



Modélisation et évaluation intégrées de la
dynamique du carbone forestier
en Amérique du Nord

Outils de suivi des émissions de gaz à effet de serre
dans les forêts et de leur élimination, et de présentation
de rapports et de projection connexes



Citer comme suit :

W.A. Kurz, R.A. Birdsey, V.S. Mascorro, D. Greenberg, Z. Dai, M. Olguín et R. Colditz (2016), *Modélisation et évaluation intégrées de la dynamique du carbone forestier en Amérique du Nord : Outils de suivi des émissions de gaz à effet de serre dans les forêts et de leur élimination, et de présentation de rapports et de projection connexes* (rapport sommaire), Commission de coopération environnementale, Montréal, Canada, 24 p.

Le présent document a été rédigé par W.A. Kurz, R.A. Birdsey, V.S. Mascorro, D. Greenberg, Z. Dai, M. Olguín et R. Colditz, pour le compte du Secrétariat de la Commission de coopération environnementale (CCE). La responsabilité de l'information qu'il contient incombe aux auteurs, et cette information ne reflète pas nécessairement les vues de la CCE ni du gouvernement du Canada, du Mexique et des États-Unis.

Ce document peut être reproduit en tout ou en partie sans le consentement préalable du Secrétariat de la CCE, à condition que ce soit à des fins éducatives et non lucratives et que la source soit mentionnée. La CCE souhaiterait néanmoins recevoir un exemplaire de toute publication ou de tout écrit inspiré du présent document.

Sauf indication contraire, le contenu de cette publication est protégé en vertu d'une licence Creative Common : Paternité - Pas d'utilisation commerciale - Pas de modification.



Renseignements sur la publication

Type de publication : rapport de projet

Date de parution : février 2016

Langue d'origine : anglais

Processus d'examen et d'assurance de la qualité :

Examen final par les Parties : janvier 2016

QA250

Projet: Plan opérationnel 2013-2014/ Modélisation et évaluation intégrées de la dynamique du carbone forestier et des options d'atténuation des changements climatiques

Available in English – Disponible en español

Renseignements supplémentaires :



Commission de coopération environnementale

393, rue St-Jacques Ouest, bureau 200

Montréal (Québec)

H2Y 1N9 Canada

t 514.350.4300 – f 514.350.4314

info@cec.org / www.cec.org

Modélisation et évaluation intégrées de la
dynamique du carbone forestier
en Amérique du Nord

Outils de suivi des émissions de gaz à effet de serre
dans les forêts et de leur élimination, et de présentation
de rapports et de projection connexes

W.A. Kurz, R.A. Birdsey, V.S. Mascorro, D. Greenberg,
Z. Dai, M. Olguín et R. Colditz



Ressources naturelles
Canada

Natural Resources
Canada





Modélisation et évaluation intégrées de la dynamique du carbone forestier en Amérique du Nord

Outils de suivi des émissions de gaz à effet de serre dans les forêts et de leur élimination, et de présentation de rapports et de projection connexes



Dans le monde entier, les forêts constituent le plus important puits de carbone terrestre et, au cours des vingt dernières années, elles ont éliminé plus du quart des émissions planétaires imputables à la combustion des combustibles fossiles (Le Quéré et coll., 2015; Pan et coll., 2011a). On ne sait toujours pas quel rôle les forêts sont appelées à jouer dans le cycle du carbone, pas plus qu'on ne connaît l'impact potentiel de l'atténuation des changements climatiques par le secteur forestier (Friedlingstein et coll., 2006; IPCC, 2014a; Wieder et coll., 2015). Nous devons donc mieux comprendre les principaux catalyseurs de la dynamique du carbone forestier et leur évolution : perturbations d'origine humaine et naturelle, utilisation de terres et modification de celle-ci et changements climatiques et environnementaux (Birdsey et coll., 2013).

Alors que les pays essaient de s'acquitter de leurs engagements en ce qui concerne les objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES), les gouvernements cherchent à mieux comprendre comment les forêts et le secteur forestier peuvent contribuer à l'atténuation des changements climatiques. Ils y parviendront tout d'abord en quantifiant les actuels catalyseurs d'émissions et d'élimination, puis en définissant et en quantifiant les changements touchant les activités humaines qui réduisent les émissions ou multiplient les puits forestiers, par rapport à une période de base ou de référence (Lemprière et coll., 2013).

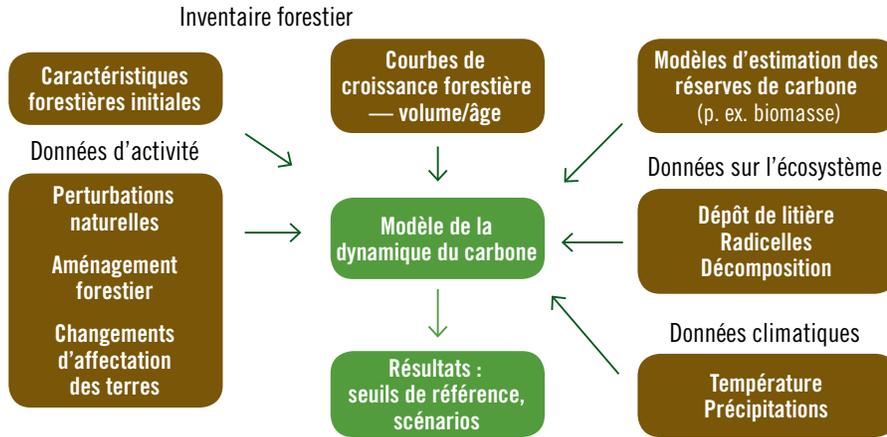
Ce projet a été mis en œuvre par les trois services nationaux des forêts nord-américaines, avec l'aide de la Commission de coopération environnementale (CCE) et d'autres promoteurs. La recherche concertée à l'échelle trilatérale a été menée par des experts provenant de plusieurs organismes et institutions des trois pays. Cette recherche contribue à l'élaboration de modèles scientifiques d'aide à la prise de décisions qui quantifient les impacts des autres options de gestion des forêts et des terres sur le bilan de carbone des forêts nord-américaines.

Le présent document d'information donne un aperçu de certaines des principales conclusions tirées du rapport technique. Les renseignements sur le contexte, les méthodes, les données et les outils utilisés dans le cadre de cette étude, de même que des résultats plus détaillés et des analyses, sont présentés dans un rapport exhaustif (Kurz et coll., 2016; disponible en anglais seulement à : www.ccc.org)

Les principes fondamentaux de la dynamique du carbone forestier s'appliquent à tous les types d'écosystèmes forestiers, mais les catalyseurs responsables et leurs impacts sur les sources et les puits de GES peuvent être très différents selon les diverses régions géographiques et au fil du temps. Les modèles scientifiques peuvent éclairer les politiques en quantifiant les impacts passés et futurs des activités humaines sur les émissions de GES et leur élimination, et en évaluant l'efficacité des stratégies d'atténuation des changements climatiques destinées à réduire les sources de GES ou à multiplier les puits.

Figure 1

Modèle de la dynamique du carbone : intégration de données de sources multiples, en utilisant comme exemple les données d'entrée requises pour le modèle MBC-SFC3



Ce projet avait pour objectif premier d'améliorer l'évaluation des émissions de GES par le secteur forestier, grâce à l'utilisation d'outils d'analyse qui intègrent les données issues des inventaires forestiers, des mesures des parcelles terrestres et des études portant sur de nombreux sites, aux mesures du carbone dans le sol et à la télédétection de la couverture terrestre et de son évolution avec le temps. Nous avons examiné à la fois les modèles empiriques et les modèles de processus, et élaboré des méthodes d'utilisation des nouveaux produits de télédétection, comme l'analyse à l'aide de séries chronologiques annuelles du changement de la couverture terrestre à une résolution de 30 mètres, afin d'intégrer des données spatiales spécifiques aux modèles qui évaluent les émissions annuelles de GES et leur élimination (figure 1). Nous présentons l'utilisation de tels modèles pour analyser les scénarios passés et futurs des émissions de GES. Enfin, nous donnons des exemples de la façon dont ces modèles peuvent étayer l'analyse des politiques d'atténuation visant à réduire les émissions de GES ou accroître leur élimination grâce à une modification de la gestion de forêts, et à une réduction de la dégradation et du déboisement.

Les méthodes d'évaluation des émissions nationales de GES et de leur élimination varient entre les trois pays nord-américains, en raison des différences en ce qui concerne la disponibilité des données, les outils et d'autres circonstances à l'échelle nationale. Même si les trois pays adoptent les méthodes définies par le Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat (GIEC), ce projet vise à harmoniser les différentes

approches scientifiques. Nous présentons l'utilisation des méthodes de niveau 3 du GIEC, qui s'appuient sur des modèles empiriques ou basés sur des processus afin d'intégrer les données provenant de diverses sources, et appliquent ces modèles aux trois régions sélectionnées : la péninsule du Yucatan (PY) au Mexique, la forêt nationale de Nez Perce–Clearwater (NP) dans l'Idaho, aux États-Unis, et la région de Prince George (PG), en Colombie-Britannique, au Canada (figure 2). Pour l'estimation des émissions de GES et de leur élimination, les deux méthodes de modélisation prouvent clairement l'importance des « données d'activité », c'est-à-dire de l'information relative aux régions touchées annuellement par les perturbations d'origine naturelle et humaine, incluant la modification des méthodes de récolte et d'utilisation des terres (en particulier le déboisement), définie comme la conversion des terres boisées à d'autres usages.

Figure 2

Régions choisies pour l'étude : péninsule du Yucatan (Mexique), forêt nationale de Nez Perce–Clearwater, Idaho (É.-U.) et région de Prince George, Colombie-Britannique (Canada)



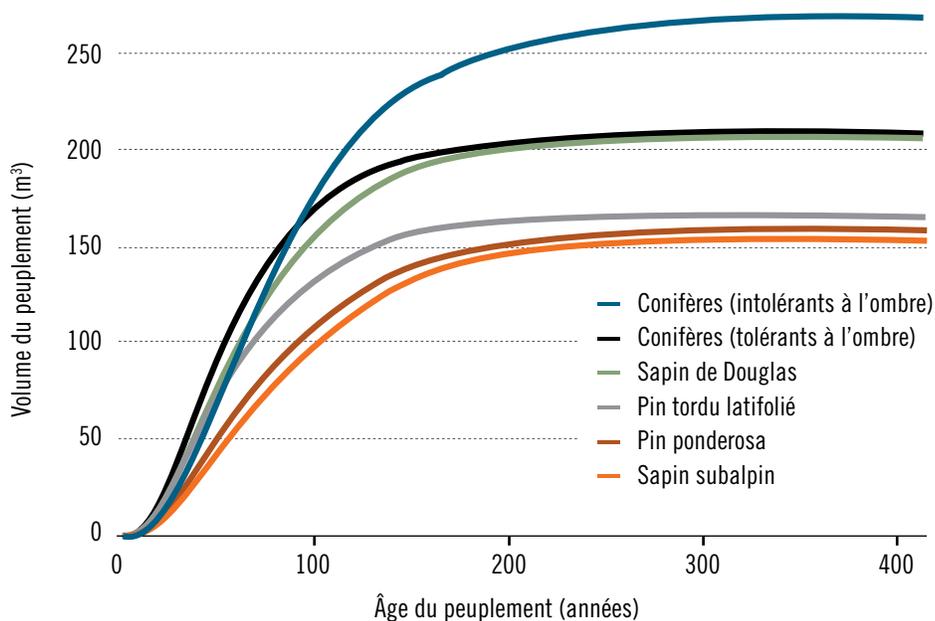
Nota : La zone en jaune représente l'ensemble de la péninsule du Yucatan et le rectangle bleu dans cette zone est l'aire d'étude, correspondant à la scène Landsat de trajectoire/ligne 20/46.

Dans le cadre de cette étude, nous avons principalement utilisé deux modèles de dynamique du carbone forestier en vue d'intégrer les données provenant de nombreuses sources différentes pour estimer le bilan des GES : Modèle du bilan de carbone du secteur forestier canadien (MBC-SFC3) et le modèle de dénitrification-décomposition des forêts (DNDC). Le modèle MBC-SFC3 s'appuie largement sur les mesures empiriques obtenues à partir des inventaires forestiers (afin de décrire la répartition initiale selon le type et l'âge des forêts), et sur la croissance et le rendement (afin de quantifier le taux de croissance des différents types de forêts) (figure 3). Le MBC-SFC3 utilise la modélisation des processus pour quantifier la dynamique du carbone dans la nécromasse (litière et bois mort) et les réservoirs de carbone dans le sol (Kurz et coll., 2009). Le modèle MBC-SFC3 peut fonctionner avec les données d'activité spatiales spécifiques (cartographiques) ou géo-référencées (tabulées). Il est conforme aux lignes directrices du GIEC, rend compte des cinq réservoirs de carbone exigés et présente des résultats incluant les transitions observées parmi les catégories d'utilisation des terres définies dans la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC). Le modèle fonctionne par pas de calcul annuels, et assez rapidement, ce qui permet une analyse efficace des nombreux scénarios prévus et l'examen des options d'atténuation. Ces scénarios permettent d'évaluer les impacts de l'évolution des taux de croissance et de décomposition, de la gestion des forêts et de l'utilisation des terres.

Les modèles de processus comme le DNDC simulent la croissance des forêts, ainsi que la dynamique de la nécromasse et du carbone dans le sol, en utilisant l'information relative à l'état des sols, des végétaux, du climat et de l'environnement (Li et coll., 2000; Stange et coll., 2000). Le modèle DNDC nécessite l'acquisition d'un très gros volume de données relatives à l'écosystème, aux essences d'arbres et aux sols pour cinq couches verticales,

Figure 3

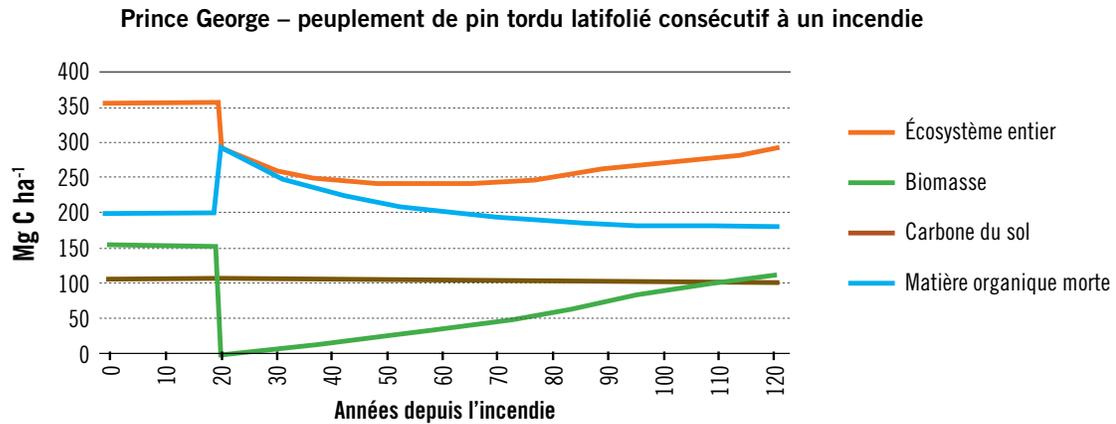
Courbes de croissance utilisées dans la simulation MBC-SFC 3 de la Forêt nationale de Nez Perce–Clearwater



Nota : MBC-SFC3 = Modèle du budget du carbone du secteur forestier canadien (version 3).

Figure 4

Exemples de dynamique du carbone pour des bassins de carbone différents après un incendie de forêt



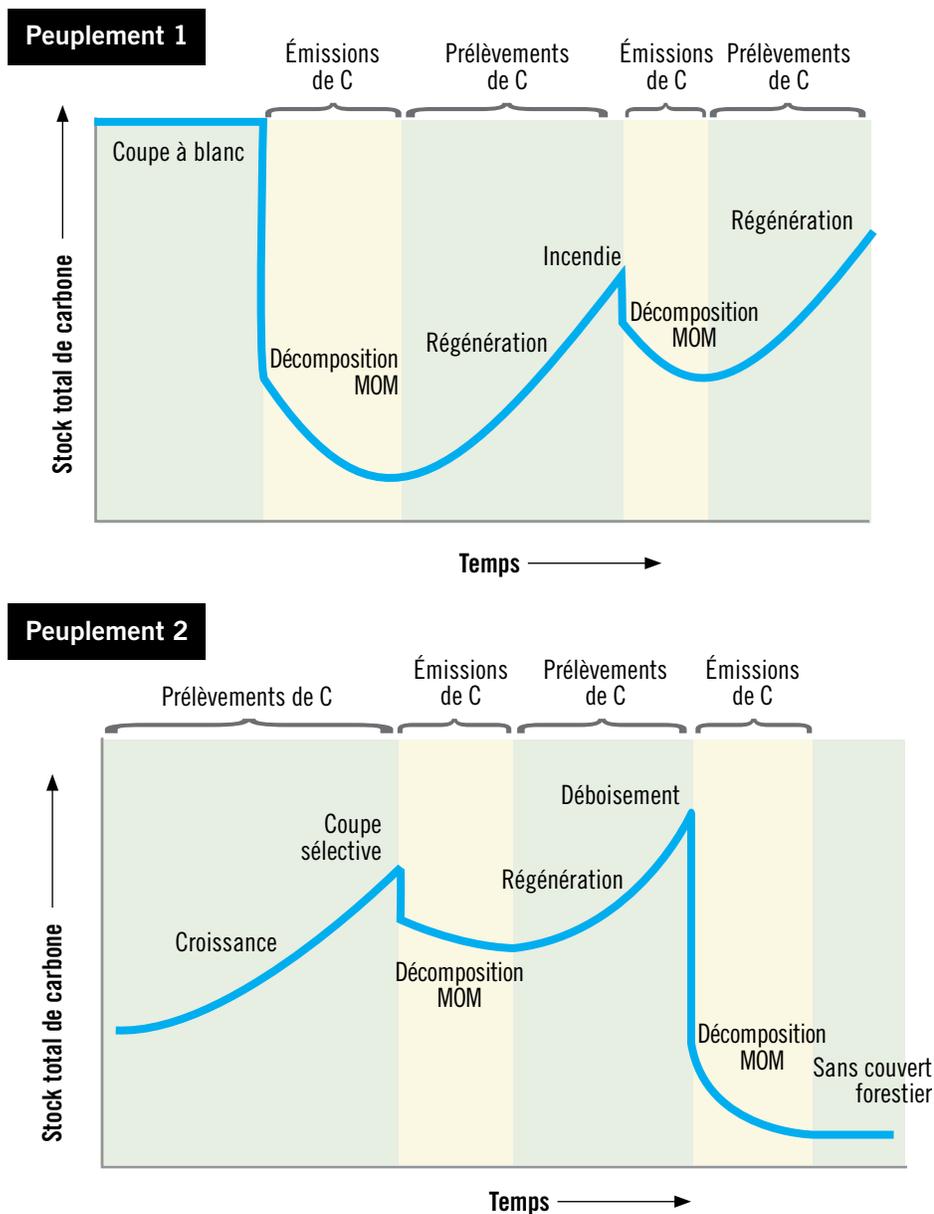
Nota : Mg C ha⁻¹ = mégagrammes de carbone par hectare.

ainsi que des données quotidiennes sur le climat. Parce qu'il fonctionne par étapes quotidiennes, chaque essai peut prendre de plusieurs jours à plusieurs semaines, selon la taille du paysage et la durée chronologique de la période d'analyse. Même s'il n'est pas pratique d'utiliser un tel modèle à une résolution spatiale élevée pour les grandes régions géographiques, nous démontrons ici que le principal point fort des modèles de processus, une fois étalonnés et validés, est leur capacité à générer des estimations des stocks de carbone de biomasse qui se rapprochent des valeurs observées, et qu'on peut les utiliser ensuite pour simuler les différents types de perturbations qui ont nui ou pourraient nuire aux stocks de carbone forestier. On peut également utiliser les modèles de processus axés sur des variables climatiques et environnementales (comme la concentration de CO₂ dans l'atmosphère) pour simuler la réponse des écosystèmes aux futurs changements climatiques, qui sont illustrés plus en détail dans le rapport technique de ce projet (Kurz et coll., 2016).

Pour pouvoir analyser les émissions de GES des écosystèmes forestiers, on a besoin d'information détaillée sur l'état initial du paysage, ce qui inclut l'étendue, le type et l'âge des écosystèmes forestiers (ou le temps écoulé depuis la dernière perturbation ayant renouvelé les peuplements). Les estimations empiriques de la croissance des peuplements après les perturbations sont tout aussi importantes, notamment la comptabilisation détaillée des changements dans les différents réservoirs de carbone (figure 4). Le suivi des différents réservoirs de carbone et des transferts entre eux est un élément essentiel pour l'estimation exacte des bilans passés et futurs du carbone forestier. Ces valeurs sont extrêmement variables selon la région géographique, le type de peuplement ainsi que le type et l'intensité des diverses perturbations (figure 5). Dans les forêts tropicales de la PY, le défi particulier tient au fait que ces forêts n'ont pas toutes le même âge et sont souvent dégradées en raison de perturbations récentes n'ayant pas renouvelé les peuplements, ces perturbations étant plus difficiles à déceler et à quantifier que celles qui renouvellent les peuplements. Dans le cadre de l'étude, il a été difficile de créer des cartes illustrant la répartition initiale des forêts par âge, parce qu'on avait du mal à déterminer, à partir de l'information issue des inventaires forestiers, si une parcelle peu riche en biomasse était une jeune forêt ou un peuplement plus ancien dégradé. Il faudra mener d'autres travaux afin d'améliorer l'information relative à l'état initial des forêts dans ces types de forêts complexes, notamment en ce qui a trait à la répartition initiale de la biomasse et aux taux de croissance connexes.

Figure 5

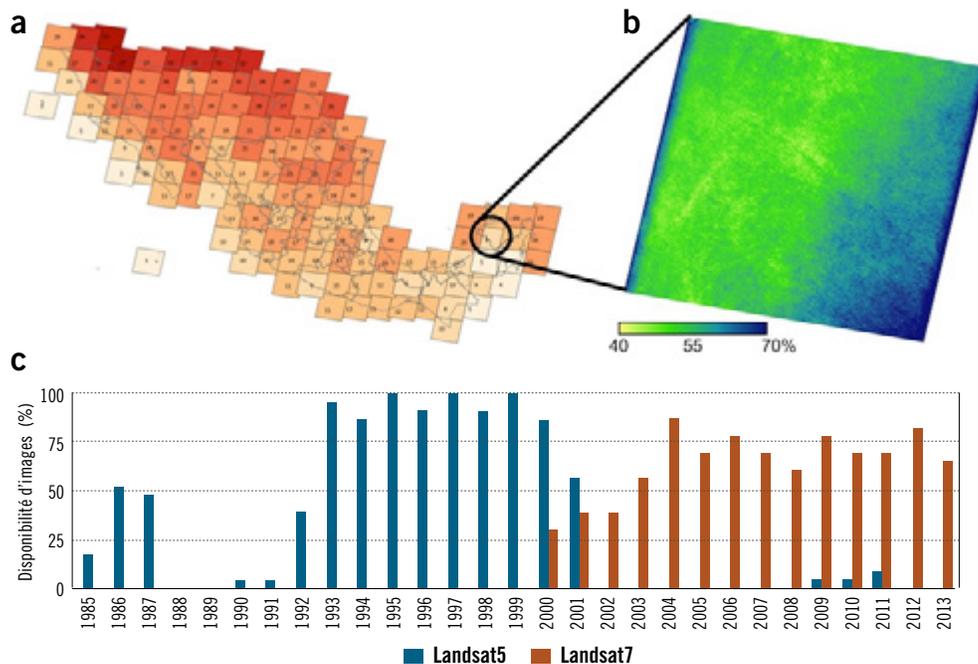
Exemples simplifiés de deux peuplements forestiers présentant une dynamique du carbone différente en raison de structures différentes de perturbation, de croissance et de décomposition de la matière organique morte (MOM)



Nota : Les différences dans les émissions et les prélèvements de GES en fonction du temps attribuables à des paramètres différents de perturbation, de croissance et de décomposition de la matière organique morte (MOM) peuvent être considérables. C = carbone.

Les perturbations d'origine naturelle et humaine sont les principaux catalyseurs des émissions annuelles de GES et de leur élimination dans la plupart des écosystèmes forestiers. Ainsi, les données sur les activités qui quantifient le rythme des perturbations d'origine naturelle et humaine sont importantes pour l'estimation des bilans de GES forestiers. Il existe de plus en plus de produits de télédétection qui décrivent la couverture terrestre à une résolution de 250 mètres ou de 30 mètres, ou plus élevée, en pas de calcul annuel (figure 6). On est en train d'élaborer des méthodes permettant de calculer le changement de la couverture terrestre annuelle grâce à ces produits (p. ex, en Saskatchewan, au Canada, voir Hermosilla et coll., 2015), à partir desquelles on peut tirer des données d'activité. Nous avons élaboré des méthodes et un outil (Recliner) afin d'utiliser ces produits de télédétection du changement annuel de la couverture terrestre pour l'élaboration de modèles de bilan de carbone, et nous les avons testés dans les trois paysages sélectionnés du Canada, du Mexique et des États-Unis.

Figure 6 Disponibilité d'images du Mexique en 2000, répartition des données invalides et disponibilité d'images pour la période 1985–2013



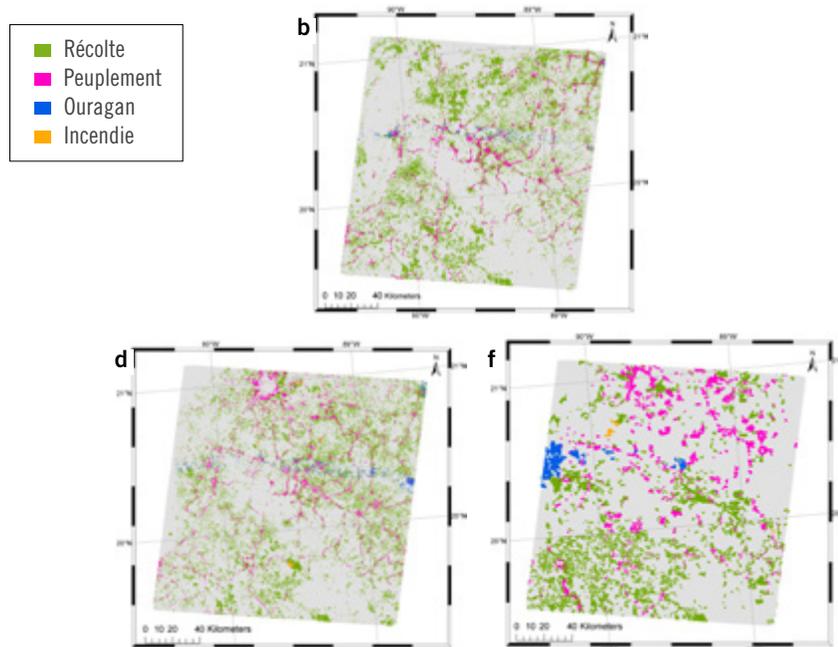
Nota : a) Disponibilité de données d'image Landsat TM/ETM+ du Mexique, avec une couverture nuageuse inférieure à 10 %, pour l'an 2000;
 b) répartition spatiale des données invalides selon FMASK, dans les images disponibles pour la trajectoire/ligne 020-046 (cercle noir), en pourcentage;
 c) disponibilité d'images Landsat 5 TM et ETM+ pour la trajectoire/ligne 020-046 entre 1985 et 2013.

Nous avons également utilisé le modèle MBC-SFC3 avec les données provenant d'une seule image Landsat de la PY pour évaluer les impacts sur les estimations des émissions de GES et de leur élimination de quatre produits de télédétection et de cartographie différents décrivant le changement annuel de la couverture terrestre – dans chaque cas, en attribuant et sans attribuer cette évolution à des types de perturbations précis (figure 7). À partir des huit essais de simulation spatiale spécifique effectués avec le modèle MBC-SFC3, nous avons conclu qu'il était possible de réduire les incertitudes associées aux estimations des émissions de GES :

- 1) en faisant passer la résolution spatiale des produits de télédétection de 250 à 30 mètres, parce qu'à une résolution plus élevée, nous pouvons détecter plus de perturbations touchant de petites parcelles, nombreuses dans la PY;
- 2) en faisant passer à un an la résolution temporelle des produits mesurant la couverture terrestre, parce que nous pouvons détecter un plus grand nombre des perturbations qui sont suivies d'une repousse rapide;
- 3) en attribuant le changement de la couverture terrestre au type de perturbation, parce que cela améliore l'estimation de l'impact des perturbations sur les émissions de GES, incluant, en cas d'incendie, les émissions autres que le dioxyde de carbone (CO₂), par exemple de méthane (CH₄) et de dioxyde d'azote (N₂O), dont le potentiel de réchauffement planétaire est nettement plus élevé que celui du CO₂.

Figure 7

Cartes des changements de la couverture terrestre provenant de produits de télédétection différents



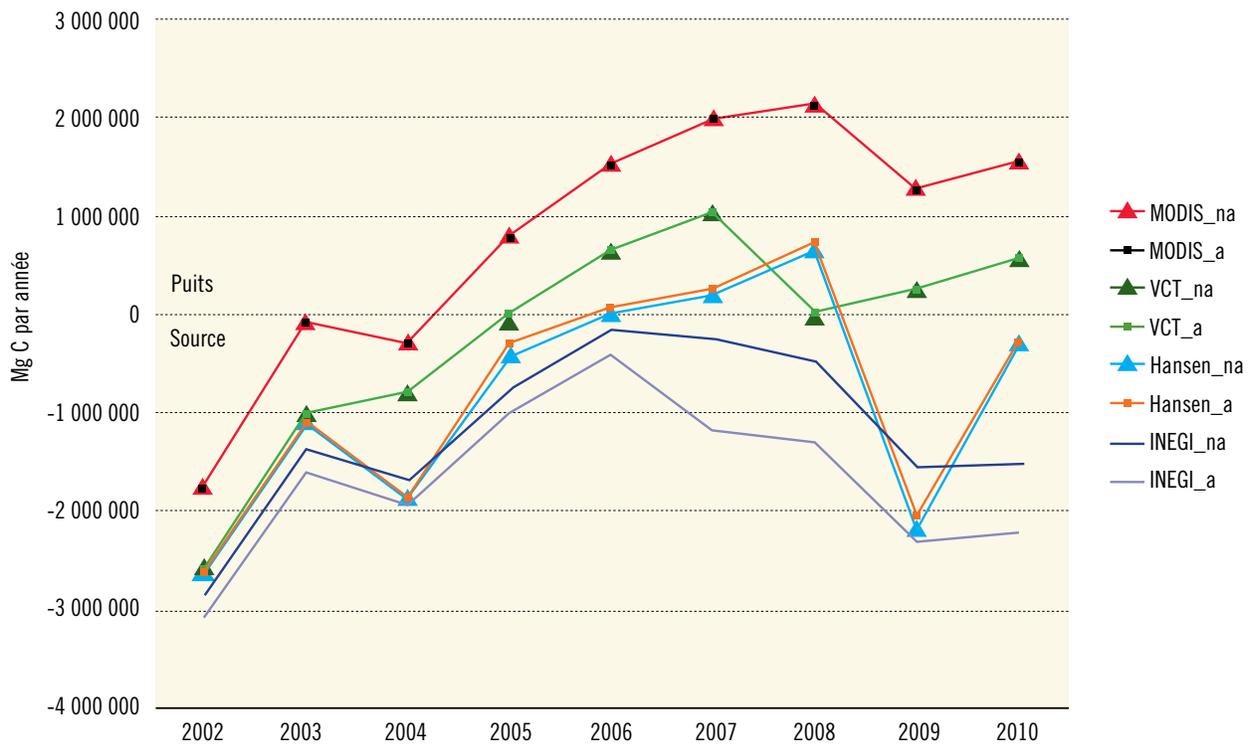
Nota : Carte b : carte d'algorithme de détection des changements dans la végétation (VCT);
 carte d : carte d'algorithme de Hansen;
 carte f : carte de l'Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).

Source : Mascorro et coll., 2016.

Le large éventail des estimations des émissions de GES obtenues à l'aide de huit produits de mesure du changement de la couverture terrestre révèle que les efforts visant à améliorer la précision de ces produits (notamment en identifiant les types de perturbations) peuvent générer une forte réduction de l'incertitude des estimations régionales ou nationales des émissions de GES (figure 8).

Figure 8

Flux de carbone annuels dans la péninsule du Yucatan, 2002–2010, estimés au moyen de différentes sources de données d'activité



Nota : Mg C = mégagrammes de carbone; a = attribués; na = non attribués; MODIS = spectroradiomètre imageur à résolution moyenne (NASA, États-Unis); VCT = algorithme de détection des changements dans la végétation; INEGI = Instituto Nacional de Estadística y Geografía.

Source : Mascorro, 2014.

L'étude a également permis d'examiner l'incidence du choix du moment où s'effectuait la télédétection (saison sèche ou haute saison de croissance) et du choix des algorithmes de détection des changements sur la précision des produits de mesure du changement de la couverture terrestre. Nous avons mis à l'essai un algorithme de détection des changements (Vegetation Change Tracker, VCT) (Huang et coll., 2010) qui est largement utilisé et a fait ses preuves dans les écosystèmes forestiers tempérés. Malheureusement, en raison de la couverture nuageuse et en l'absence d'imagerie appropriée, il n'a pas pu détecter des perturbations importantes, notamment au cours de l'année 2009 de la période de simulation, alors que l'algorithme de Hansen et coll. (Hansen et coll., 2013), qui utilise tous les pixels disponibles sans égard pour les nuages, a pu détecter ces perturbations. Les résultats ont aussi montré que la série chronologique des changements dans la couverture terrestre obtenue au moyen du spectroradiomètre imageur à résolution moyenne (MODIS) de la NASA rendait compte d'un nombre considérablement moindre de perturbations que les trois autres méthodes mises à l'essai, lesquelles faisaient toutes appel à une imagerie Landsat à plus grande résolution. L'amélioration des méthodes améliorées de télédétection des perturbations observées dans les régions constamment nuageuses est un thème prioritaire de recherche au Mexique.

Nous avons examiné les impacts sur les estimations d'émissions de GES et les choix entre les données spatiales spécifiques et les données géo-référencées relatives aux activités. Les approches spatiales spécifiques (méthode 2 de présentation de rapports du GIEC, GIEC, 2003, 2006) déterminent l'emplacement de chaque polygone (ou pixel) d'un paysage. Par contre, les approches géo-référencées (méthode 1 de présentation de rapports du GIEC, *ibid.*) déterminent les limites géographiques des zones terrestres (par exemple, les unités de gestion) auxquelles font référence toutes les données. On peut donc savoir qu'une unité spatiale contient X hectares (ha) d'un type de forêt particulier, mais l'on ne connaît pas le ou les emplacements exacts du type de forêt au sein de cette unité spatiale. Lorsque des données géo-référencées sont saisies (par exemple, à propos du taux de collecte de bois de chauffage ou d'autres activités) mais ne sont pas systématiquement cartographiées, il faut recueillir des renseignements fondés sur des règles pour attribuer à ces activités le polygone ou le pixel approprié.

Les modèles de processus comme le DNDC ne permettent pas pour l'instant d'utiliser des données géo-référencées, et le modèle MBC-SFC3 se limite à utiliser des sources de données géo-référencées ou de données spatiales spécifiques — il ne peut pas combiner les deux types de données en une seule simulation. Les approches axées sur les données géo-référencées réduisent considérablement le volume de données saisies, et facilitent l'analyse des futurs scénarios, car elles ne nécessitent pas de prévisions spatiales spécifiques de l'emplacement des futures perturbations/activités humaines comme le déboisement.



Service canadien des forêts de Ressources naturelles Canada



Nous avons évalué les différences entre les estimations d'émissions de GES dérivées des simulations géo-référencées et spatiales spécifiques. Nous avons comparé les estimations cumulatives d'émissions de GES (obtenues à partir d'une seule simulation spatiale spécifique) avec plusieurs ensembles de 400 simulations géo-référencées, pour la forêt de NP dans l'Idaho. Le degré d'incertitude relatif aux estimations d'émissions de GES baissait avec l'augmentation des contraintes liées à l'admissibilité des peuplements forestiers à la sélection, pour chaque type de perturbation. Par contre, la multiplication des règles strictes a fait augmenter le nombre de peuplements qui subissaient des perturbations répétées. Dans le cadre des simulations géo-référencées, ces perturbations ont créé un biais dans les estimations comparées aux simulations spatiales spécifiques, parce que les émissions résultant des deuxièmes perturbations et des perturbations subséquentes touchant les mêmes peuplements sont plus faibles. En ajoutant une règle prévenant les perturbations répétées dans le cadre des simulations géo-référencées, nous avons réduit ce biais, mais cela a changé le signe du biais, parce qu'en réalité, on a observé peu de perturbations répétées lors des simulations spatiales spécifiques. Ainsi, les ensembles de règles qu'on utilise pour intégrer les données géo-référencées aux simulations des estimations d'émissions de GES doivent tenir compte à la fois de l'admissibilité des peuplements et du nombre de perturbations répétées touchant les mêmes peuplements. L'étude a démontré qu'avec un ensemble de règles appropriées, on pouvait utiliser les données géo-référencées relatives aux activités avec le modèle MBC-SFC3 pour quantifier les émissions de GES passées et les estimations d'élimination, et simuler les scénarios de gestion des forêts et de modification de l'utilisation des terres.

Nous avons utilisé le modèle de processus DNDC pour estimer l'impact des différents types de perturbations sur les divers réservoirs de carbone. Après avoir étalonné et validé le modèle DNDC à l'aide de données indépendantes issues des observations sur le terrain, nous avons simulé les effets d'un incendie, d'un ouragan, d'une récolte et de la combinaison de ces perturbations (figure 9). Dans chaque site, ces perturbations ont généré la perte d'une grande partie du carbone stocké immédiatement après l'événement, après quoi les stocks ont rapidement commencé à se reconstituer. Dans la PY, l'ouragan de catégorie 4 simulé (violent) a causé une perte importante d'environ 86 % de la biomasse vivante – on suppose que 70 % sera sauvée et que le reste s'ajoutera aux débris de bois et aux réservoirs de carbone dans le sol. La biomasse ajoutée aux réservoirs de nécromasse s'est décomposée rapidement en raison du climat tropical de la PY. Les perturbations touchant les forêts tempérées et boréales ont par ailleurs des effets très marqués qui subsistent pendant des dizaines d'années. Pour la forêt de NP, les récoltes effectuées entre 1991 et 2011 ont éliminé environ 763,5 Gg C de la biomasse de surface; par contre, d'autres perturbations ont causé la disparition d'un plus grand nombre d'arbres vivants que la récolte effectuée durant la même période — environ 4 131 Gg C de biomasse vivante de surface a disparu en raison des incendies

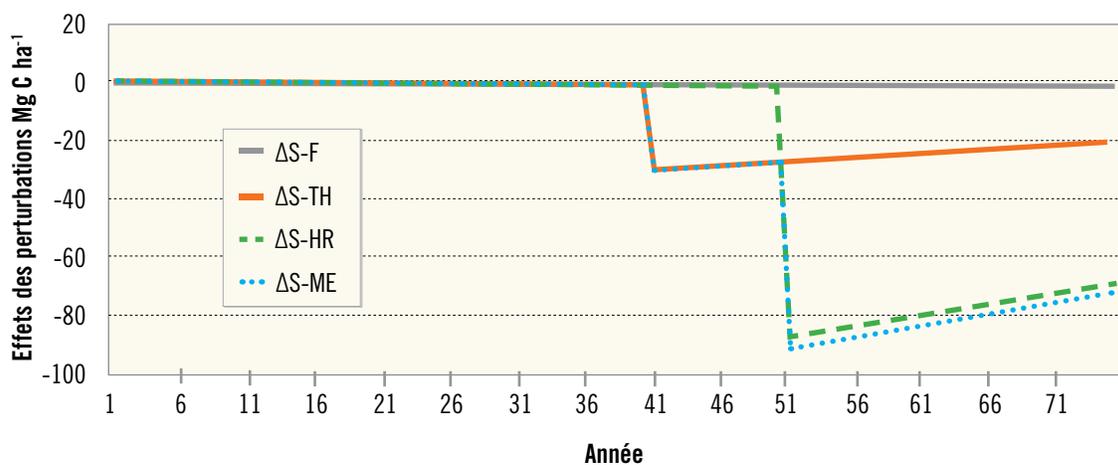
et des insectes, et la majeure partie de la biomasse vivante a été transférée aux réserves de bois mort. Par ailleurs, ces perturbations ont laissé une grande quantité de racines mortes dans le sol des forêts, ce qui a fait augmenter le flux de CO₂ dans le sol, en raison de la décomposition (respiration hétérotrophe). Les incendies ont entraîné d'importantes pertes de carbone de litière (plus de 10 Mg C ha⁻¹) lorsqu'ils ont touché le couvert forestier.

Nous avons également utilisé le modèle DNDC pour simuler les effets attendus de certains changements climatiques et de l'augmentation de la concentration de CO₂ dans l'atmosphère, qui pourraient nuire à la productivité des forêts et avoir une forte incidence sur l'évolution prévue des stocks de carbone. Dans la PY, nous avons observé un lien étroit entre, d'une part, les stocks de biomasse, et d'autre part, la température et les précipitations. En tenant compte de la variabilité climatique observée au cours des 33 dernières années (1981–2013), le modèle DNDC a prévu que la quantité de carbone stockée dans les forêts humides pourrait augmenter avec l'augmentation des températures dans la PY. Toutefois, la quantité de carbone de la biomasse stockée dans les forêts sèches pourrait diminuer avec la baisse des températures. La quantité de carbone de la biomasse pourrait augmenter fortement en cas d'augmentation des précipitations dans les forêts humides, mais beaucoup moins dans les forêts sèches. Dans la forêt de NP, le modèle DNDC a révélé que la biomasse augmentait avec l'augmentation des températures et diminuait avec l'augmentation des précipitations, même si ces liens n'étaient pas toujours les mêmes selon le type de forêt.

En utilisant le modèle MBC-SFC3 dans le cadre d'une approche géo-référencée, nous avons analysé le bilan de carbone passé et prévu pour l'ensemble de la PY, stratifié en six unités spatiales. Nous avons utilisé le cadre spatial qui a été élaboré pour les analyses effectuées au Mexique à l'échelle nationale (94 unités spatiales) et

Figure 9

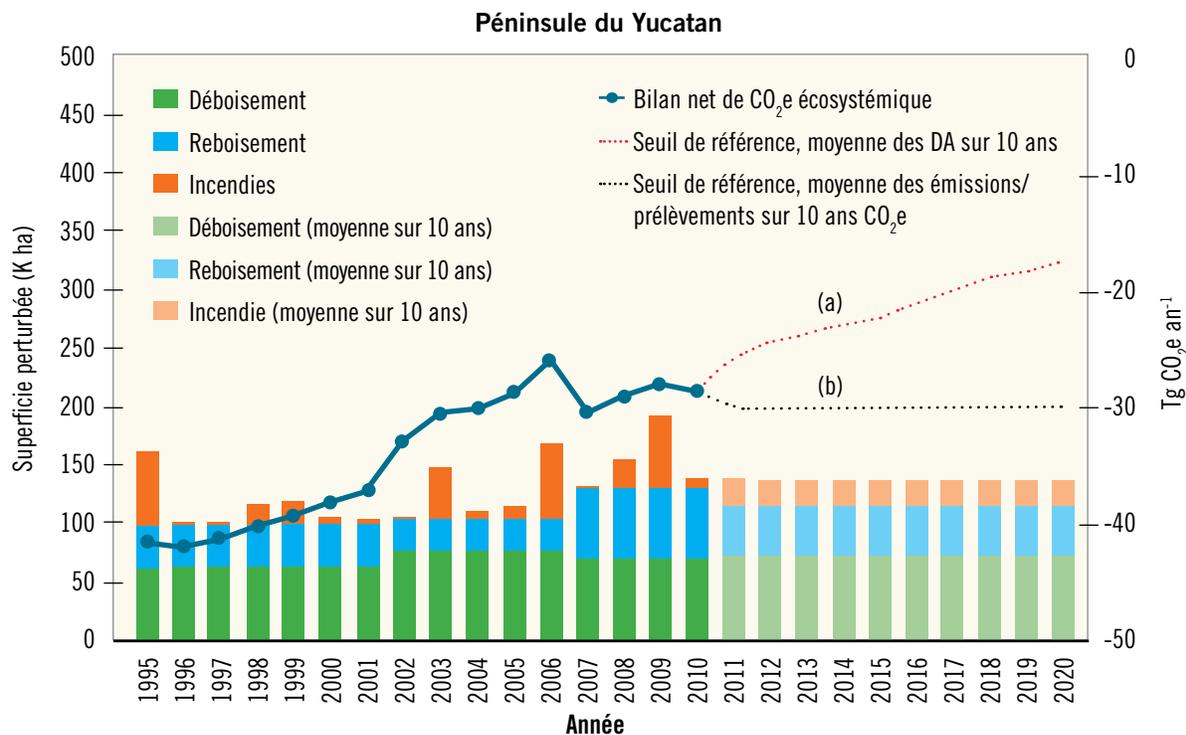
Effets de scénarios de feu de profondeur à faible intensité, d'éclaircissage, d'ouragan et de perturbations multiples plus réchauffement, sur les stocks de carbone de la biomasse dans la forêt semi-sèche de la péninsule du Yucatan, comparativement au scénario de référence



Nota : Mg C ha⁻¹ = mégagrammes de carbone par hectare; Δ = différence dans les stocks de carbone entre le scénario de référence et le scénario; S-F = scénario d'incendie; S-TH = scénario d'éclaircissement; S-HR = scénario d'ouragan; S-ME = scénario de perturbations (effets) multiples, plus le réchauffement. Il est à noter que le feu de profondeur à l'année 30 du scénario S-F n'avait qu'un effet négligeable sur les stocks de carbone de l'écosystème.

Figure 10

Superficie annualisée de la péninsule du Yucatan affectée, selon les changements d'affectation des terres forestières et les épisodes d'incendie annuels, 1995–2010, et émissions nettes estimées de CO₂e



Nota : CO₂e = équivalents de dioxyde de carbone; K ha = milliers d'hectares; Tg = téragrammes. Le flux négatif dénote un prélèvement dans l'atmosphère, c.-à-d. un puits. Renseignements historiques : (a) moyenne des données d'activité (DA) sur 10 ans; (b) moyenne sur 10 ans des émissions de gaz à effet de serre (GES) par rapport à leurs prélèvements.

Source : Tiré de Olguín et coll., 2015, avec modifications.

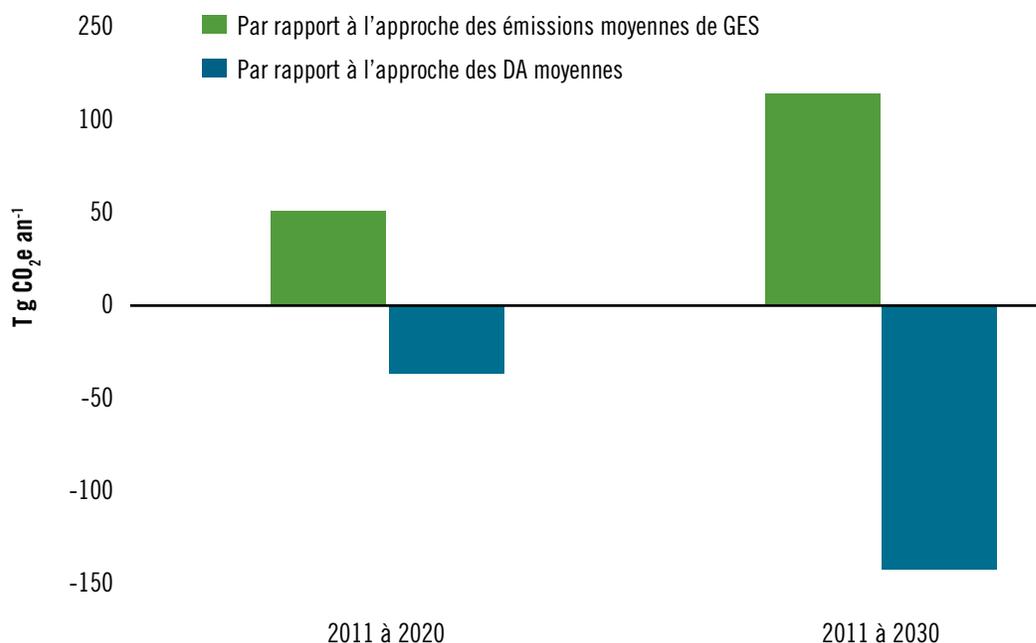
simulé six unités spatiales dans la PY, qui résultent de l'intersection des frontières de trois États et de deux écorégions (Niveau 1, CCE, 1997). Nous avons évalué les données annuelles sur les activités issues des matrices de modification de l'utilisation des terres, que nous avons obtenues en comparant les cartes de la couverture terrestres pour les périodes 1993–2002, 2002–2007 et 2007–2011. Nous avons estimé la contribution des perturbations (incendies) et du changement d'utilisation des terres au bilan de GES pour l'ensemble de la PY. Les résultats ont révélé : qu'un petit puits annuel de carbone diminuait avec le temps, à mesure que la superficie totale de la forêt diminuait en raison du déboisement net; que le taux de croissance des forêts restantes diminuait avec l'âge; que les émissions par hectare déboisé augmentaient avec l'âge des forêts (figure 10). Nous avons par ailleurs documenté la contribution des trois principales catégories d'utilisation des terres au bilan global de GES de la péninsule. Nous avons estimé les flux moyens de GES de 2001 à 2010 : terres forestières demeurant des terres forestières (puits important; -52 Tg CO₂e an⁻¹); terres forestières converties en autres types de terre (source modérée; 27 Tg CO₂e an⁻¹); autres terres converties en terres forestières (petit puits; -8 Tg CO₂e an⁻¹). Toutefois, il est probable que le bilan global de GES de la péninsule sera proche de zéro quand on inclura à l'analyse d'autres perturbations plus complexes, à plus petite échelle (p. ex., la dégradation) (Olguín et coll., 2015).

Les futurs efforts d'atténuation, incluant la réduction des émissions imputables aux activités de REDD+ (réduction des émissions causée par le déboisement et la dégradation des forêts [et la gestion durable des forêts]), sont évalués par rapport à un niveau de référence ou de base. Nous avons évalué deux méthodes possibles de définition d'un tel niveau de base : les émissions moyennes produites ces dix dernières années ou les émissions résultant des activités moyennes menées ces dix dernières années. Nous avons démontré que les résultats différaient grandement. Dans le cadre de la première approche, on suppose que le puits annuel demeure le même, alors qu'en réalité (comme l'indique la deuxième approche), le puits diminue à mesure que le déboisement cumulatif réduit la superficie des forêts et, du fait même, la capacité de toute la zone à absorber le CO₂ atmosphérique.

Nous avons également démontré comment utiliser le modèle MBC-SFC3 pour estimer l'évolution des émissions résultant du changement futur des taux de déboisement dans la PY. On estime que le taux de déboisement annuel a été d'environ 0,6 % an⁻¹ de 2001 à 2010; nous avons simulé un deuxième scénario supposant que ce taux baisserait de 2,5 % an⁻¹. Nous avons estimé que, par rapport au niveau REDD+ de base défini en fonction des données sur les activités moyennes, les émissions nettes de GES imputables au déboisement pourraient être réduites de 16 % d'ici 2020 si l'on réduisait le taux de déboisement brut de 25 % en 2020, ou elles pourraient être réduites de 41 % en 2030 si l'on pouvait réduire de moitié le déboisement en 2030 (figure 11). Il est important de noter que le choix du niveau REDD+ de base défini par les émissions moyennes passées ferait augmenter les émissions calculées (par rapport au niveau de base), même si le taux de déboisement diminue.

Figure 11

Exemple de réduction cumulative des émissions de GES due à une diminution des taux annuels de déboisement de 2,5 % (du taux initial) par année, par rapport aux deux scénarios de référence : de 2011 à 2020 et de 2011 à 2030



Nota : GES = gaz à effet de serre; DA = données d'activité; Tg CO₂e an⁻¹ = térogrammes d'équivalents de dioxyde de carbone par année. Par rapport à un scénario de référence basé sur l'approche des émissions moyennes de GES, les émissions comptabilisées augmenteraient en dépit de la réduction des taux de déboisement.



US Forest Service

Nous avons comparé certains résultats générés par les diverses méthodes de modélisation aux ensembles de données existants, afin de mieux comprendre l'écosystème et ses réponses aux perturbations, et de mettre en lumière certaines incertitudes relatives à la façon dont les forêts réagiront à l'avenir aux facteurs anthropiques ou naturels. En pratique, les modèles empiriques permettent tout à fait : de représenter l'évolution des stocks de carbone des différents réservoirs imputable aux impacts des activités de gestion, des incendies, des insectes et du changement d'utilisation des terres; de quantifier l'incertitude associée à la mesure directe des réservoirs de carbone; de valider les estimations indépendantes issues des modèles de processus. Les modèles de processus sont plus utiles pour simuler la réponse des écosystèmes forestiers aux changements climatiques ou à la concentration de CO₂ dans l'atmosphère, et l'on peut les utiliser pour faire des estimations ou des projections en dehors des limites spatiales et temporelles des données utilisées pour faire du paramétrage. Il est important de valider les modèles à l'aide d'ensemble de données indépendants avant d'essayer d'utiliser ces modèles sans les données de paramétrage.

En comparant les résultats des deux modèles, nous avons constaté qu'il fallait parfois posséder d'excellentes compétences analytiques pour utiliser les modèles empiriques et les modèles de processus, parce que ces deux catégories de modèles nécessitent habituellement de nombreux efforts pour acquérir et gérer les données à saisir — lesquelles ne sont pas toujours facilement accessibles, représentatives de la région ou du type de forêt d'intérêt ou adaptées au modèle. En règle générale, les modèles empiriques sont plus faciles à comprendre, tandis que les modèles de processus font une présentation détaillée des mécanismes et de leur réponse aux catalyseurs environnementaux, que la personne responsable du modèle devrait bien comprendre. Il est extrêmement difficile de comparer les modèles. Les différents modèles nécessitent des données différentes, peuvent utiliser ou non des données spécifiques, peuvent inclure une présentation des catalyseurs environnementaux et peuvent utiliser diverses définitions des variables. Les estimations des variables clés, comme la production primaire nette (PPN), la production nette de l'écosystème (PNE) et la production nette du biome (PNB) sont très différentes d'une méthode de modélisation à l'autre, pour des raisons difficiles à interpréter. Il faut beaucoup de temps pour faire le tri de ces différences; or cette tâche n'entrait pas dans le cadre du présent projet.



US Forest Service

Nous avons conclu que les modèles de niveau 3 sont des outils à la fois très efficaces et flexibles permettant d'intégrer les données qui proviennent de nombreuses sources. Ils peuvent générer des données permettant de faire des estimations régionales et nationales des émissions de GES et de leur élimination dans le secteur forestier : on utilise le modèle MBC-SFC3 depuis 2006 pour générer les données à intégrer à l'inventaire national des émissions de GES du Canada (Stinson et coll., 2011; Environnement Canada, 2015), ainsi que pour estimer les niveaux d'émissions de référence en vue de permettre au Mexique de les soumettre à l'*Emission Reductions Program Idea Note*, (Programme de réduction des émissions) du Fonds de partenariat pour le carbone forestier (FCPF, 2013). Nous avons aussi établi la capacité des modèles de processus à améliorer l'analyse des résultats et à valider ceux-ci, et à estimer la réponse des écosystèmes aux changements climatiques.

Les résultats de la présente étude contribuent à l'objectif visé : améliorer la conception et l'évaluation des activités d'atténuation des changements climatiques en vue de mener des activités de gestion durable et de REDD+ dans le secteur forestier et pour le changement d'utilisation des terres en Amérique du Nord. L'étude a révélé certains problèmes et certaines possibilités en ce qui concerne la disponibilité des données et les applications de modélisation susceptibles d'améliorer les résultats, et les enseignements ainsi tirés permettront de mieux guider les travaux additionnels en vue d'optimiser l'évaluation des gaz à effet de serre dans le secteur forestier à des échelles différentes. Les futurs travaux financés par la CCE mettront l'accent sur l'utilisation de ces outils pour l'analyse des options d'atténuation des changements climatiques dans le secteur forestier, dans les paysages représentatifs de l'Amérique du Nord. Pour analyser ces options d'atténuation, il faudra développer d'autres capacités d'analyse et recueillir des données complémentaires, parce que de telles analyses nécessitent une évaluation des changements touchant les stocks de carbone forestier, les stocks de carbone dans les produits ligneux récoltés, et les émissions d'autres secteurs imputables à des produits qui génèrent de nombreuses émissions, comme le béton, l'acier et le plastique associés aux produits ligneux récoltés (Lemprière et coll., 2013), comme l'ont démontré des analyses de portée nationale au Canada (Smyth et coll., 2014). Par ailleurs, nous poursuivrons nos travaux d'élaboration et de mise à l'essai de méthodes visant à améliorer les produits de télédétection du changement de la couverture terrestre, et l'intégration de ces produits aux modèles d'estimation des émissions de GES et de leur élimination.

Remerciements

La réalisation de ce projet avec succès est le fruit de la collaboration de nombreux experts dans des institutions clés au Canada, au Mexique et aux États-Unis. Nous remercions la Commission de coopération environnementale (CCE) pour les fonds qu'elle a affectés à ce projet et pour son aide en matière d'administration, de coordination et d'organisation du travail; Karen Richardson, Itzia Sandoval et Sarah Heiberg nous ont prêté une précieuse assistance.

Nous remercions les services des forêts des trois pays nord-américains — la *Comisión Nacional Forestal* (Conafor) du Mexique, le Service canadien des forêts et le *US Forest Service* — pour le soutien en nature dispensé au projet et nous remercions les organismes de télédétection et les autres organismes gouvernementaux, dont la *Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad* (Conabio), le Centre canadien de cartographie et d'observation de la Terre, le *United States Geological Survey* et la *US National Aeronautics and Space Administration*. De nombreux autres programmes et établissements ont contribué à nos travaux. Au Mexique, nous savons gré au projet de renforcement de la REDD+ et de la collaboration Sud-Sud de la Conafor, ainsi qu'au *Colegio de Postgraduados*, de leur collaboration et de leur soutien. Aux États-Unis, nous sommes reconnaissants de l'important apport de fonds de l'*Agency for International Development*, du *US Forest Service International Program Office* et du programme SilvaCarbon, qui ont tous soutenu la participation de scientifiques et de techniciens rattachés aux organismes et institutions des États-Unis et du Mexique.

Nous sommes également reconnaissants de l'apport des personnes suivantes :

Graham Stinson, Sally Tinis, Dennis Paradine et Don Leckie (Service canadien des forêts) ont élaboré les ensembles de données sur les changements de la couverture terrestre qui ont permis la modélisation de la région de Prince George au Canada. Alexa Dugan (*US Forest Service*) a fourni des ensembles de données, des renseignements sur les forêts des États-Unis et les résultats du modèle de procédé pour la forêt américaine utilisée dans l'étude de cas. Craig Wayson (*US Forest Service*) a fourni un soutien pour l'élaboration des données d'activité et l'estimation des répercussions des activités sur le carbone forestier. Shannon Franks et Jeff Masek (NASA) ont fourni les données sur les perturbations de la couverture forestière au Mexique. Gregorio Ángeles-Pérez (*Colegio de Postgraduados*) a contribué à l'estimation des répercussions de différentes activités sur le carbone forestier.



Ressources naturelles
Canada

Natural Resources
Canada



Bibliographie

- Birdsey, Richard, Gregorio Angeles-perez, Werner A Kurz, Andrew Lister, Marcela Olguin, Yude Pan, Craig Wayson, Barry Wilson et Kristofer Johnson. 2013. « Approaches to Monitoring Changes in Carbon Stocks for REDD + ». *Carbon Management* 4(5) : 519–537. doi : 10.4155/cmt.13.49.
- Environnement Canada. 2015. « Rapport d'inventaire national 1990-2013 : Sources et puits de gaz à effet de serre au Canada ». *La proposition canadienne concernant la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques*.
- FCPF. 2013. « Emission Reductions Program Idea Note (ER-PIN) ». Fonds carbone du Forest Carbon Partnership Facility (FCPF, Fonds de partenariat pour la réduction des émissions dues à la déforestation).
- Friedlingstein, P., P. Cox, R. Betts, L. Bopp, W. von Bloh, V. Brovkin, P. Cadule et coll. 2006. « Climate–Carbon Cycle Feedback Analysis: Results from the C 4 MIP Model Intercomparison ». *Journal of Climate* 19 (14) : 3337–3353. doi :10.1175/JCLI3800.1.
- GIEC. 2014. *2013 Revised Supplementary Methods and Good Practice Guidance Arising from the Kyoto Protocol* (Méthodes supplémentaires révisées et pratiques recommandées découlant du Protocole de Kyoto; disponible en anglais). Dir. publ. : Hiraishi, T., T. Krug, K. Tanabe, N. Srivastava, J. Baasansuren, M. Fukuda et T. Troxler. Suisse : Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC).
- Hansen, M.C., P.V. Potapov, R. Moore, M. Hancher, S. Turubanova, A. Tyukavina, D. Thau et coll. 2013. « High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change ». *Science* 342 (6160) : 850–853. (New York, N.Y.). doi :10.1126/science.1244693.
- Hermosilla, T., M.A. Wulder, J.C. White, N.C. Coops et G.W. Hobart. 2015. « An integrated Landsat time series protocol for change detection and generation of annual gap-free surface reflectance composites ». *Remote Sensing of Environment* 158 : 220–234. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2014.11.005>.
- Huang, Chengquan, Samuel N. Goward, Jeffrey G. Masek, Nancy Thomas, Zhiliang Zhu et James E. Vogelmann. 2010. « An Automated Approach for Reconstructing Recent Forest Disturbance History Using Dense Landsat Time Series Stacks ». *Remote Sensing of Environment* 114 (1) : 183–198. Elsevier Inc. doi :10.1016/j.rse.2009.08.017.
- Kurz, W.A., C.C. Dymond, T.M. White, G. Stinson, C.H. Shaw, G.J. Rampley, C. Smyth et coll. 2009. « CBM-CFS3: A Model of Carbon-Dynamics in Forestry and Land-Use Change Implementing IPCC Standards ». *Ecological Modelling* 220 (4) : 480–504. doi :10.1016/j.ecolmodel.2008.10.018.
- Kurz, W.A., R.A. Birdsey, V.S. Mascorro, D. Greenberg, Z. Dai, M. Olguin et R. Colditz. 2016. *Integrated Modeling and Assessment of North American Forest Carbon Dynamics: Tools for monitoring, reporting and projecting forest greenhouse gas emissions and removals*. Commission de coopération environnementale, Montréal.
- Le Quéré, C., R. Moriarty, R.M. Andrew, G.P. Peters, P. Ciais, P. Friedlingstein, S.D. Jones et coll. 2015. « Global Carbon Budget 2014 ». *Earth System Science Data* 7(1). Copernicus GmbH : 47–85. doi :10.5194/essd-7-47-2015.

- Lemprière, T.C., W.A. Kurz, E.H. Hogg, C. Schmoll, G.J. Rampley, D. Yemshanov, D.W. McKenney et coll. 2013. « Canadian Boreal Forests and Climate Change Mitigation 1 ». *Environmental Reviews* 21 (4) : 293–321. doi :10.1139/er-2013-0039.
- Li, C., J. Aber, F. Stange, K. Butterbach-Bahl et H. Papen. 2000. « A Process-Oriented Model of N₂O and NO Emissions from Forest Soils: 1. Model Development ». *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 105 (D4) : 4369–4384. doi :10.1029/1999JD900949.
- Mascorro, V.S. 2014. « Assessing Forest Disturbances for Carbon Modelling: Building the Bridge between Activity Data and Carbon Budget Modelling », M.Sc. Thesis, Faculty of Forestry, University of British Columbia, Vancouver, Canada. 106 p. doi: 10.14288/1.0165575.
- Mascorro, V.S., N.C. Coops, W.A. Kurz et M. Olguin. 2015. « Choice of Satellite Imagery and Attribution of Changes to Disturbance Type Strongly Affects Forest Carbon Balance Estimates ». *Carbon Balance and Management* 10:30. doi: 10.1186/s13021-015-0041-6.
- Mascorro, V.S., N.C. Coops, W.A. Kurz et M. Olguín. 2014. « Attributing Changes in Land Cover Using Independent Disturbance Datasets: A Case Study of the Yucatan Peninsula, Mexico ». *Regional Environmental Change*. doi: 10.1007/s10113-014-0739-0.
- Olguín, M., C. Wayson, W. Kurz, M. Fellows, V. Maldonado, D. López, G. Ángeles, O. Carrillo et V.S. Mascorro. 2015. « Adaptation of the CBM-CFS3 Modeling Framework to Mexico: Towards a Tier 3 Reporting in Strategic Landscapes for REDD+ ». Mexico, Mexique : Projet Mexique–Norvège de la Commission forestière nationale du Mexique (Conafor).
- Pan, Y., R.A. Birdsey, J. Fang, R. Houghton, P.E. Kauppi, W.A. Kurz, O.L. Phillips et coll. 2011. « A Large and Persistent Carbon Sink in the World's Forests ». *Science* 333 (6045) : 988–993. (New York, N.Y.). doi: 10.1126/science.1201609.
- Smyth, C.E., G. Stinson, E. Neilson, T.C. Lemprière, M. Hafer, G.J. Rampley et W.A. Kurz. 2014. « Quantifying the Biophysical Climate Change Mitigation Potential of Canada's Forest Sector ». *Biogeosciences* 11 (13) : 3515–3529. Copernicus GmbH. doi :10.5194/bg-11-3515-2014.
- Stange, F., K. Butterbach-Bahl, H. Papen, S. Zechmeister-Boltenstern, C.S. Li et J. Aber. 2000. « A Process-Oriented Model of N₂O and NO Emissions from Forest Soils 2. Sensitivity Analysis and Validation ». *Journal of Geophysical Research-Atmospheres* 105 (D4) : 4385–4398. doi :10.1029/1999JD900948.
- Stinson, G., W.A. Kurz, C.E. Smyth, E.T. Neilson, C.C. Dymond, J.M. Metsaranta, C. Boisvenue et coll. 2011. « An Inventory-Based Analysis of Canada's Managed Forest Carbon Dynamics, 1990 to 2008 ». *Global Change Biology* 17 (6) : 2227–2244. doi :10.1111/j.1365-2486.2010.02369.x.
- Wieder, William R., Cory C. Cleveland, W. Kolby Smith et Katherine Todd-Brown. 2015. « Future Productivity and Carbon Storage Limited by Terrestrial Nutrient Availability ». *Nature Geoscience*, n° avril : 1–5. doi :10.1038/ngeo2413. doi :10.1029/2011JG001930.
- Zhu, Zhe, et Curtis E. Woodcock. 2012. « Object-Based Cloud and Cloud Shadow Detection in Landsat Imagery ». *Remote Sensing of Environment* 118 : 83–94. doi :10.1016/j.rse.2011.10.028.



Commission de coopération environnementale

393 rue St-Jacques Ouest, bureau 200

Montréal (Québec), Canada H2Y 1N9

Tél.: 514 350-4300

Téloc.: 514 350-4314

info@cec.org / www.cec.org



Ressources naturelles
Canada

Natural Resources
Canada

