_{stock} de la taïga (ou forêt boréale ouverte) est de **1,75 Gt C ($\pm 0,24$)** et celui de la C_{masse} moyenne est de **68,3 kg C m⁻² ($\pm 9,46$)** (Tableau S8).

Province naturelle du Bassin de la Baie d'Ungava (K)

La zone de la toundra forestière et arbustive est représentée ici uniquement par la province naturelle du Bassin de la baie d'Ungava (K), puisqu'il n'existe pas de données pour les provinces naturelles du Labrador septentrional et la Péninsule d'Ungava. Les tourbières occupent une superficie estimée entre 3304 et 5951 km² dans cette province naturelle. La valeur de superficie de la base de données du MDDELCC (dépôts D_7 ; méthode 4) serait la plus fiable avec 5951 km², et même si elle représente la valeur de superficie la plus élevée des inventaires disponibles, il s'agirait possiblement d'une sous-estimation (Marie-Josée Côté, Direction de l'Expertise en Biodiversité, communication personnelle). Puisqu'il n'existe aucune mesure d'épaisseur des dépôts de tourbe dans cette province naturelle, la méthode 2 est peu fiable, car elle surestime probablement la C_{masse} , si on la compare avec les valeurs obtenues par modélisation à partir des méthodes 3, 4 et 5.

Les C_{masse} obtenues pour cette province varient selon la méthode de quantification : 126,2 kg C m⁻² ($\pm 52,2$) selon la méthode 2 alors que les valeurs obtenues à partir des trois autres méthodes indiquent une C_{masse} moyenne qui varie entre 38,2 et 46,6 kg C m⁻². Ces trois méthodes quantifient les C_{masse} selon la latitude, ce qui explique la valeur relativement basse pour cette province naturelle qui est la plus septentrionale. En lien avec les différences en C_{masse} , les C_{stock} varient de 0,13 à 0,75 Gt C. Pour les raisons évoquées ci-haut, la méthode 4 fournit la meilleure estimation du C_{stock} : **0,28 Gt C ($\pm 0,04$)**, alors que la C_{masse} est quantifiée à **46,6 kg C m⁻² ($\pm 6,5$)** (Tableau S8).

Le Québec

Selon les quantifications issues des trois inventaires, la superficie des tourbières au Québec varie entre 88 620 et 113 727 km². Tous les inventaires utilisés omettent la présence de tourbières dans les provinces naturelles du Labrador septentrional et de la Péninsule d'Ungava, même si certaines sources que nous n'avons pas intégrées dans notre synthèse (voir Discussion, section Tourbières) en ont mentionné la présence (Tarnocai et al., 2011).

Selon la méthode utilisée, la valeur du C_{stock} des tourbières au Québec varie entre 8,29 à 13,75 Gt C et les C_{masse} de 93,6 à 120,9 kg C m⁻² (Tableau S8). Puisque nous avons également fourni les meilleures estimations de ces variables par province naturelle, il est possible de calculer une estimation la plus probable du C_{stock} en cumulant les meilleures estimations pour chaque groupe de provinces naturelles. Cette valeur de C_{stock} est alors de **10,77 Gt C ($\pm 2,43$)**. L'estimation la plus probable pour la superficie qu'occupent les tourbières pour l'ensemble du Québec atteint 108 073 km². Par contre, si on considère seulement les biomes nordiques et donc ce qui exclut les provinces naturelles A, B et N, la meilleure estimation de la valeur du C_{stock} est de **10,42 Gt C ($\pm 2,07$)**.

À l'échelle de la province, les régions où les valeurs de C_{stock} sont les plus importantes se situent dans l'ouest du Québec, dans les Basses-terres de l'Abitibi (province naturelle F), les Hautes-terres de Mistassini (G) et les Basses-terres de la baie James (P), comptant pour plus que la moitié du stock total de carbone des tourbières du Québec (Tableaux S2 à S6). À elle seule, la province naturelle des Basses-terres de l'Abitibi (province naturelle F) présente des valeurs entre 2,37 (méthode 4) et 2,91 Gt C (méthode 3) pour une estimation la plus probable de **2,62 Gt C** (Figure S2) ce qui représente 24,2% du C_{stock} du Québec (Figure S2). Considérant l'importance des tourbières forestières dans cette région, il est fort possible que ces valeurs soient même sous-estimées.

Peuplements forestiers

Provinces naturelles A, B, C et N

Les peuplements forestiers couvrent 178 052 km² dans les provinces naturelles A, B, C et N. Ces peuplements contiennent un C_{stock} total de **1,88 Gt C**, dont **1,16 Gt C (62%)** dans l'horizon minéral et **0,72 Gt C (38%)** dans la strate organique. La C_{masse} moyenne pour la zone de la forêt tempérée nordique (feuillue et mixte) est **10,55 kg C m⁻²**, dont **6,50 kg C** dans l'horizon minéral et **4,05 kg C** dans la strate organique (Tableaux S7 et S8). Nous évaluons ces valeurs comme étant très fiables ($\pm 10\%$).

Provinces naturelles D, E, F, G, P, U et X (à l'exception des régions naturelles E06, E07 et G05)

Dans les provinces naturelles D, E, F, G, P, U et X (excluant les régions naturelles E06, E07 et G05), qui correspondent à la zone de la forêt boréale continue, 306 440 km² du territoire est couvert par des peuplements forestiers. Le C_{stock} total des sols est **3,68 Gt C**, dont **1,99 Gt C (54%)** dans l'horizon minéral et **1,69 Gt C (46%)** dans la strate organique. La C_{masse} des sols de cette zone est la plus élevée du Québec avec une valeur moyenne de **12,00 kg C m⁻²**, dont **6,48 kg C** dans l'horizon minéral et **5,52 kg C** dans la strate organique (Tableaux S7 et S8). Toutes ces estimations seraient très fiables.

Provinces naturelles H et I et les régions naturelles E06, E07 et G05

La forêt boréale ouverte ou taïga correspond sensiblement au territoire des provinces naturelles H et I en plus des régions naturelles E06, E07 et G05. Les peuplements forestiers occupent 178 785 km² de la superficie du territoire. Cette estimation est très fiable. Le C_{stock} total des sols de cette sous-zone boréale est **1,67 Gt C ($\pm 0,77$)**, dont **0,99 Gt C ($\pm 0,69$) (59%)** est concentré dans l'horizon minéral et **0,68 Gt C ($\pm 0,47$) (41%)** dans la strate organique. Les incertitudes associées à ces valeurs ont pu être quantifiées ici puisqu'il s'agit des moyennes pondérées à partir de la base de données de Siltanen et al. (1997). Comme pour les incertitudes associées aux valeurs calculées pour les tourbières, les incertitudes présentées ici correspondent aux intervalles de confiance de 95%. La valeur de la C_{masse} moyenne est la plus faible des provinces naturelles, quoique les comparaisons avec les provinces naturelles situées plus au sud soient périlleuses à cause des différences entre les méthodologies 6 et 7 soient celle de Tremblay et al. (2002) et celle de Siltanen et al. (1997), respectivement. La C_{masse} moyenne des sols de la taïga totalise **9,34 kg C m⁻² ($\pm 4,31$)** dont **5,51 kg C ($\pm 3,84$)** dans l'horizon minéral et **3,82 kg C ($\pm 2,61$)** dans la strate organique (Tableaux S7 et S8). Les estimations du C_{stock} et de la C_{masse} sont toutefois considérées peu fiables ($\pm 25\%$ ou plus), notamment car la base de donnée de Siltanen et al. (1997) n'inclut que 52 mesures ponctuelles sur le territoire.

Le Québec

La superficie des peuplements forestiers pour lesquels des données de C_{masse} ont été calculées s'élève à 663 277 km². Cependant, le regroupement de données présenté par Bissonnette et Lavoie (2015), qui intègre des données de RNCAN au nord de la forêt commerciale, mentionne une superficie de 718 808 km² colonisée par des peuplements forestiers. Le manque de données de C_{masse} des peuplements des provinces naturelles de la Péninsule d'Ungava (J), du Bassin de la baie d'Ungava (K) et des Monts Torngat (L) crée une sous-estimation du C_{stock} des peuplements forestiers du Québec.

Les sols des provinces naturelles A-I, N, P, U et X totalisent une valeur de C_{stock} de **7,22 Gt C** dont **4,13 Gt C (57%)** sont compris dans les horizons minéraux et **3,10 Gt C (43%)** dans les strates organiques. La valeur de C_{masse} moyenne est quantifiée à **10,89 kg C m⁻²**, dont **6,23 kg C** sont répartis parmi les horizons minéraux et **4,67 kg C** parmi la strate organique (Tableaux S7 et S8). À l'échelle du territoire, le C_{stock} le plus important se trouve dans les provinces naturelles des Laurentides centrales (1,64 Gt C ou 22,7% du C_{stock} total du Québec), des Laurentides méridionales (1,31 Gt C ou 18,2%) et du Plateau de la Basse-Côte-Nord (1,01 Gt C ou 13,9%) (Figure S3). Les valeurs de C_{stock} sont généralement fiables à très fiables pour les provinces naturelles couvertes par la modélisation de Tremblay et al.

(2002), mais peu fiables pour les provinces et régions naturelles tirées de la base de données de Siltanen et al. (1997).

Discussion et vulnérabilité des stocks de carbone au changement climatique

Tourbières

Pour les provinces naturelles A-G, N, P, U, X (sauf les régions naturelles E06, E07 et G05), la couverture spatiale des épaisseurs des dépôts tourbeux est relativement précise à partir des méthodes 1 et 2 car elles ont permis de séparer les superficies occupées par les tourbières (dépôts D_7) et les autres types de dépôts organiques (dépôts D_0B, considérés dans la méthode 2 uniquement).

Faute de données, la quantification des C_{masse} et C_{stock} à partir de la distribution spatiale des épaisseurs des dépôts tourbeux n'a pas été possible dans les provinces naturelles H, I, J, K et L et les régions naturelles E06, E07, G05, correspondant à des territoires de la taïga et de la toundra forestière, arbustive et herbacée. Afin de quantifier les C_{masse} dans ces provinces naturelles, nous avons adopté une stratégie par modélisation, basée sur la latitude des régions naturelles.

Les inventaires disponibles n'indiquent pas de présence de tourbières dans les provinces naturelles de la Péninsule d'Ungava (J) et des Monts Torngat (L), en partie car il n'y a pas d'inventaire complété. La synthèse de Tarnocai et al. (2011) intègre une superficie de 7977 km² de tourbières pergélisolées dans ces provinces naturelles avec un stock de carbone de 0,88 Gt C. Tel que mentionné dans la section « Méthodes », nous n'avons pas, à ce stade-ci, intégré les données de Tarnocai et al. (2011) à notre cartographie car elles auraient nécessité un redécoupage des polygones et un calcul différent des stocks. Par contre, sans tenir compte des limites des régions naturelles, nous pouvons supposer un ajout supplémentaire de près de 1 Gt C en considérant ces données.

Estimations des stocks

Le C_{stock} des tourbières du Québec est estimé ici à **10,77 Gt C ($\pm 2,43$ Gt C)**. Cette valeur est minimale et très conservatrice car elle n'inclut pas les territoires de la partie la plus septentrionale du Québec soient les provinces naturelles de la Péninsule d'Ungava (J) et des

Monts Torngat (L), ni les régions naturelles du Plateau de la rivière Nastapoka (H07) et des Buttons du lac D'Iberville (I06) pour lesquelles les données de couverture spatiale sont inexistantes.

La valeur de 10,77 Gt C ($\pm 2,43$ Gt C) est inférieure à l'estimation de 15,2 Gt C de Tarnocai et al. (2011) pour le Québec. Notre meilleure estimation de la superficie totale des tourbières est basée sur la méthode 4 et totalise une superficie de 108 073 km², alors que Tarnocai et al. (2011) ont estimé une superficie à 115 891 km², ce qui représente une différence de -6,7%.

La valeur moyenne de C_{masse} (kg C m⁻²) de notre synthèse totalise donc 100,0 kg C m⁻² comparativement à 130,8 kg C m⁻² selon Tarnocai et al. (2011), ce qui représente une différence de -23,5%. Ces résultats indiquent donc que la quantification de la C_{masse} génère une incertitude à l'estimation du C_{stock} . La répartition spatiale des tourbières produit relativement peu d'erreur comparée à celle associée à la C_{masse} moyenne. Puisqu'il existe une bonne relation entre l'épaisseur d'un dépôt de tourbe et sa C_{masse} , nous suggérons d'améliorer les connaissances en ce qui a trait à la répartition et la profondeur des dépôts de tourbe sur le territoire nordique.

Les peuplements forestiers

Les données actuellement disponibles sur la répartition spatiale et les C_{masse} des peuplements forestiers sont abondantes pour les provinces naturelles A, B, C, D, E, F, G, N, P, U, X (sauf les régions naturelles E06, E07 et G05). Les valeurs de C_{masse} des peuplements forestiers ont très bien été quantifiées et modélisées par Tremblay et al. (2002).

Par contre, peu de données sont disponibles pour les provinces naturelles H, I, J, K et L et les régions naturelles E06, E07, G05 car l'inventaire des pédons à partir duquel les C_{masse} ont été quantifiées est très limité comparé à celui des régions plus méridionales. Selon les bases de données spatiales, des peuplements forestiers sont présents dans toutes les provinces naturelles du Québec. Cependant, pour les provinces naturelles de la Péninsule d'Ungava (J), du Bassin de la baie d'Ungava (K) et des Monts Torngat (L) aucune donnée n'a été calculée sur la C_{masse} des peuplements par manque de mesures d'inventaire sur le terrain.

Estimations des stocks

La meilleure estimation du C_{stock} des sols des peuplements forestiers du Québec est **7,22 Gt C** dont **4,13 Gt C (57%)** sont compris dans les horizons minéraux et **3,10 Gt C (43%)** dans les horizons organiques. Ces valeurs ne considèrent pas le carbone contenu dans les

peuplements forestiers des provinces naturelles de la Péninsule d'Ungava (J), du Bassin de la baie d'Ungava (K) et des Monts Torngat (L), où se trouveraient 55 531 km² de ces peuplements selon la synthèse de données de Bissonnette et Lavoie (2015). Si on appliquait une C_{masse} moyenne de 10 kg C m⁻² à ces peuplements, on rajouterait alors **0,55 Gt C** au C_{stock} du Québec, pour un total de **7,78 Gt C** pour les sols exclusivement. Selon l'étude de Margolis et al. (2015), l'inclusion de la biomasse aérienne, estimée à 50-100 Mg ha⁻¹ ou 2,5-5,0 kg C m⁻², pourrait rajouter **1,80-3,60 Gt C** au C_{stock} total pour le Québec. Ces valeurs de biomasse aérienne sont du même ordre que la quantification de 2,57 Gt C de Nelson et al. (2009) lors de leur estimation de biomasse aérienne et ressources en carbone du Québec. Les incertitudes sont grandes pour les provinces naturelles H et I et les régions naturelles E06, E07 et G05, parce que les inventaires de C_{masse} sont limités.

Estimation de l'ensemble des stocks de carbone des tourbières et des peuplements forestiers

Selon nos calculs, le stock de carbone pour l'ensemble des tourbières et des sols des peuplements forestiers du Québec totalise **18,00 Gt C**. Cette valeur est nettement inférieure à la valeur présentée par le Boreal Snowbird Initiative (2015) basée sur les estimations de Global Forest Watch Canada et les données de Tarnocai et Lacelle (1996) qui était de 31 Gt C. Cette valeur est basée sur l'inventaire de carbone de 1778 pédons répartis sur l'ensemble du territoire pergélisolé de la planète et de cartes régionales et nationales de différentes sources qui ont été harmonisées et numérisées (Hugelius et al., 2013).

La distribution spatiale de l'ensemble des stocks de carbone sur le territoire québécois présente une concentration de valeurs les plus élevées dans les provinces naturelles des Basses-terres de l'Abitibi et de la baie James (Figure S5) due à l'importante superficie des tourbières sur ce territoire et à leur C_{masse} moyenne qui est environ neuf fois plus élevée que celle des peuplements forestiers.

Vulnérabilité des stocks de carbone au changement climatique

Changements climatiques : scénarios pour 2041-2070

Des projections climatiques ont été produites spécifiquement pour notre projet par le Consortium Ouranos en utilisant des données du projet North American Climate Change Assessment Program (NARCCAP; Mearns et al., 2009). Ce projet international, auquel

Ouranos a participé en produisant des simulations avec le Modèle régional canadien du climat (MRCC4; de Elía et Côté, 2010; Music et Caya, 2007), constitue à ce jour la base de données la plus complète de simulations régionales produites avec des Modèles régionaux de climat (MRC) sur l'Amérique du Nord pour le climat récent et futur.

Les figures 7 et 8 présentent les changements climatiques saisonniers entre les périodes 2041-2070 et 1971-1999 pour la température de surface (à 2 mètres du sol) et pour la disponibilité en eau du sol, représentée par la différence entre la précipitation et l'évapotranspiration. Les moyennes présentées sont calculées à partir de MRC dont la dimension des tuiles est d'environ 50 km par 50 km (2 500 km²), et qui utilisent l'information au pourtour de l'Amérique du Nord provenant de Modèles de climat globaux (MCG) de résolution plus grossière (200 km par 200 km). Les différentes combinaisons MRC-MCG permettent de couvrir l'incertitude des projections en climat futur liées aux imperfections des modèles de climat (les MRC et les MCG). En raison de ressources de calcul limitées, seul un scénario d'émissions de gaz à effet de serre et aérosols (SRES-A2) a été étudié dans un futur où aucun véritable effort n'est fait pour réduire les émissions. En tout, chaque figure de changement climatique présente le résultat moyen de 11 combinaisons MRC-MCG pour la température de surface et de neuf combinaisons MRC-MCG pour la disponibilité en eau des sols.

Changements climatiques 2041-2070 vs 1971-1999
Température a 2m

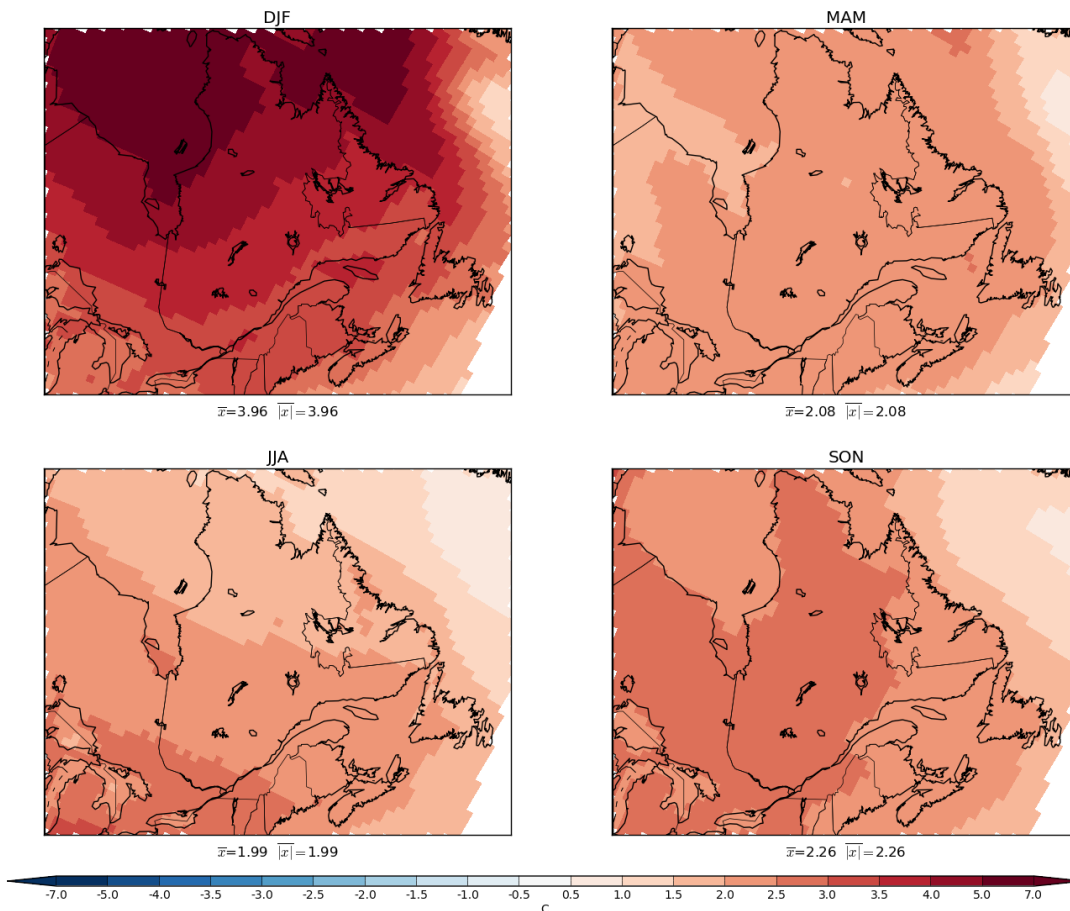


Figure 7 : Projections du changement de la température entre 1971-1999 et 2041-2070 pour les quatre saisons (DJF : décembre-février ; MAM : mars-mai ; JJA : juin-août ; SON : septembre-novembre). \bar{x} représente la moyenne des changements des températures ; $|\bar{x}|$ représente la moyenne des valeurs absolues de changements.

Les résultats des projections montrent sur l'ensemble du Québec, pour la période 2041-2070, une tendance générale au réchauffement de l'ordre de 2 à 4°C par rapport à la période 1971-1999 (Figure 7). En général, le réchauffement serait plus prononcé en hiver soit de l'ordre de 3 à 7°C alors que durant l'été, le réchauffement serait autour de 1,5 à 3°C. Certaines variations régionales ressortent également de ces projections avec un réchauffement plus prononcé pendant l'été dans le sud du Québec et un réchauffement plus prononcé en hiver dans les régions nordiques.

Les projections pour les mêmes périodes en ce qui a trait au bilan de disponibilité en eau du sol, représenté par la différence entre la précipitation et l'évapotranspiration sont spatialement plus complexes. Les résultats suggèrent que des conditions plus sèches

caractériseraient l'été dans la partie sud du Québec jusqu'au 50-51^e parallèle (Figure 8). Plus au nord, le bilan de disponibilité en eau des sols présenterait très peu de changement durant l'été, sauf dans les sous-zones de la toundra forestière et de la toundra arbustive et herbacée où les conditions d'humidité augmenteraient. Les autres saisons seraient aussi caractérisées par des conditions plus humides, notamment durant l'hiver mais de façon relativement uniforme sur le territoire québécois.

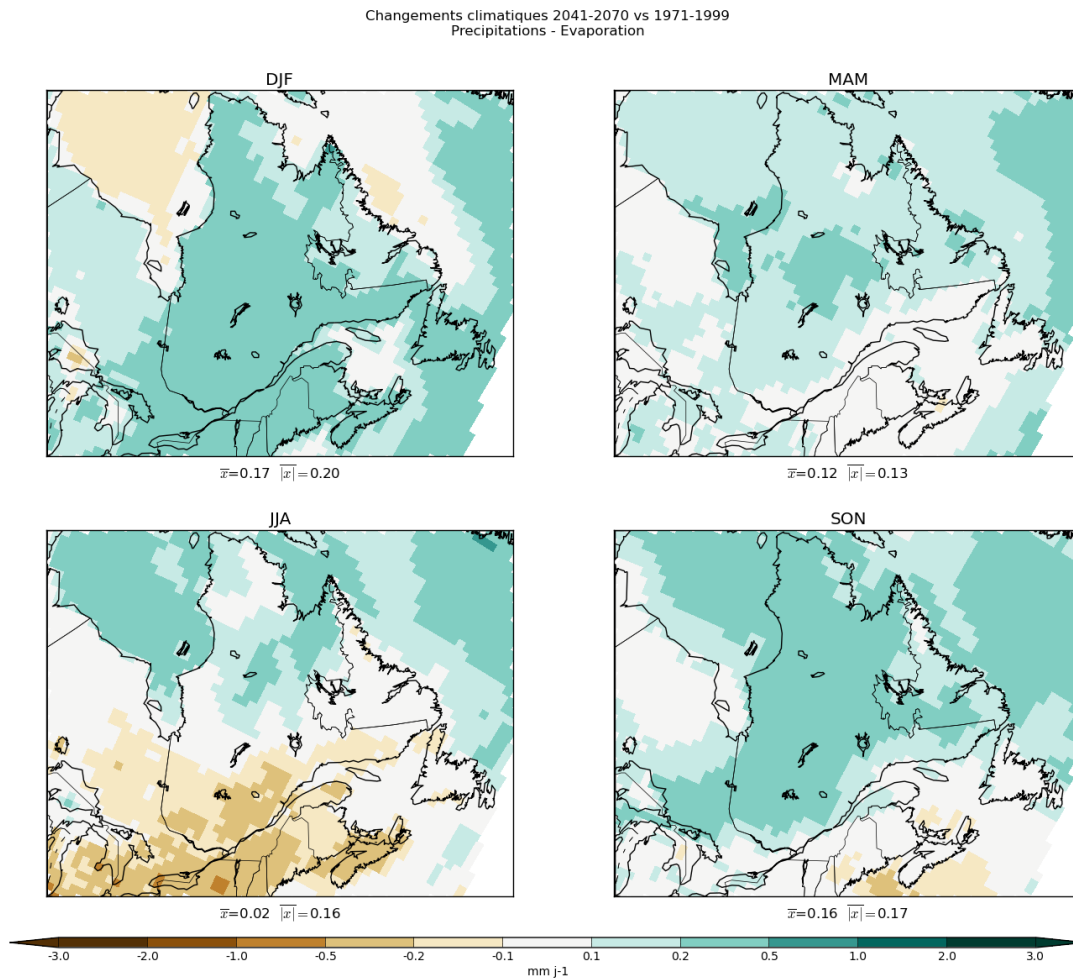


Figure 8 : Projections du changement du bilan précipitation-évapotranspiration entre 1971-1999 et 2041-2070 pour les quatre saisons (DJF : décembre-février ; MAM : mars-mai ; JJA : juin-août ; SON : septembre-novembre). \bar{x} représente la moyenne des changements du bilan; $|\bar{x}|$ représente la moyenne des valeurs absolues de changements.

Tourbières

La vulnérabilité du stock de carbone des tourbières au changement climatique dépend du bilan entre les changements de productivité végétale et de décomposition de la matière organique. L'augmentation de la température moyenne annuelle favoriserait fort probablement une augmentation de la durée et l'intensité de la saison de croissance ce qui influencerait positivement la croissance végétale. Par contre, cette tendance sera renversée dans un contexte où le bilan hydrique (précipitation moins évapotranspiration) serait négatif tel que projeté pour le territoire au sud du 50^e parallèle, impliquant ainsi un abaissement des nappes phréatiques, une décomposition accrue de la matière organique et donc une augmentation des émissions de CO₂ vers l'atmosphère.

Territoire de la zone de la forêt tempérée nordique

Il s'avère fort probable que les tourbières dans le sud du Québec soient plus vulnérables au réchauffement projeté pendant la saison estivale. Un assèchement important du couvert de mousses de sphaignes risquerait de réduire considérablement leur activité photosynthétique et donc leur fonction de séquestration. Des conditions chaudes et sèches risqueraient également de causer une baisse du niveau des nappes phréatiques, ce qui augmenterait la décomposition de la matière organique dans la strate aérée et donc un relâchement de CO₂ dans l'atmosphère. Les tourbières qui sont colonisées par une végétation ligneuse seraient encore plus à risque d'assèchement dû à l'effet additionnel de l'évapotranspiration et du pompage de leur système racinaire sur les nappes d'eau.

Territoire des zones boréales et arctiques

Au nord du 51^e parallèle, le scénario pour la période 2041-2070 en ce qui a trait au bilan du carbone apparaît à la fois favorable et défavorable pour les tourbières. Il apparaît favorable lorsqu'on considère un allongement de la saison de croissance avec une augmentation des conditions d'humidité des sols. L'existence d'une relation positive entre l'accumulation du carbone et la température estivale a déjà été démontrée spatialement au Québec (Garneau et al., 2014) et temporellement à l'échelle du globe en comparant les taux d'accumulation du carbone des tourbières au cours d'une période climatiquement plus favorable entre 950 et 1250 A.D. (Charman et al., 2013). Cette tendance favorable pourrait être encore plus marquée considérant l'augmentation du bilan hydrique. En effet, une augmentation de la séquestration du CO₂ a déjà été mesurée par Pelletier et al. (2011) et Cliche Trudeau et al.

(2014) au cours de quelques saisons de croissance plus chaudes et plus humides dans le nord du Québec.

Les projections pour la période 2041-2070 apparaissent cependant défavorables sur le territoire pergélisolé. Les hivers plus chauds et plus courts ont déjà commencé à engendrer une dégradation du pergélisol dans les tourbières. Cette tendance a été observée depuis quelques décennies dans le Québec nordique (Payette et al., 2004; Lamarre et al., 2012). La fonte du pergélisol entraîne une hausse de la nappe phréatique qui cependant, pourra être suivie à court ou moyen terme d'une reprise de la croissance des sphaignes (Swindles et al., 2015; Lamarre et al., 2012). La disparition des tourbières pergélisolées a donc un effet ambigu sur les émissions atmosphériques et le stock de carbone terrestre. Premièrement, la fonte de la tourbe gelée favorise la formation de mares de thermokarst et une perte de carbone, notamment par des émissions atmosphériques accrues de CO₂ et CH₄ (Roiha et al., 2015). Elle favorise en plus le transfert de carbone organique dissous dans les cours d'eau (Vonk et al., 2015). Par contre, lorsque le rétablissement des sphaignes est initié dans ces milieux, il risque de se produire un retour de l'accumulation et la séquestration du carbone tel qu'observé dans les régions de Kuujuarapik (Lamarre et al., 2012), Blanc-Sablon (Sanderson, 2016) et dans l'ouest du Canada (Turetsky et al., 2007). Le phénomène demeure encore trop peu documenté pour généraliser des conclusions d'autant plus que le délai entre la dégradation du pergélisol et l'accumulation nette du carbone est tributaire de différents paramètres dont les conditions locales des sites et l'intensité des changements climatiques (Swindles et al., 2015).

Dans les tourbières de l'ouest canadien, des pertes de carbone jusqu'à 3,2 kg m⁻² ont été estimées par événement de feu (Turetsky et al., 2002). Les tourbières à sphaignes du Québec sont plus humides, plus ouvertes et moins forestières que dans l'ouest canadien et risquent donc d'être moins vulnérables aux perturbations naturelles telles que les feux. Seules les tourbières forestières concentrées surtout dans l'ouest du Québec, risquent d'être plus affectées par une augmentation du régime des feux. À part les tourbières du sud du Québec qui sont beaucoup plus menacées d'assèchement pendant l'été, les tourbières les plus vulnérables aux perturbations naturelles sont : les tourbières à pergélisol, les tourbières forestières concentrées dans la province naturelle des Basses-terres de l'Abitibi et celle de la Baie de James et celles des régions naturelles du centre-nord du Québec (par exemple D02, D05, G04, G05, I01 et I02) qui présentent des signes de déséquilibre hydrologique (phénomène « aqualyse », *sensu* Payette ; Dissanska et al., 2009). Considérant les scénarios climatiques du bilan hydrique projeté, ces dernières deviendront probablement plus humides avec le temps. De plus, les tourbières en position littorale le long de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent sont présentement affectées par l'érosion côtière et enregistrent d'importantes pertes nettes de carbone avec le recul des côtes.

Les activités associées au développement industriel dans le nord du Québec risquent de drainer et même éliminer des superficies de tourbières par la construction de canaux de drainage, de routes ou de remblaiement pour les activités forestières, minières et hydro-électriques. Si ces changements d'utilisation du sol ne sont pas planifiés judicieusement, il

est probable qu'ils entraineront un relâchement d'émissions de carbone vers l'atmosphère en perturbant ainsi la fonction écosystémique de séquestration du carbone par les tourbières.

Peuplements forestiers

Afin d'estimer la vulnérabilité des stocks de carbone des peuplements forestiers, il est important d'identifier la portion du stock potentiellement mobilisée par un changement du régime microclimatique du sol. Le carbone contenu dans l'horizon minéral possède un temps de résidence de l'ordre du millénaire et il est très difficilement mobilisable (Laganière et al., 2013) alors que le carbone de la strate organique peut être relâché sous forme de CO₂ notamment sous des conditions (micro)climatiques plus sèches et chaudes.

Mis à part les strates dans lesquelles le carbone est présent, la mobilité des stocks de carbone est variable selon le type de peuplement forestier. Au Québec, davantage de carbone est emmagasiné dans les strates organiques des peuplements d'épinette noire (*Picea mariana* (Mill.) BSP), comparés à celles des peuplements de feuillus comme le peuplier faux-tremble (*Populus tremuloides* Michx.) (Laganière et al., 2011). Cette tendance s'explique par le fait que la litière des conifères est généralement plus récalcitrante (Preston et al., 2000), et que les forêts de conifères sont développées sous des microclimats plus frais et humides (Laganière et al., 2012), ce qui ralentit la décomposition de la matière organique. La composition des peuplements joue donc un rôle important dans la sensibilité du carbone des sols au changement climatique. En plus, l'âge des peuplements est généralement positivement corrélé avec le stock de carbone. Une augmentation de la fréquence et de l'intensité des incendies a un effet de rajeunissement des forêts et un maintien de peuplements de début de succession. Puisque le stock de carbone du sol d'un peuplement augmente généralement avec son âge (Lecomte et al., 2006), un paysage dominé par davantage de peuplements jeunes contiendra donc un stock de carbone plus limité.

Les feux de forêt causent une émission directe de carbone vers l'atmosphère. Le territoire le plus affecté par les incendies est celui de la forêt boréale ouverte et la partie nord de la forêt boréale continue, avec un gradient important de diminution de l'ouest vers l'est (Bergeron et al., 2004; Payette et al., 1989). Au Québec, les émissions potentielles de carbone du sol par événement de feu varient entre 0,86 (forêt boréale ouverte et toundra forestière) et 1,20 kg C m⁻² (forêt boréale continue et forêt tempérée nordique), ce qui représente alors environ 10% du stock total de carbone du sol.

Amiro et al. (2009) ont mentionné que les changements climatiques projetés n'affecteront pas considérablement la quantité de carbone du sol émise lors d'événements de feux. La sensibilité des sols à la combustion dépend notamment de la composition du couvert

forestier et de l'épaisseur du dépôt organique (Terrier et al., 2014). Par exemple, dans les basses-terres de l'Abitibi, les horizons organiques de surface dominés par les sphaignes seront beaucoup plus résilients à l'assèchement que les autres types de mousses forestières. Par conséquent, les peuplements dominés par l'épinette noire et les sphaignes seront moins sensibles au brûlage profond de leurs horizons comparativement aux autres peuplements.

Les projections climatiques de 2041-2070 présentent un bilan hydrique négatif pendant l'été sur le territoire en deça du 50^e parallèle. Ce déficit suggère une fréquence plus élevée des incendies de forêts et de plus grandes superficies brûlées sur ce territoire (Girardin et Mudelsee, 2008, Wotton et al., 2010 ; Bergeron et al., 2010) contrairement à d'autres régions du Québec comme la partie occidentale de la forêt boréale ouverte qui connaîtrait relativement peu de changement (Boulanger et al., 2013).

En plus de son effet sur les régimes des incendies, il est probable que le réchauffement climatique du 21^e siècle favorise également une migration des essences feuillues vers le nord (Bertheaux et al., 2010). Puisque les essences feuillues sont moins propices aux incendies, cette tendance pourrait atténuer l'effet des changements climatiques sur ces perturbations dans les territoires aménagés (Hély et al., 2001). En ajout à cette tendance naturelle, un aménagement forestier qui favoriserait l'introduction des essences feuillues dans les régions dominées par les conifères pourrait accentuer l'effet d'atténuation (Terrier et al., 2013). Cependant, il n'est pas certain que ces changements auront des effets positifs sur les stocks de carbone des sols des peuplements aménagés, puisque les forêts de feuillus emmagasinent généralement moins de carbone dans leur humus que les sols des forêts de conifères. Par contre, l'effet d'atténuation des émissions de CO₂ par la biomasse aérienne constitue une fonction qui n'est plus à négliger.

Les épidémies d'insectes entraînent une mortalité accrue des arbres et un effet de rajeunissement des peuplements. Kurz et al. (2008) ont mentionné une inversion de la tendance de puits de carbone vers une source dans certaines parties de la forêt boréale canadienne affectées par les épidémies. Contrairement aux incendies de forêt, l'effet des épidémies d'insectes sur les stocks de carbone est cependant retardé. La destruction de la biomasse vivante génère un stock de matière organique morte qui se décompose sur une plus longue période de temps. Pour les futures épidémies de la tordeuse des bourgeons de l'épinette, des travaux récents ont suggéré un changement d'hôte depuis le sapin vers l'épinette (Pureswaran et al., 2015) alors que d'autres ont émis l'hypothèse que les épidémies pourraient être moins fréquentes sous l'effet du réchauffement climatique (Zhang et al., 2014), parce que l'augmentation de la température, notamment à l'automne, nuirait au développement des larves. La présence de la tordeuse des bourgeons de l'épinette à la limite méridionale de sa distribution actuelle pourrait donc diminuer avec le réchauffement climatique projeté. En plus, une présence accrue des essences feuillues, sous l'effet de migration vers le nord, pourrait rendre ces provinces naturelles moins sensibles aux infestations puisque leur présence dans les peuplements mixtes pourrait avoir un effet protecteur (Zhang et al., 2014; Bergeron et al., 1995).

Recommandations

Suite aux quantifications et aux comparaisons des valeurs obtenues dans le cadre de cette synthèse avec les valeurs publiées antérieurement, il est maintenant possible d'identifier les sources d'incertitude les plus importantes dans les calculs des C_{masse} et C_{stock} pour les sols des tourbières et des forêts du Québec. De plus, différentes recommandations sont proposées pour l'amélioration des connaissances et une meilleure gestion des stocks de carbone terrestre tel que recommandé notamment par l'Accord de Paris sur les changements climatiques qui a reconnu le rôle de première importance des forêts dans l'atténuation des changements climatiques.

Recommandations pour l'amélioration des connaissances sur les superficies des stocks cartographiés : tourbières

1. Amélioration de la quantification de la C_{masse} des tourbières à partir d'une modélisation plus détaillée incluant un nombre plus élevé de variables indépendantes (méthodes 3 et 4). La régression, avec la latitude comme seule variable indépendante, devra être remplacée par une régression qui inclut au moins une variable climatique, telle que le nombre de degré-jours de croissance >0 °C.
2. Amélioration de la quantification des C_{masse} dans les régions caractérisées à la fois par une présence importante de tourbières et peu couvertes par la base de données actuelle telle que présentée à la Figure S4.
3. Plus précisément, les territoires suivants ont besoin d'acquisition de connaissances sur la valeur des stocks de carbone terrestre (par ordre décroissant d'importance) :
 - la **province naturelle des Basses-terres de la baie James** et la **partie septentrionale des Basses-terres de l'Abitibi (régions naturelles P01, P02 et F04)**. Peu de données sont disponibles pour ces régions considérant l'importance de ces régions naturelles en ce qui a trait aux C_{masse} et C_{stock} ;
 - la **partie centrale de la province naturelle des Basses-terres de l'Abitibi** et la **partie occidentale des Collines de la Grande Rivière (régions naturelles F02, F03 et H03)** ;
 - la toundra forestière et arbustive, incluant la **province naturelle du Bassin de la baie d'Ungava**, la **partie orientale du Plateau central du Nord-du-Québec (régions naturelles I02, I03, I05 et I07)**. Ces régions associées à la limite septentrionale des tourbières à sphaignes avec dépôts >1 m d'épaisseur (Payette et Rochefort, 2001) ne possèdent pas de valeurs mesurées sur le terrain ;

- la partie occidentale de la province naturelle des **Hautes-Terres de Mistassini (régions naturelles G01, G02, G03)** et la **partie septentrionale des Laurentides méridionales et centrales (régions naturelles C02, C03 et D02)**.

Recommandations pour l'amélioration des connaissances sur les superficies des stocks cartographiés : forêts

Quant aux peuplements forestiers, des mesures de C_{masse} des peuplements forestiers au nord de la limite de la forêt commerciale sont primordiales afin d'améliorer les quantifications de la C_{masse} et du C_{stock} pour cette partie du Québec. La méthode 6, nettement plus précise que la méthode 7, couvre actuellement 67% de la superficie totale de peuplements répertoriés au Québec (Figure S1). Une modélisation des C_{masse} (Tremblay et al., 2002) pour les provinces naturelles actuellement couvertes par la méthode 7 (ou 33% de la superficie des peuplements au Québec) sera éventuellement nécessaire. Pour arriver à une quantification comparable à ce qui est actuellement disponible pour les provinces naturelles de la forêt commerciale, un très grand nombre de mesures, provenant de l'ensemble de la forêt boréale ouverte, ainsi qu'une partie de la toundra forestière, sera nécessaire.

Recommandations de pistes de recherche face à l'impact des changements globaux sur la dynamique du carbone terrestre

1. Dans le contexte de l'évaluation de la dynamique du carbone terrestre, il devient nécessaire de quantifier non seulement les stocks de carbone terrestre mais aussi les échanges nets des écosystèmes forestiers et tourbeux (émissions atmosphériques de CO_2 et CH_4) afin de « **chiffrer** » **leur capacité à de séquestrer le carbone atmosphérique**.
2. En fonction des projections climatiques du consortium Ouranos et des résultats récemment acquis (Lamarre et al, 2012 ; Sanderson, 2016), les tourbières nordiques situées dans les régions à pergélisol devront être étudiées plus en détail afin de **vérifier l'hypothèse d'un retour à une fonction de séquestration du carbone**.
3. Avec une modification de l'équilibre des écosystèmes tourbeux engendrés par des changements naturels ou anthropiques (assèchement, drainage, fonte du pergélisol, etc.), il importe **d'évaluer les transferts de carbone organique dissous depuis les compartiments terrestres vers les compartiments aquatiques** en tenant

compte des impacts engendrés à la fois sur la qualité de l'eau et la hausse des émissions de carbone.

4. Considérant le développement économique du nord québécois, **l'intégrité écologique des tourbières et de leur fonction de séquestration nécessite d'être documenté par rapport aux différentes pressions anthropiques** auxquelles elles sont soumises : activités de drainage, de remblaiement ou construction de routes, modification du régime hydrologique ou trophique des écosystèmes.
5. Dans ce contexte, il est suggéré de développer un **outil d'intégrité écologique** des tourbières à partir d'indicateurs de diversité biologique intégrant la végétation de surface et des assemblages de microorganismes (protistes) étroitement associés à l'hydrologie des tourbières.
6. Il importe aussi de considérer dans le futur la quantification des stocks de carbone des milieux humides côtiers autres que les tourbières en référence à la reconnaissance internationale récente de la fonction écosystémique **du carbone bleu (« blue carbon ») dans l'atténuation naturelle du réchauffement du climat** (Fourqurean et al, 2012).
7. **Les pertes importantes de tourbières et de milieux humides soumis au phénomène récent de l'érosion côtière** nécessitent d'être évaluées en collaboration avec les travaux en cours à la Chaire de recherche en géosciences côtières de l'Université du Québec à Rimouski et le Consortium Ouranos.
8. Finalement, et tel que déjà suggéré par Terrier et al. (2013), l'efficacité des peuplements forestiers feuillus à séquestrer le carbone nécessite d'être mieux quantifiée afin d'évaluer leur potentiel réel de stockage comparativement à celui des forêts de conifères.

Conclusion

À la suite du calcul de la quantification détaillée du stock de carbone des sols des écosystèmes tourbeux et forestiers du Québec, la valeur totale obtenue est de **18,00 Gt C**. Même si les tourbières n'occupent que 108 073 km² au Québec, comparé à 718 808 km² pour les peuplements forestiers (ou 663 277 km² si on tient compte seulement des peuplements pour lesquels les C_{masse} pouvaient être quantifiées), les tourbières représentent plus que la moitié (10,77 Gt C) du stock de carbone terrestre au Québec.

Tableau 3 : Valeurs des superficies, C_{masse} et C_{stock} dans les différentes publications.

Écosystème		Résumé septembre 2015	Rapport décembre 2015	Rapport final février 2016
Tourbières	Superficie (km ²)	115 900	106 981 à 108 073	108 073
	C_{masse} (kg C m ⁻²)	-	94,4 à 101,4	100,0
	C_{stock} (Gt C)	15,2	10,20 à 10,85	10,77
Forêts	Superficie (km ²) ¹	761 100	718 808	718 808
	C_{masse} (kg C m ⁻²)	-	11,0	10,89
	C_{stock} (Gt C)	10-20	6,92	7,22 ²

¹Valeur incluant les régions pour lesquelles C_{masse} n'était pas disponible

²Valeurs non-extrapolées

Équivalent d'émissions anthropiques

En 2013, l'ensemble des émissions des activités anthropiques au Québec a atteint 82,6 Mt en équivalent de CO₂ (Environnement Canada, 2015), soit 1,25 ‰ de la valeur du C_{stock} contenue dans les écosystèmes terrestres du Québec. La valeur du C_{stock} total du Québec représente donc un équivalent d'environ 800 années d'émissions anthropiques au rythme actuel, réparties entre 478 années pour les tourbières et 321 années pour les sols forestiers.

Plusieurs organismes internationaux (GIEC, UNFCCC, REDD, PNUE) reconnaissent maintenant le rôle fondamental que jouent les écosystèmes forestiers et tourbeux dans la séquestration du carbone et, par conséquent dans l'atténuation naturelle des changements climatiques. Les milieux humides qui sont beaucoup moins affectés par les perturbations (feux, épidémies) que les forêts, transforment, capturent (piègent) et stockent de plus importantes quantités de carbone puisqu'une grande partie est emmagasiné depuis plusieurs milliers d'années dans leurs horizons organiques. Avec les résultats de cette synthèse sur le carbone terrestre, le Québec fait preuve d'innovation et de leadership à l'échelle du Canada. Les politiques d'atténuation du climat ont en effet besoin de s'appuyer sur les données scientifiques acquises sur le carbone des écosystèmes afin de tenir compte de leur gestion dans les pratiques futures d'aménagement du territoire. Une augmentation des investissements dans la conservation, la réhabilitation et la gestion des tourbières, des forêts, des milieux humides pourrait limiter les émissions de gaz à effet de serre et éviter qu'ils ne s'échappent dans l'atmosphère. Il apparaît donc cohérent qu'à l'instar des objectifs des organismes internationaux, la gestion du carbone terrestre soit intégrée dans les engagements nationaux d'atténuation des gaz à effet de serre.

Remerciements

Ce projet a été rendu possible grâce à une subvention du Fonds vert du gouvernement du Québec octroyée à la demande du ministre David Heurtel du Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte aux Changements climatiques (MDDELCC). Nos remerciements s'adressent à plusieurs professionnels du MDDELCC. Merci à madame Josée Michaud de la Direction générale de l'expertise climatique et des partenariats qui a agi comme personne-ressource au cours de la réalisation du projet. Merci aussi à messieurs Frédéric Poisson, Daniel Lachance, Daniel Bérubé et Martin Joly ainsi que madame Marie-Josée Côté de la Direction l'Expertise en Biodiversité pour leur disponibilité, pour nous avoir donné accès aux données d'inventaire de leur ministère ainsi que pour la production des cartes de stock de carbone. Merci aussi pour ceux et celles qui ont fourni des commentaires constructifs apportés pour l'amélioration du document final. Nous tenons aussi à remercier messieurs Michel Campagna, Rock Ouimet et Jean Noel ainsi que madame Sylvie Tremblay de la Direction de la recherche forestière du Ministère des Forêts de la Faune et des Parcs (MFFP) pour nous avoir donné accès aux données de l'inventaire écoforestier de leur ministère ainsi que des résultats de la modélisation du carbone forestier. Enfin un merci spécial au Consortium Ouranos (Sébastien Biner) pour la création des projections climatiques. Nous remercions aussi le North American Climate Change Assessment Program (NARCCAP) d'avoir fourni les données climatiques utilisées dans ce rapport. Le projet NARCCAP est financé par la National Science Foundation (NSF), le U.S. Department of Energy (DoE), le National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), et le U.S. Environmental Protection Agency Office of Research and Development (EPA).

Références

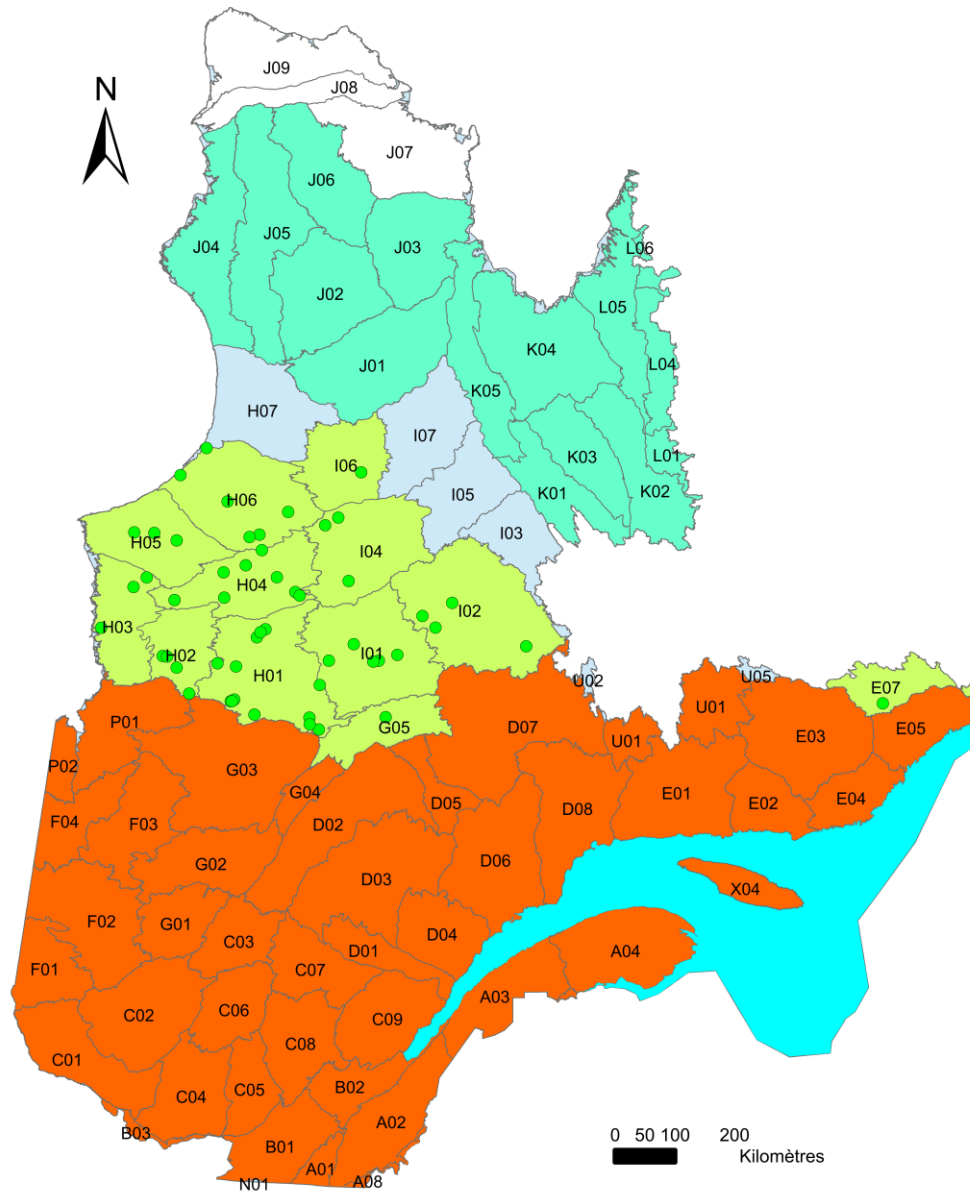
- Amiro BD, Cantin A, Flannigan MD, et al. (2009) Future emissions from Canadian boreal forest fires. *Canadian Journal of Forest Research* 39: 383-395.
- Amiro BD, Todd JB, Wotton BM, et al. (2001) Direct carbon emissions from Canadian forest fires, 1959-1999. *Canadian Journal of Forest Research* 31: 512-525.
- Bergeron Y, Cyr D, Girardin MP, et al. (2010) Will climate change drive 21st century burn rates in Canadian boreal forests outside of natural variability: collating global climate model experiments with sedimentary charcoal data. *International Journal of Wildland Fire* 19: 1127-1139.
- Bergeron Y, Gauthier S, Flannigan M, et al. (2004) Fire regimes at the transition between mixedwood and coniferous boreal forest in northwestern Quebec. *Ecology* 85: 1916-1932.
- Bergeron Y, Gauthier S, Kafka V, et al. (2001) Natural fire frequency for the eastern Canadian boreal forest: consequences for sustainable forestry. *Canadian Journal of Forest Research* 31: 384-391.

- Bergeron Y, Leduc A, Joyal C, et al. (1995) Balsam fir mortality following the last spruce budworm outbreak in northwestern Quebec. *Canadian Journal of Forest Research* 25: 1375-1384.
- Berteaux D, Blois Sd, Angers J-F, et al. (2010) The CC-Bio Project: Studying the Effects of Climate Change on Quebec Biodiversity. *Diversity* 2: 1181.
- Bissonnette J et Lavoie S. (2015) Utilisation du territoire - Méthodologie et description de la couche d'information géographique. MDDELCC, Québec, 30 p.
- Boreal Songbird Initiative (2015) *Boreal forest - Provincial and territorial forest facts*. Disponible à <http://www.borealbirds.org/province-territory-boreal-forest-facts/Quebec>.
- Boulanger Y et Arseneault D. (2004) Spruce budworm outbreaks in eastern Quebec over the last 450 years. *Canadian Journal of Forest Research* 34: 1035-1043.
- Boulanger Y, Gauthier S, Gray DR, et al. (2013) Fire regime zonation under current and future climate over eastern Canada. *Ecological Applications* 23: 904-923.
- Charman DJ, Beilman DW, Blaauw M, et al. (2013) Climate-related changes in peatland carbon accumulation during the last millennium. *Biogeosciences* 10: 929-944.
- Cliche Trudeau N, Garneau M et Pelletier L. (2014) Interannual variability in the CO₂ balance of a boreal patterned fen, James Bay, Canada. *Biogeochemistry* 118: 371-387.
- de Elía R et Côté H. (2010) Climate and climate change sensitivity to model configuration in the Canadian RCM over North America. *Meteorologische Zeitschrift* 19: 325-339.
- Dean WE. (1974) Determination of carbonate and organic matter in calcareous sediments and sedimentary rocks by loss on ignition; comparison with other methods. *Journal of Sedimentary Research* 44: 242-248.
- Dissanska M, Bernier M et Payette S. (2009) Object-based classification of very high resolution panchromatic images for evaluating recent change in the structure of patterned peatlands. *Canadian Journal of Remote Sensing* 35: 189-215.
- Environnement Canada (2015) Rapport d'inventaire national 1990-2013 : sources et puits de gaz à effet de serre au Canada (Partie 3). Division des Inventaires et rapports sur les polluants, Ottawa.
- Fourqurean JW, Duarte CM, Kennedy H, et al. (2012) Seagrass ecosystems as a globally significant carbon stock. *Nature Geosci* 5: 505-509.
- Gagnon G, Gravel C, Ouimet R, et al. (1994) Le réseau de surveillance des écosystèmes forestiers (RESEF) : 1. Définitions et méthodes. Ministère des Ressources naturelles-Direction de la recherche forestière, Québec, 115 p.
- Garneau M, van Bellen S, Magnan G, et al. (2014) Holocene carbon dynamics of boreal and subarctic peatlands from Québec, Canada. *The Holocene*: 1-11.
- GIEC (2013) Changements climatiques 2014. Les éléments scientifiques. Résumé à l'intention des décideurs. Groupe de travail I. Contribution du Groupe de travail I au cinquième rapport d'Évaluation du Groupe d'Experts intergouvernemental sur l'Évolution du Climat. De Stocker TF, D. Qin D, Plattner G-K, et al. (eds). Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York (État de New York), États-Unis d'Amérique, 151 p.
- Girardin MP et Mudelsee M. (2008) Past and future changes in Canadian boreal wildfire activity. *Ecological Applications* 18: 391-406.
- Gorham E. (1991) Northern peatlands: role in the carbon cycle and probable responses to climatic warming. *Ecological Applications* 1: 182-195.
- Gorham E, Janssens JA et Glaser PH. (2003) Rates of peat accumulation during the postglacial period in 32 sites from Alaska to Newfoundland, with special emphasis on northern Minnesota. *Canadian Journal of Botany* 81: 429-438.

- Hély C, Flannigan M, Bergeron Y, et al. (2001) Role of vegetation and weather on fire behavior in the Canadian mixedwood boreal forest using two fire behavior prediction systems. *Canadian Journal of Forest Research* 31: 430-441.
- Hugelius G, Tarnocai C, Broll G, et al. (2013) 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: 3-13.
- Kurz WA, Dymond CC, Stinson G, et al. (2008) Mountain pine beetle and forest carbon feedback to climate change. *Nature* 452: 987-990.
- Laganière J, Angers DA, Paré D, et al. (2011) Black Spruce Soils Accumulate More Uncomplexed Organic Matter than Aspen Soils. *Soil Science Society of America Journal* 75.
- Laganière J, Paré D, Bergeron Y, et al. (2013) Stability of Soil Carbon Stocks Varies with Forest Composition in the Canadian Boreal Biome. *Ecosystems* 16: 852-865.
- Laganière J, Paré D, Bergeron Y, et al. (2012) The effect of boreal forest composition on soil respiration is mediated through variations in soil temperature and C quality. *Soil Biology and Biochemistry* 53: 18-27.
- Lamarre A, Garneau M et Asnong H. (2012) Holocene paleohydrological reconstruction and carbon accumulation of a permafrost peatland using testate amoeba and macrofossil analyses, Kuujuarapik, subarctic Québec, Canada. *Review of Palaeobotany and Palynology* 186: 131-141.
- Laterreur N. (2009) Structuration relationnelle et intégration des données multisources de trois tourbières du bassin versant de la région de la rivière La Grande, Baie James. *Département de géographie*. Montréal, Québec: Université du Québec à Montréal.
- Lecomte N, Simard M, Fenton N, et al. (2006) Fire severity and long-term ecosystem biomass dynamics in coniferous boreal forests of eastern Canada. *Ecosystems* 9: 1215-1230.
- Magnan G et Garneau M. (2014) Climatic and autogenic control on Holocene carbon sequestration in ombrotrophic peatlands of maritime Quebec, eastern Canada. *The Holocene* 24: 1054-1062.
- Margolis HA, Nelson RF, Montesano PM, et al. (2015) Combining satellite lidar, airborne lidar, and ground plots to estimate the amount and distribution of aboveground biomass in the boreal forest of North America. *Canadian Journal of Forest Research* 45: 838-855.
- Mearns LO, Gutowski W, Jones R, et al. (2009) A regional climate change assessment program for North America. *Eos* 90.
- MFFP (2015) Ressources et industries forestières. Portrait statistique 2015. Ministère de la Faune et des Forêts, Québec, 106 p.
- MRN (2008) Norme de stratification écoforestière. Ministère des Ressources naturelles et de la Faune-Direction des inventaires forestiers, Québec, 92 p.
- Music B et Caya D. (2007) Evaluation of the Hydrological Cycle over the Mississippi River Basin as Simulated by the Canadian Regional Climate Model (CRCM). *Journal of Hydrometeorology* 8: 969-988.
- Nelson R, Boudreau J, Gregoire TG, et al. (2009) Estimating Quebec provincial forest resources using ICESat/GLAS. *Canadian Journal of Forest Research* 39: 862-881.
- Payette S, Delwaide A, Caccianiga M, et al. (2004) Accelerated thawing of subarctic peatland permafrost over the last 50 years. *Geophysical Research Letters* 31: L18208.
- Payette S, Morneau C, Sirois L, et al. (1989) Recent fire history of the northern Quebec biomes. *Ecology* 70: 656-673.
- Payette S et Rochefort L. (2001) *Écologie des tourbières du Québec-Labrador*, Ste-Foy: Les presses de l'Université Laval.

- Pelletier L, Garneau M et Moore TR. (2011) Variation in CO₂ exchange over three summers at microform scale in a boreal bog, Eastmain region, Québec, Canada. *Journal of Geophysical Research G: Biogeosciences* 116.
- Preston CM, Trofymow JA et Canadian Intersite Decomposition Experiment Working Group (2000) Variability in litter quality and its relationship to litter decay in Canadian forests. *Canadian Journal of Botany* 78: 1269-1287.
- Pureswaran, DC, DeGrandpré, L, Paré, D, Taylor, A, Barrette, M, Morin, H, Regnière, J, Kneeshaw DD (2015) Climate-induced change in host tree-insect phenology may drive ecological state-shift in boreal forest. *Ecology* 96: 1480-1491.
- Roiha T, Laurion I et Rautio M. (2015) Carbon dynamics in highly heterotrophic subarctic thaw ponds. *Biogeosciences* 12: 7223-7237.
- Sanderson NK. (2016) Patterns and drivers of recent peatland carbon accumulation in northeastern Canada. *Geography Department*. Exeter: University of Exeter, 172 p.
- Siltanen R, Apps M, Zoltai S, et al. (1997) A soil profile and organic carbon data base for Canadian forest and tundra mineral soils. Natural Resources Canada CFS, Northern Forestry Centre. Edmonton, Canada.
- Swindles GT, Morris PJ, Mullan D, et al. (2015) The long-term fate of permafrost peatlands under rapid climate warming. *Scientific Reports* 5: 17951.
- Tarnocai C, Kettles I et Lacelle B. (2011) *Peatlands of Canada*: Geological Survey of Canada.
- Tarnocai C et Lacelle B. (1996) The soil organic carbon digital database of Canada. Research Branch, Agriculture and Agri-Food Canada, Ottawa.
- Terrier A, Girardin MP, Périé C, et al. (2013) Potential changes in forest composition could reduce impacts of climate change on boreal wildfires. *Ecological Applications* 23: 21-35.
- Thibault A. (2015) Caractérisation morphologique et stratigraphique des mares des tourbières ombrotrophes de Baie-Comeau et de Havre-Saint-Pierre, Côte-Nord, Québec. *Département de géographie*. Montréal, Québec: Université du Québec à Montréal.
- Tremblay S, Ouimet R et Houle D. (2002) Prediction of organic carbon content in upland forest soils of Quebec, Canada. *Canadian Journal of Forest Research* 32: 903-914.
- Turetsky MR, Wieder RK, Vitt DH, et al. (2007) The disappearance of relict permafrost in boreal north America: effects on peatland carbon storage and fluxes. *Global Change Biology* 13: 1922-1934.
- Turunen J, Roulet NT, Moore TR, et al. (2004) Nitrogen deposition and increased carbon accumulation in ombrotrophic peatlands in eastern Canada. *Global Biogeochemical Cycles* 18: doi:10.1029/2003GB002154.
- van Bellen S, Dallaire P-L, Garneau M, et al. (2011) Quantifying spatial and temporal Holocene carbon accumulation in ombrotrophic peatlands of the Eastmain region, Quebec, Canada. *Global Biogeochemical Cycles* 25.
- Vonk JE, Tank SE, Mann PJ, et al. (2015) Biodegradability of dissolved organic carbon in permafrost soils and aquatic systems: a meta-analysis. *Biogeosciences* 12: 6915-6930.
- Wotton BM, Nock CA et Flannigan MD. (2010) Forest fire occurrence and climate change in Canada. *International Journal of Wildland Fire* 19: 253-271.
- Yu Z. (2006) Holocene carbon accumulation of fen peatlands in boreal western Canada: a complex ecosystem response to climate variation and disturbance. *Ecosystems* 9: 1278-1288.
- Zhang X, Lei Y, Ma Z, et al. (2014) Insect-induced tree mortality of boreal forests in eastern Canada under a changing climate. *Ecology and Evolution* 4: 2384-2394.

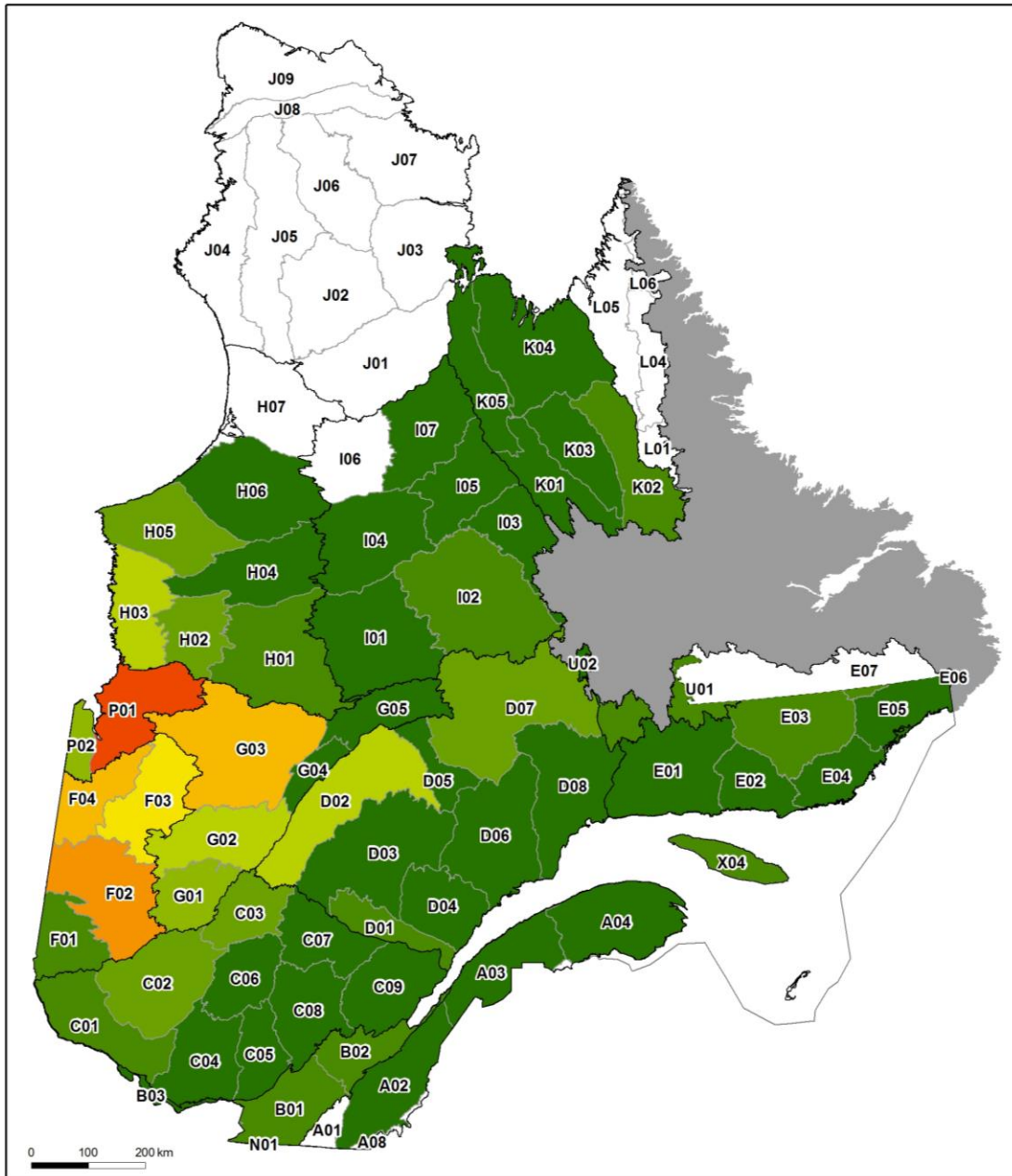
Annexe



Régions naturelles :

- sans peuplements cartographiés
- avec peuplements cartographiés mais sans inventaire de C_{masse}
- avec peuplements cartographiés et C_{masse} extrapolée selon la province naturelle
- avec peuplements cartographiés et C_{masse} moyennée selon données de Siltanen et al. (1997)
- site d'échantillonnage de Siltanen et al. (1997)
- avec peuplements cartographiés et C_{masse} modélisée selon Tremblay et al. (2002)

Figure S1 : Identification des méthodes utilisées pour la quantification des C_{masse} par région naturelle.



Carbone des tourbières par régions naturelles en Mt

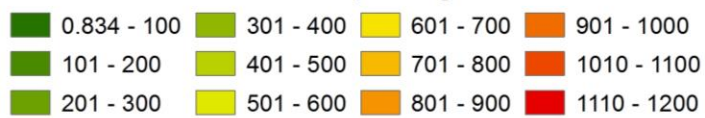


Figure S2 : C_{stock} des tourbières par région naturelle selon la méthode 4.

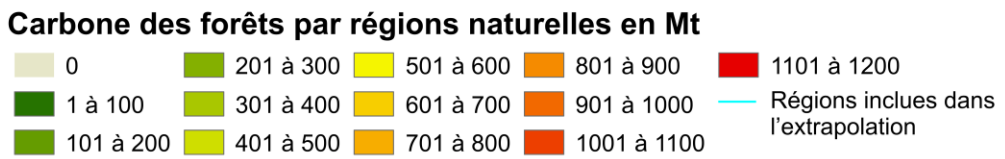
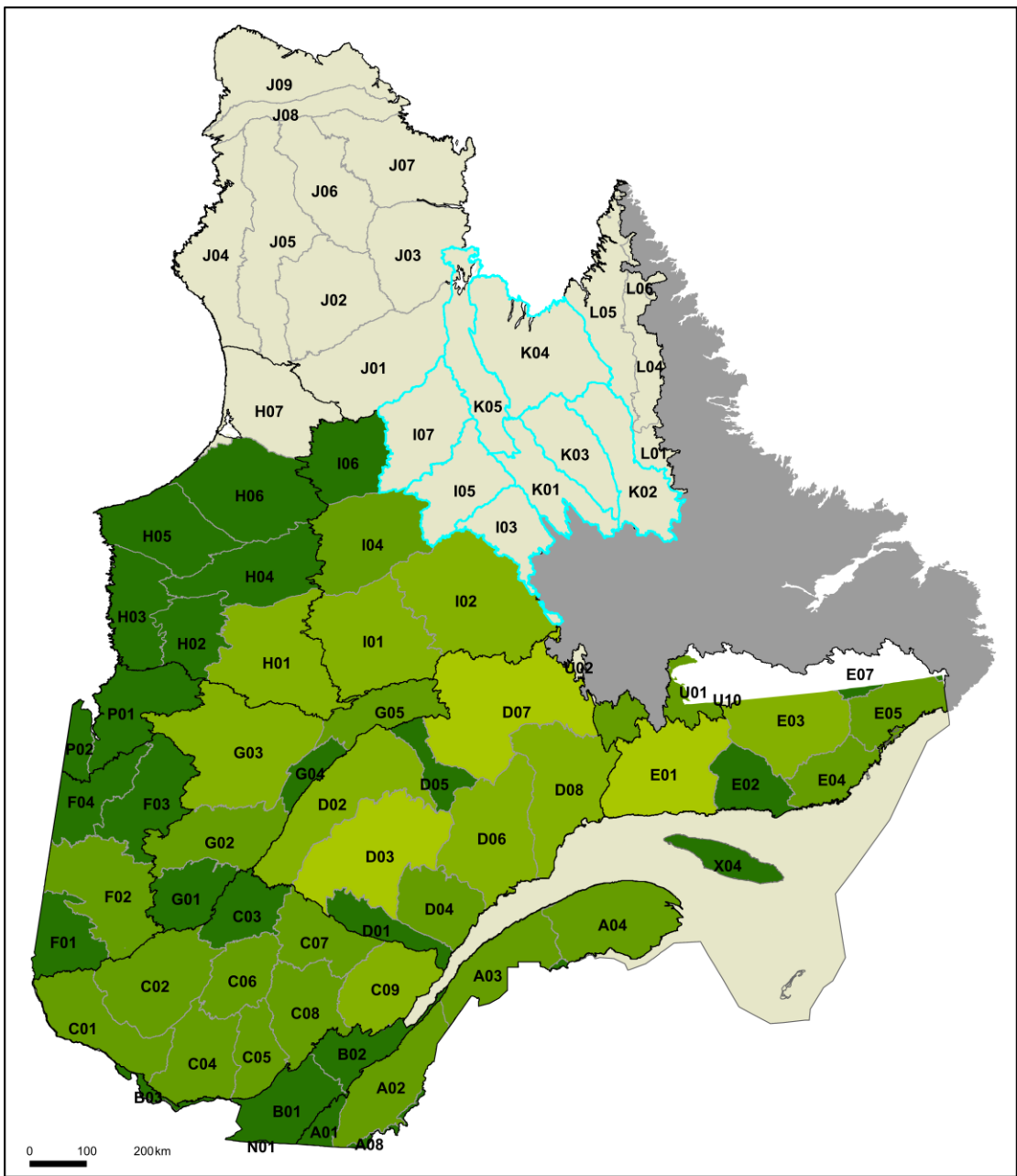


Figure S3 : C_{stock} des peuplements forestiers par région naturelle selon les méthodes 6 et 7.

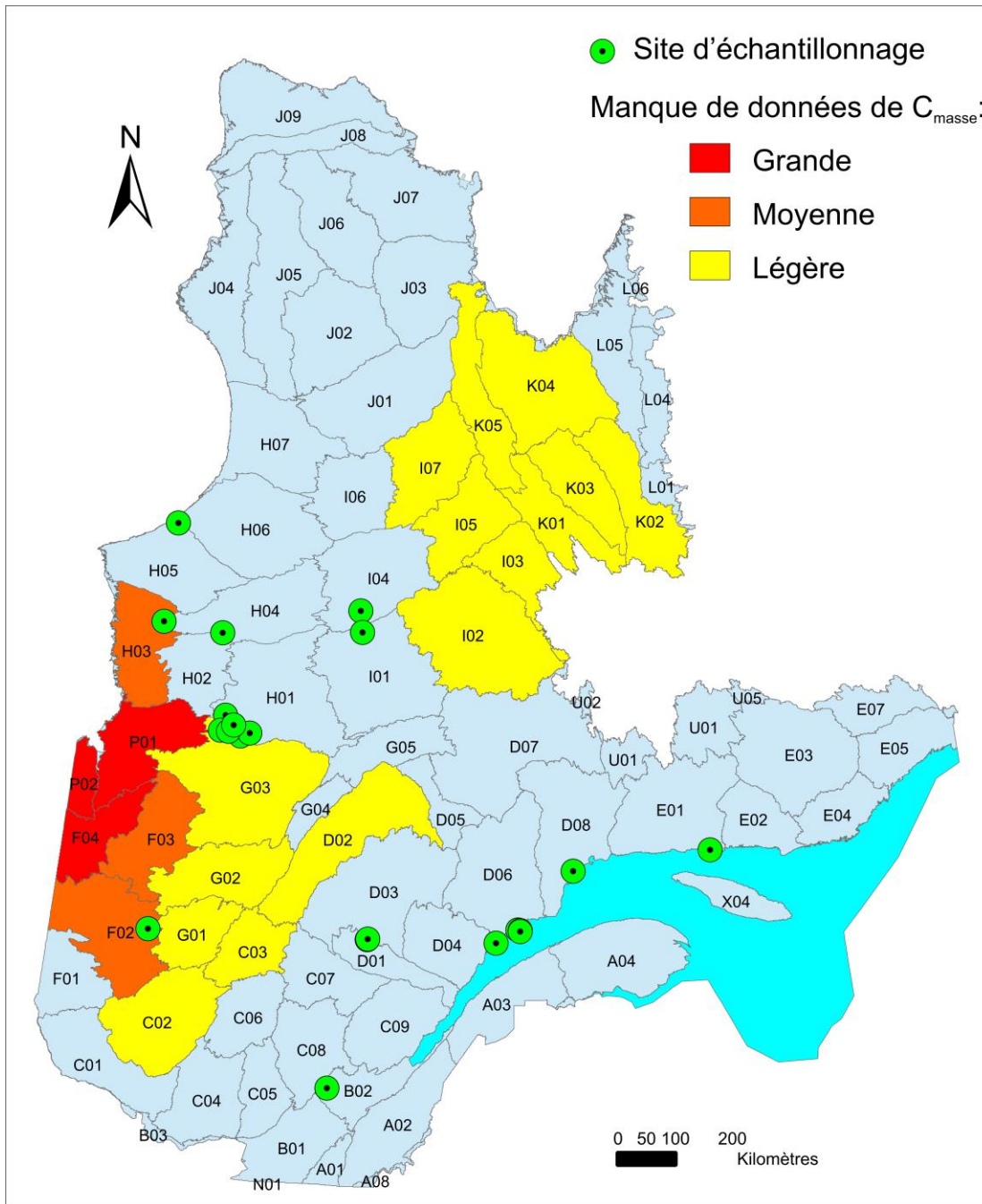
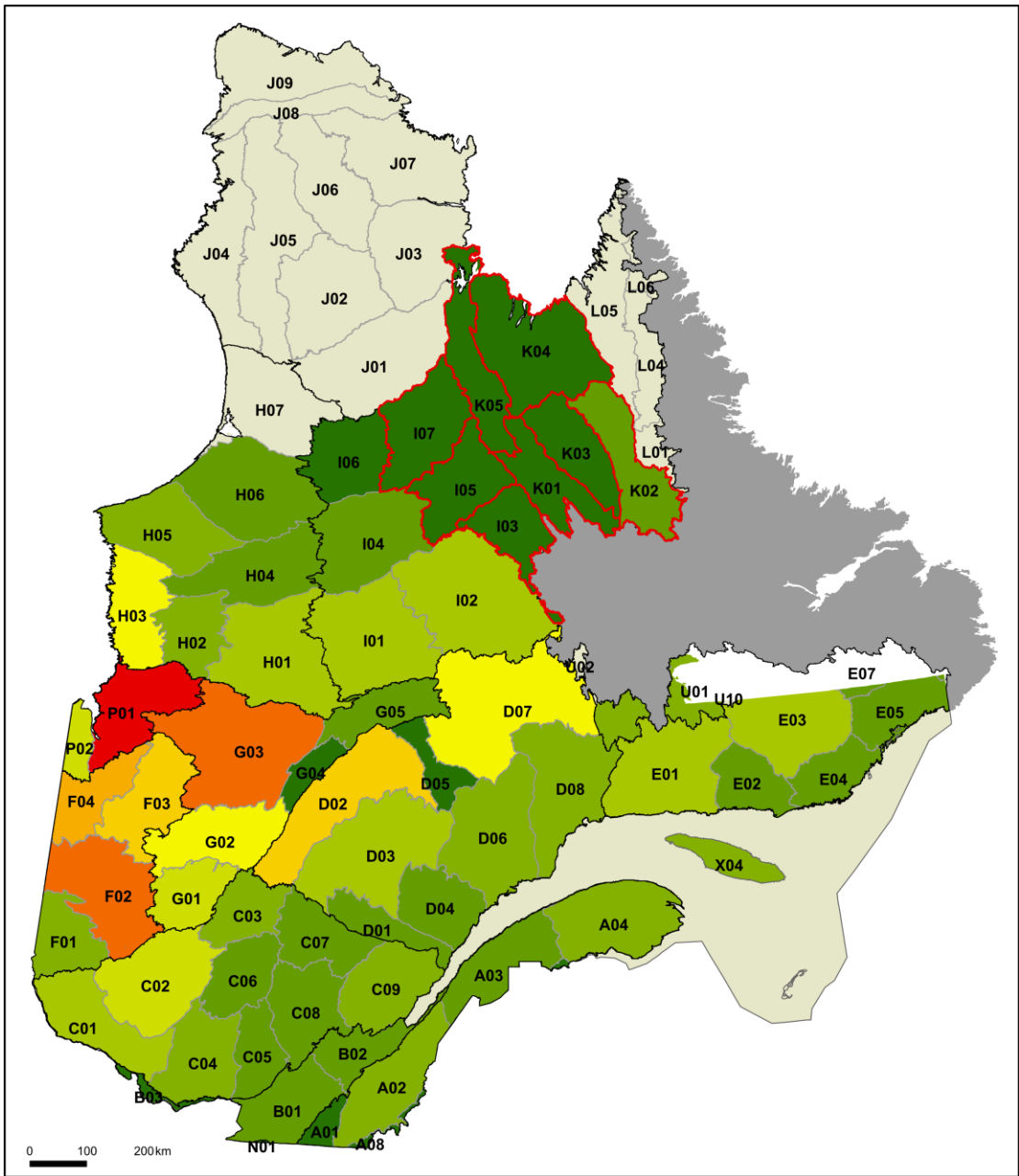


Figure S4 : Régions naturelles devant être prioritisées dans le cadre de futurs projets de quantification de C_{masse} et sites actuellement disponibles.



Carbone total par régions naturelles en Mt

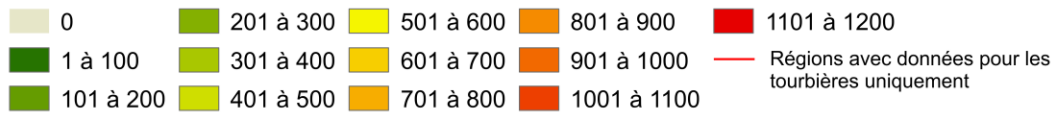


Figure S5 : C_{stock} de l'ensemble des tourbières (méthode 4) et des peuplements forestiers par région naturelle.

Tableau S1 : Détails sur l'application et les bases de données utilisées dans les méthodes différentes.

Méthode	Écosystème	Province/ région naturelle inclue	Données cartographiées d'épaisseur des dépôts organiques?	Quantification C_{masse} (kg m^{-2})	Source des données spatiales
#1	Tourbières	A-G, N, P, X (inventaire PEU4)	Oui	Avec épaisseur MFFP (Dépôt D_7 avec sous-classes 7E et 7T)	MFFP (Dépôt D_7)
#2	Tourbières	Territoire entier (sauf provinces naturelles J et L)	Oui	Avec épaisseur MDDELCC (Dépôts D_0B et D_7)	MDDELCC (Dépôts D_0B et D_7)
#3	Tourbières	Territoire entier (sauf provinces naturelles J et L)	Non	Modélisation selon latitude	MFFP (Dépôt D_7 >1m)
#4	Tourbières	Territoire entier (sauf provinces naturelles J et L)	Non	Modélisation selon latitude	MDDELCC (Dépôt D_7 >1m)
#5	Tourbières	Territoire entier (sauf provinces naturelles J et L)	Non	Modélisation selon latitude	MDDELCC (Bissonnette et Lavoie, 2015)
#6	Peuplements forestiers	Provinces naturelles A- G, P, U, X (sauf E06, E07 et G05)	s/o	Modélisation selon Tremblay et al. (2002)	MDDELCC (Bissonnette et Lavoie, 2015)
#7	Peuplements forestiers	Provinces naturelles H et I et régions E06, E07 et G05	s/o	Moyennes à partir de Siltanen et al. (1997)	MDDELCC (Bissonnette et Lavoie, 2015)

Tableau S2 : Superficie, C_{masse} et C_{stock} des tourbières par province naturelle selon la méthode 1.

Province naturelle	Code	Superficie des tourbières (km ²)	C_{masse} (kg C m ⁻²) <i>moyenne</i>	C_{stock} (Gt)
Les Appalaches	A	2317	72,2	0,17
Basses-terres du Saint-Laurent	B	1119	84,9	0,10
Les Laurentides méridionales	C	8362	88,3	0,74
Les Laurentides centrales	D	11051	87,8	0,97
Plateau de la Basse-Côte-Nord	E	2320	83,9	0,19
Basses-terres de l'Abitibi	F	24128	96,3	2,32
Hautes-terres de Mistassini	G	12279	91,7	1,13
Collines de la Grande Rivière	H	s/o	s/o	s/o
Plateau central du Nord-du-Québec	I	s/o	s/o	s/o
Bassin de la baie d'Ungava	K	s/o	s/o	s/o
Les Adirondacks	N	1	103,9	0,00
Basses-terres de la baie James	P	739	112,8	0,08
Labrador central	U	s/o	s/o	s/o
Estuaire et golfe du Saint-Laurent	X	1620	86,4	0,14

Tableau S3 : Superficie, C_{masse} et C_{stock} des tourbières par province naturelle selon la méthode 2.

Province naturelle	Code	Superficie des tourbières (km ²)	C_{masse} (kg C m ⁻³) <i>moyenne</i>	C_{stock} (Gt)	C_{stock} relatif (%)
Les Appalaches	A	985	126,2	0,12	0,9
Basses-terres du Saint-Laurent	B	1490	126,2	0,19	1,4
Les Laurentides méridionales	C	6478	126,2	0,82	5,9
Les Laurentides centrales	D	9472	118,3	1,12	8,2
Plateau de la Basse-Côte-Nord	E	10732	77,0	0,83	6,0
Basses-terres de l'Abitibi	F	20824	126,2	2,63	19,1
Hautes-terres de Mistassini	G	15793	126,2	1,99	14,5
Collines de la Grande Rivière	H	16247	126,2	2,05	14,9
Plateau central du Nord-du-Québec	I	6672	126,2	0,84	6,1
Péninsule d'Ungava	J	0	s/o	s/o	s/o
Bassin de la baie d'Ungava	K	5951	126,2	0,75	5,5
Labrador septentrional	L	0	s/o	s/o	s/o
Les Adirondacks	N	0	s/o	s/o	s/o
Basses-terres de la baie James	P	15054	126,2	1,90	13,8
Labrador central	U	2376	126,2	0,30	2,2
Estuaire et golfe du Saint-Laurent	X	1654	126,2	0,21	1,5
Québec		113 727	120,9	13,75	100%

Tableau S4 : Superficie, C_{masse} et C_{stock} des tourbières par province naturelle selon la méthode 3.

Province naturelle	Code	Superficie des tourbières (km ²)	C_{masse} (kg C m ⁻²) <i>moyenne</i>	C_{stock} (Gt)	C_{stock} relatif (%)
Les Appalaches	A	2317	137,7	0,32	2,9
Basses-terres du Saint-Laurent	B	1119	147,7	0,17	1,5
Les Laurentides méridionales	C	8362	133,8	1,12	10,3
Les Laurentides centrales	D	13424	101,1	1,36	12,5
Plateau de la Basse-Côte-Nord	E	4893	96,7	0,47	4,4
Basses-terres de l'Abitibi	F	25897	112,5	2,91	26,8
Hautes-terres de Mistassini	G	15709	105,1	1,65	15,2
Collines de la Grande Rivière	H	8404	72,4	0,61	5,6
Plateau central du Nord-du-Québec	I	4233	65,4	0,28	2,6
Bassin de la baie d'Ungava	K	3239	42,7	0,14	1,3
Les Adirondacks	N	1	160,5	0,00	0,0
Basses-terres de la baie James	P	16728	93,3	1,56	14,4
Labrador central	U	1021	82,6	0,08	0,8
Estuaire et golfe du Saint-Laurent	X	1636	113,4	0,19	1,7
Québec		106 981	101,4	10,85	100%

Tableau S5 : Superficie, C_{masse} et C_{stock} des tourbières par province naturelle selon la méthode 4.

Province naturelle	Code	Superficie des tourbières (km ²)	C_{masse} (kg C m ⁻³) <i>moyenne</i>	C_{stock} (Gt)	C_{stock} relatif (%)
Les Appalaches	A	985	139,5	0,14	1,3
Basses-terres du Saint-Laurent	B	1490	148,8	0,22	2,2
Les Laurentides méridionales	C	6478	133,6	0,87	8,5
Les Laurentides centrales	D	8772	100,2	0,88	8,6
Plateau de la Basse-Côte-Nord	E	5777	91,4	0,53	5,2
Basses-terres de l'Abitibi	F	20824	113,9	2,37	23,2
Hautes-terres de Mistassini	G	15793	103,5	1,63	16,0
Collines de la Grande Rivière	H	16247	69,3	1,13	11,0
Plateau central du Nord-du-Québec	I	6672	59,2	0,39	3,9
Péninsule d'Ungava	J	s/o	s/o	s/o	s/o
Bassin de la baie d'Ungava	K	5951	46,6	0,28	2,7
Labrador septentrional	L	s/o	s/o	s/o	s/o
Les Adirondacks	N	0	s/o	s/o	s/o
Basses-terres de la baie James	P	15054	93,2	1,40	13,7
Labrador central	U	2376	75,0	0,18	1,7
Estuaire et golfe du Saint-Laurent	X	1654	113,3	0,19	1,8
Québec		108 073	94,4	10,20	100%

Tableau S6 : Superficie, C_{masse} et C_{stock} des tourbières par province naturelle selon la méthode 5.

Province naturelle	Code	Superficie des tourbières (km ²)	C_{masse} (kg C m ⁻³) <i>moyenne</i>	C_{stock} (Gt)	C_{stock} relatif (%)
Les Appalaches	A	1932	137,2	0,26	3,2
Basses-terres du Saint-Laurent	B	1033	147,6	0,15	1,8
Les Laurentides méridionales	C	7144	133,6	0,95	11,5
Les Laurentides centrales	D	10640	102,8	1,09	13,2
Plateau de la Basse-Côte-Nord	E	2872	97,3	0,28	3,4
Basses-terres de l'Abitibi	F	22738	112,3	2,55	30,8
Hautes-terres de Mistassini	G	12748	106,7	1,36	16,4
Collines de la Grande Rivière	H	4259	66,6	0,28	3,4
Plateau central du Nord-du-Québec	I	4306	58,5	0,25	3,0
Péninsule d'Ungava	J	7599	7,9	0,06	0,7
Bassin de la baie d'Ungava	K	3304	38,2	0,13	1,5
Labrador septentrional	L	905	27,7	0,03	0,3
Les Adirondacks	N	1	160,5	0,00	0,0
Basses-terres de la baie James	P	7042	93,4	0,66	7,9
Labrador central	U	321	82,1	0,03	0,3
Estuaire et golfe du Saint-Laurent	X	1778	113,5	0,20	2,4
Québec		88 620	93,6	8,29	100%

Tableau S7 : Superficie et C_{stock} pour l'horizon minéral et la strate organique des peuplements forestiers des provinces naturelles selon les méthodes 6 et 7. Les valeurs obtenues avec la méthode 7 sont affichées en rouge.

Province naturelle	Code	Superficie des peuplements (km ²)	C_{stock} (Gt)		total
			minéral	organique	
Les Appalaches	A	49 335	0,259	0,213	0,473
Basses-terres du Saint-Laurent	B	7511	0,056	0,037	0,092
Les Laurentides méridionales	C	121 147	0,842	0,471	1,312
Les Laurentides centrales	D	136 803	0,882	0,760	1,642
Plateau de la Basse-Côte-Nord	E	65 384	0,616	0,391	1,007
Basses-terres de l'Abitibi	F	32 263	0,154	0,142	0,296
Hautes-terres de Mistassini	G	55 230	0,297	0,281	0,578
Collines de la Grande Rivière	H	81 893	0,354	0,282	0,636
Plateau central du Nord-du-Québec	I	85 961	0,530	0,370	0,899
Péninsule d'Ungava	J	5604	s/o	s/o	s/o
Bassin de la baie d'Ungava	K	46 726	s/o	s/o	s/o
Labrador septentrional	L	3200	s/o	s/o	s/o
Les Adirondacks	N	57	0,0005	0,0004	0,0008
Basses-terres de la baie James	P	13 445	0,048	0,076	0,124
Labrador central	U	9046	0,078	0,049	0,127
Estuaire et golfe du Saint-Laurent	X	5201	0,013	0,024	0,037

Tableau S8 : Résumé des superficies, C_{masse} et C_{stock} selon les différentes méthodes, par type d'écosystème et regroupement de province/région naturelle.

Province/ région naturelle	Sous-zone de végétation	Écosystème considéré	Superficie (km ²)	C_{masse} (kg m ⁻²)	C_{stock} (Gt)	Méthode
A, B, C, N	Forêt tempérée décidue et mixte	Tourbière	11798	84,8 (±32,4)	1,00 (±0,38)	#1
		Tourbière	8953	126,2 (±52,2)	1,13 (±0,47)	#2
		Tourbière	11798	135,9 (±18,8)	1,60 (±0,22)	#3
		Tourbière	8953	136,7 (±18,9)	1,22 (±0,17)	#4
		Tourbière	10109	135,7 (±18,8)	1,37 (±0,19)	#5
		Peuplement forestier	178052	10,5	1,88	#6
D, E, F, G, P, U, X (sauf E06, E07 et G05)	Forêt boréale continue	Tourbière	73177	117,9 (±48,3)	8,63 (±3,53)	#2
		Tourbière	78634	103,8 (±14,4)	8,17 (±1,13)	#3
		Tourbière	67522	102,9 (±14,2)	6,95 (±0,96)	#4
		Tourbière	57822	106,3 (±14,7)	6,15 (±0,85)	#5
		Peuplement forestier	306440	12,0	3,68	#6
E06, E07, G05, H, I	Taïga	Tourbière	25646	126,2 (±52,2)	3,24 (±1,34)	#2
		Tourbière	13310	70,9 (±9,8)	0,94 (±0,13)	#3
		Tourbière	25646	68,3 (±9,5)	1,75 (±0,24)	#4
		Tourbière	8882	63,4 (±8,8)	0,56 (±0,08)	#5
		Peuplement forestier	178785	9,3 (±4,3)	1,67 (±0,77)	#7
K	Toundra forestière et arbustive, sauf provinces J et L	Tourbière	5951	126,2 (±52,2)	0,75 (±0,31)	#2
		Tourbière	3239	42,7 (±5,9)	0,14 (±0,02)	#3
		Tourbière	5951	46,6 (±6,5)	0,28 (±0,04)	#4
		Tourbière	3304	38,2 (±5,3)	0,13 (±0,02)	#5
		Peuplement forestier	46726	non disponible	non disponible	
A-X		Tourbière	113727	120,9 (±49,7)	13,75 (±5,65)	#2
		Tourbière	106981	101,4 (±14,0)	10,85 (±1,50)	#3
		Tourbière	108073	94,4 (±13,1)	10,20 (±1,41)	#4
		Tourbière	88620	93,6 (±13,0)	8,29 (±1,15)	#5
A-I, N, P, U, X		Peuplement forestier	663277	10,9	7,22	#6 & #7
A-X (tourbière); A-I, N, P, U, X (forêt)		Tourbière et peuplement forestier	771350	23,3	18,00	-