



Écosystèmes en transition : carbone, climat et perturbations dans les forêts et les tourbières du Canada



*Perspectives fournies par le réseau
de recherche Fluxnet-Canada et
le Programme canadien du carbone
(2001-2011)*



MISE EN GARDE

Les opinions exprimées dans cette publication sont celles des auteurs et ne reflètent pas nécessairement celles de la Fondation canadienne pour les sciences du climat et de l'atmosphère.

Cette publication peut être citée ou reproduite, sauf pour la revente. La citation de la source est requise. Les demandes de reproduction de toute partie de cette publication doivent être adressées à l'auteur correspondant.

Copyright © Programme canadien du carbone 2011

Tous droits réservés.
Québec, QC, Canada.



Publié par le Programme canadien du carbone et l'Université Laval

Rédactrice : Carole Coursolle

Révisé par : Hank Margolis, Brian Amiro, Pierre Bernier, Harry McCaughey

Traduction et révision française : Sébastien Cyr, Sylvie Carles

Conception graphique : Julie Ferland, U. Laval

Page couverture : Carte de couverture végétale, gracieuseté d'Environnement Canada et du Centre canadien de télédétection, modifiée.

Financé par la Fondation canadienne pour les sciences du climat et de l'atmosphère.



Des copies supplémentaires de cette publication sont disponibles auprès de :

Hank Margolis

Faculté de foresterie, de géographie et de géomatique

Université Laval

2405 rue de la Terrasse

Québec, QC

Canada G1V 0A6

fluxnet.canada@sbf.ulaval.ca

Message du bureau de gestion

Le réseau de recherche Fluxnet-Canada (RRFC) a officiellement été inauguré en avril 2002 afin d'étudier et de comprendre le cycle du carbone des forêts et des tourbières au Canada. La planification du réseau, l'achat de l'équipement et les premières prises des mesures se sont déroulés en 2001. Le financement pour les chercheurs universitaires a été fourni par la Fondation canadienne pour les sciences du climat et de l'atmosphère (FCSCA), le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG) et BIOCAP Canada et, pour les scientifiques du gouvernement, par Ressources naturelles Canada (RNCAN) et Environnement Canada. À partir de 2007, notre travail s'est poursuivi et s'est étendu via le réseau de recherche du Programme canadien du carbone (PCC) grâce aux financements fournis aux chercheurs universitaires par la FCSCA, RNCAN et BIOCAP Canada et avec la participation continue des scientifiques de RNCAN et Environnement Canada.

De 2001 à 2011, le RRFC et le PCC ont fourni un environnement dynamique et collaboratif à plus de 50 scientifiques et 120 étudiants des cycles supérieurs afin de mener des recherches sur un ensemble varié de sujets liés au cycle du carbone et au climat. Nos financements nous ont permis de tenir des assemblées générales annuelles rassemblant des scientifiques, des étudiants et des professionnels provenant de l'Amérique du Nord et de l'Europe. Les étudiants ont pu assister à des conférences, des ateliers et des stages de formation partout dans le monde. De plus, nous avons tenu deux formations scientifiques de courte durée sur le cycle du carbone dans le Parc national du Prince Albert en Saskatchewan. Certains des travaux réalisés par nos scientifiques et nos étudiants sont soulignés dans le présent document.

Notre réseau de recherche a rassemblé des personnes de partout à travers le Canada autour d'un thème de recherche commun. Nous avons accompli beaucoup ensemble, plus que ce que nous aurions pu accomplir seuls. Notre héritage est le progrès scientifique que nous avons réalisé, les étudiants que nous avons formés, les modèles d'écosystèmes que nous avons développés et la base de données standardisées qui renseigne sur le cycle du carbone des forêts et des tourbières canadiennes du début du 21^e siècle. Nos données, qui sont libres d'accès, feront progresser notre science pendant de nombreuses années. Nous remercions sincèrement tous ceux qui ont participé et tous ceux qui ont apporté un soutien financier et/ou moral.

Hank A. Margolis
Directeur de programme
Professeur Titulaire, Université Laval

Carole Coursolle
Coordonnatrice
Prof. de recherche, Université Laval



Table des matières

| | |
|---|----|
| Message du bureau de gestion | 1 |
| Qui sommes-nous? Que faisons-nous? | 2 |
| Comment la science du cycle du carbone renseigne-elle les politiques d'intérêt public? | 3 |
| Les forêts et le cycle du carbone..... | 4 |
| Les tourbières et le cycle du carbone | 18 |
| Le cycle du carbone aux échelles régionale, nationale et mondiale | 24 |
| Les changements climatiques et le cycle du carbone | 34 |
| Participants scientifiques | 40 |
| Comité de direction..... | 41 |
| Comité scientifique | 41 |
| Glossaire | 42 |

Qui sommes-nous ? Que faisons-nous ?

L'augmentation des concentrations de dioxyde de carbone atmosphérique et des autres gaz à effet de serre, en raison des émissions résultant de l'utilisation de combustibles fossiles et des changements d'utilisation des terres, a soulevé des inquiétudes par rapport aux changements climatiques. Les écosystèmes naturels représentent une composante majeure du cycle global du carbone et leurs réponses au climat et aux interventions humaines doivent être considérées lorsque nous évaluons les différentes options politiques portant sur les changements climatiques et l'utilisation de l'énergie. Intégrer les écosystèmes naturels dans les débats politiques exige une meilleure compréhension de la façon dont les écosystèmes naturels réagissent actuellement au climat et de la façon dont cette réaction pourrait évoluer dans le futur.

En 2002, près de 50 chercheurs scientifiques universitaires et gouvernementaux se sont réunis, dans un effort coordonné à l'échelle nationale, afin de mieux comprendre le cycle du carbone des vastes tourbières et forêts canadiennes et leur rôle au niveau des changements climatiques. Nous nous sommes réunis autour de l'idée que le progrès de la science sur le cycle du carbone terrestre au Canada nécessitait l'établissement, et ce à travers le pays, d'un ensemble coordonné et standardisé d'observations continues et sur le long terme qui seraient étroitement liées à l'élaboration de modèles mathématiques d'écosystèmes. Notre idée était de fournir des mesures sur le cycle du carbone nécessaires au développement et au test des modèles processuels qui décrivent et prédisent comment les écosystèmes réagissent aux changements climatiques et aux perturbations écologiques (e.g. les feux de forêts, les insectes et les coupes forestières) ainsi que la façon dont cette réaction pourrait aggraver, ou moduler, les changements climatiques à venir.

Le réseau de recherche Fluxnet-Canada (2002-2007) a été conçu dans l'idée de démontrer la faisabilité d'un système de suivi et d'observation du carbone, centré sur la mise en place d'un réseau de tours de flux (Figure 1). Les données collectées au niveau de ces tours comprenaient les fluctuations de la vitesse du vent et des concentrations de gaz atmosphériques, ce qui permettait de calculer les échanges de carbone, d'eau et d'énergie entre la surface du sol et l'atmosphère (méthode de covariance des turbulences) pour l'ensemble des écosystèmes sur une superficie d'environ un kilomètre carré. Nous avons réalisé ces mesures sur des intervalles de 30 minutes, 24 heures par jour, 365 jours par année, sur plusieurs années. Les tours ont été stratégiquement situées dans différents

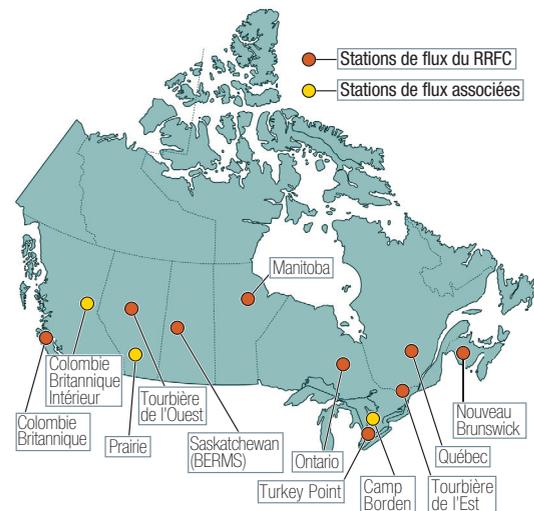


Figure 1. Les mesures de flux ont été menées dans plus de 25 sites possédant une tour de flux situés au sein des 12 stations de flux du RRFC/PCC réparties dans sept provinces. Les tours de flux étaient situées dans des peuplements matures et perturbés au sein des forêts boréales et tempérées, ainsi que dans des tourbières.

types de forêts et de tourbières à travers le pays dans des zones qui permettaient de caractériser les effets des perturbations écologiques et de la variabilité spatiale des paysages. Lorsque combinées avec des données provenant de la télédétection par satellite et des informations liées au climat et au sol, ces mesures permettent de reconstituer la façon dont nos grands écosystèmes répondent à l'évolution du climat aux échelles locale, régionale, nationale, continentale et mondiale. En 2007, Fluxnet-Canada a élargi son horizon en intégrant d'autres mesures de gaz à effet de serre et des données d'inventaires forestiers afin de développer des modèles encore plus sophistiqués. Cette nouvelle approche, connue sous le nom de Programme canadien du carbone, a été en opération jusqu'en 2011.

Nous avons été en mesure de combiner nos données avec celles provenant d'autres réseaux de mesures similaires à travers le monde afin d'établir une base de données mondiale; cette dernière ayant fait avancer significativement notre compréhension du cycle mondial du carbone. Nous avons également produit un ensemble de données archivées qui représentera une partie importante de l'héritage scientifique laissé par le réseau et qui servira de base pour le suivi à long terme du cycle canadien du carbone au cours des prochaines décennies. Plus de 120 étudiants diplômés et stagiaires postdoctoraux ont été formés au sein du RRFC/PCC. Nous nous attendons à ce que ces chercheurs talentueux assurent la poursuite du mandat du réseau dans le futur. Enfin, plus de 200 articles scientifiques et un numéro spécial de la revue *Agricultural and Forest Meteorology* ont été publiés avec l'aide des recherches du RRFC/PCC.

Comment la science du cycle du carbone renseigne-elle les politiques d'intérêt publique ?

L'augmentation des concentrations atmosphériques de dioxyde de carbone (CO₂) et d'autres gaz à effet de serre causée par l'utilisation de combustibles fossiles et par le changement d'affectation des terres a une incidence sur le climat mondial. Les écosystèmes terrestres jouent un rôle majeur dans le cycle global du carbone, et une meilleure compréhension de ce rôle est pertinente pour le Canada en regard de ses obligations internationales et politiques en rapport aux changements climatiques. Cinq principales raisons sous-tendent cette importance :

1. À l'échelle planétaire, les échanges annuels de CO₂ entre les écosystèmes terrestres et l'atmosphère sont dix fois supérieurs aux émissions de combustibles fossiles. Ainsi, des variations relativement faibles de ces flux peuvent avoir un effet très important sur le budget global du carbone. Nous devons comprendre les mécanismes et la nature de ces changements dans le cycle du carbone terrestre si nous voulons mieux évaluer l'efficacité des différentes stratégies de réduction des émissions de gaz à effet de serre.
2. Selon l'état actuel de nos connaissances, les écosystèmes terrestres séquestrent, en moyenne, 30 % des émissions de CO₂ provenant des combustibles fossiles. Cette quantité de carbone resterait dans l'atmosphère si ces puits naturels cessaient de fonctionner. Nous devons comprendre les mécanismes qui peuvent transformer les écosystèmes terrestres de puits en source de carbone et ce qui détermine la stabilité du carbone séquestré. Nous devons aussi savoir comment quantifier ces processus à une grande échelle spatiale.
3. Les forêts peuvent potentiellement jouer un rôle important dans les efforts d'atténuation des émissions de carbone faits par le Canada. Il est toutefois nécessaire de mieux connaître la quantité et la stabilité du carbone qu'elles pourraient séquestrer ainsi que les coûts associés aux mesures d'atténuation.
4. Les changements climatiques auront un impact sur la capacité des écosystèmes terrestres à fournir de façon continue des biens et des services à la société en plus de séquestrer le CO₂. Nous devons mieux connaître et comprendre la sensibilité de nos écosystèmes aux changements climatiques si nous voulons élaborer des stratégies et des politiques efficaces d'adaptation à ces changements.
5. Étant donné l'importance de l'impact des changements climatiques sur notre société et notre économie, le Canada doit améliorer sa capacité à intégrer les informations disponibles portant sur le cycle du carbone, y compris la contribution des forêts et des tourbières du Canada, dans un cadre d'analyse cohérent. Cette capacité devrait être élaborée de façon à supporter le système canadien actuel de comptabilisation du carbone.

Le Réseau de recherche Fluxnet-Canada (RRFC) et le Programme canadien du carbone (PCC) ont été conçus afin d'apporter des réponses pertinentes pour le Canada à ces cinq enjeux scientifiques. Nous sommes un réseau scientifique dont les bases reposent sur la génération de mesures de haute qualité, le maintien d'un cadre d'analyse ordonné, et une collaboration scientifique rigoureuse nécessaire au progrès scientifique. Notre but est d'apporter une contribution canadienne à la compréhension et à la gestion de cette problématique mondiale. Compte tenu de la grande superficie du Canada et de la distribution de ses réserves de carbone, nos efforts se sont concentrés sur les forêts et les tourbières du pays.

Le RRFC/PCC a apporté un soutien scientifique au Canada pour l'atteinte de ses objectifs en matière de politiques nationale et internationale à l'égard du carbone de ses forêts et de ses tourbières, y compris la réalisation d'inventaires de carbone et l'évaluation des options d'atténuation basées sur les forêts et les tourbières. Ce faisant, nous reconnaissons que la formulation des politiques est dynamique, en particulier celles liées aux juridictions provinciales et fédérales impliquées dans différents aspects de la gestion des forêts du Canada. Par ses activités, le RRFC/PCC a contribué aux objectifs politiques suivants :

1. Démontrer une interdépendance des forêts et des tourbières climatiquement responsable au sein d'un environnement économique et scientifique mondial;
2. Satisfaire aux obligations et besoins nationaux et internationaux d'inventaire des gaz à effet de serre et anticiper les besoins futurs;
3. Veiller à ce que les politiques et les règlements nationaux et internationaux en lien avec le carbone forestier tiennent compte des circonstances propres au Canada; et
4. Éventuellement, utiliser la gestion du carbone forestier dans l'atteinte des objectifs canadiens d'atténuation des émissions de CO₂.

Les forêts et le cycle du carbone

Publications suggérées pour lectures complémentaires

- Amiro, B.D., A.G. Barr, J.G. Barr, T.A. Black, R. Bracho, M. Brown, J. Chen, K.L. Clark, K.J. Davis, A.R. Desai, S. Dore, V. Engel, J.D. Fuentes, A.H. Goldstein, M.L. Goulden, T.E. Kolb, M.B. Lavigne, B.E. Law, H.A. Margolis, T. Martin, J.H. McCaughey, L. Misson, M. Montes-Helu, A. Noormets, J.T. Randerson, G. Starr, J. Xiao. 2010. Ecosystem carbon dioxide fluxes after disturbance in forests of North America. *Journal of Geophysical Research* 115, G00K02, doi:10.1029/2010JG001390.
- Amiro, B.D., A.L. Orchansky, A.G. Barr, T.A. Black, S.D. Chambers, F.S. Chapin III, M.L. Goulden, M. Litvak, H.P. Liu, J.H. McCaughey, A. McMillan, J.T. Randerson. 2006. The effect of post-fire stand age on the boreal forest energy balance. *Agricultural and Forest Meteorology* 140: 41-50.
- Arain, M.A., N. Restrepo-Coupe. 2005. Net Ecosystem Production in an Eastern White Pine plantation in southern Canada. *Agricultural and Forest Meteorology* 128: 223-241.
- Barr, A.G., T.A. Black, E.H. Hogg, T. Griffis, K. Morgenstern, N. Kijun, A. Theede, Z. Nescic. 2007. Climatic controls on the carbon and water budgets of a boreal aspen forest. *Global Change Biology* 13: 561-576.
- Bergeron, O., H.A. Margolis, T.A. Black, C.C. Coursolle, A.L. Dunn, A.G. Barr, S.C. Wofsy. 2007. Comparison of CO₂ fluxes over three boreal black spruce forests in Canada. *Global Change Biology* 13: 89-107, doi:10.1111/j.1365-2486.2006.01281.x.
- Bernier, P.Y., P. Bartlett, T.A. Black, A. Barr, N. Kijun, H. McCaughey. 2006. Drought constraints on transpiration and canopy conductance in mature aspen and jack pine stands. *Agricultural and Forest Meteorology* 140: 64-78.
- Brown, M., T.A. Black, Z. Nescic, V.N. Foord, D.L. Spittlehouse, A.L. Fredeen, N.J. Grant, P.J. Burton, J.A. Trofymow. 2010. Impact of mountain pine beetle on the net ecosystem production of lodgepole pine stands in BC. *Agricultural and Forest Meteorology* 150: 254-264.
- Cai, T., L.B. Flanagan, R.S. Jassal, T.A. Black. 2008. Modeling environmental controls on photosynthesis and the carbon isotope composition of ecosystem respired CO₂ in a coastal Douglas-fir forest. *Plant Cell and Environment* 31: 435-453.
- Chasmer, L., H. McCaughey, A. Barr, A. Black, A. Shashkov, P. Treitz, T. Zha. 2008. Investigating light-use efficiency across a jack pine chronosequence during dry and wet years. *Tree Physiology* 28: 1395-1406.
- Chen, J.M., A. Govind, O. Sonntag, Y. Zhang, A. Barr, B. Amiro. 2006. Leaf area index measurements at Fluxnet-Canada forest sites. *Agricultural and Forest Meteorology* 140: 257-268.
- Coursolle, C., H.A. Margolis, A.G. Barr, T.A. Black, B.D. Amiro, J.H. McCaughey, L.B. Flanagan, P.M. Lafleur, N.T. Roulet, C. P.-A. Bourque, M.A. Arain, S.C. Wofsy, A. Dunn, K. Morgenstern, A.L. Orchansky, P.-Y. Bernier, J.M. Chen, J. Kidston, N. Saigusa, N. Hedstrom. 2006. Late-summer carbon fluxes from Canadian forests and peatlands along an east-west continental transect. *Canadian Journal of Forest Research* 36: 783-800.
- Flanagan, L.B., T. Cai, T.A. Black, A.G. Barr, J.H. McCaughey, H.A. Margolis. 2011. Measuring and modeling ecosystem photosynthesis and the carbon isotope composition of ecosystem-respired CO₂ in three boreal coniferous forests. *Agricultural and Forest Meteorology* (in press).
- Giasson, M.-A., C. Coursolle, H.A. Margolis. 2006. Ecosystem-level carbon fluxes from a boreal cutover in eastern Canada before and after scarification. *Agricultural and Forest Meteorology* 140: 23-40 doi:10.1016/j.agrformet.2006.08.001.
- Hermle, S., M.B. Lavigne, P.Y. Bernier, O. Bergeron, D. Paré. 2010. Component respiration and net primary production of a mature black spruce forest in northern Québec. *Tree Physiology* 30: 527-540.
- Humphreys, E.R., T.A. Black, K. Morgenstern, T. Cai, G.B. Drewitt, Z. Nescic. 2006. Carbon dioxide fluxes in three coastal Douglas-fir stands at different stages of development after harvesting. *Agricultural and Forest Meteorology* 140: 6-22.
- Jassal, R.S., T.A. Black, B. Chen, Z. Nescic, R. Roy, D. Spittlehouse, J.A. Trofymow. 2008. N₂O emissions and carbon sequestration in a nitrogen-fertilized Douglas-fir stand. *Journal of Geophysical Research-Biogeosciences* doi:10.1029/2008JG000764.
- Krishnan P., T.A. Black, A.G. Barr et al. 2008. Factors controlling the interannual variability in the carbon balance of a southern boreal black spruce forest. *Journal of Geophysical Research* 113, D09109, doi:10.1029/2007JD008965.
- Krishnan, P., T.A. Black, R.S. Jassal, Z. Nescic. 2009. Interannual variability in the carbon balance of three different-aged Pacific Northwest Douglas-fir stands. *Journal of Geophysical Research-Biogeosciences* 114, G04011, doi:10.1029/2008JG000912.
- McCaughey, H., M.R. Pejam, M.A. Arain, D.A. Cameron. 2006. Carbon dioxide and energy fluxes from a boreal mixedwood forest ecosystem in Ontario, Canada. *Agricultural and Forest Meteorology* 140: 79-96.
- McLaren, J.D., M.A. Arain, M. Khomik, M. Peichl, J. Brodeur. 2008. Water flux components and soil water-atmospheric controls in a temperate pine forest growing in a well-drained sandy soil. *Journal of Geophysical Research-Biogeosciences*, 113: G04031, doi:10.1029/2007JG000653.
- Mkhabela, M.S., B.D. Amiro, A.G. Barr, T.A. Black, I. Hawthorne, J. Kidston, J.H. McCaughey, A.L. Orchansky, Z. Nescic, A. Sass, A. Shashkov, T. Zha. 2009. Comparison of carbon dynamics and water use efficiency following fire and harvesting in Canadian boreal forests. *Agricultural and Forest Meteorology* 149: 783-794.
- Peichl M., J. Brodeur, M. Khomik, M.A. Arain. 2010. Biometric and eddy-covariance based estimates of carbon fluxes in an age-sequence of temperate pine forests. *Agricultural and Forest Meteorology* 150: 952-965, doi:10.1016/j.agrformet.2010.03.002.
- Thomas, V., D.A. Finch, H. McCaughey, T. Noland, L. Rich, P. Treitz. 2006. Spatial modelling of the fraction of photosynthetically active radiation absorbed by a boreal mixedwood forest using a lidar-hyperspectral approach. *Agricultural and Forest Meteorology* 140: 287-307.
- Thomas, V., P. Treitz, J.H. McCaughey, T. Noland, L. Rich. 2008. Canopy chlorophyll concentration estimation using hyperspectral and lidar data for a boreal mixedwood forest in northern Ontario, Canada. *International Journal of Remote Sensing* 29: 1029-1052.
- Zha, T., A.G. Barr, T.A. Black, J.H. McCaughey, J. Bhatti, I. Hawthorne, P. Krishnan, J. Kidston, N. Saigusa, A. Shashkov, Z. Nescic. 2009. Carbon sequestration in boreal jack pine stands following harvesting. *Global Change Biology* 15: 1475-1487.



| | |
|--|----|
| Les forêts matures du Canada sont-elles des puits de carbone ? | 6 |
| Comment le cycle du carbone des forêts diffère-t-il à travers le Canada ? | 8 |
| Qu'advient-il de la forêt suite à une coupe forestière ? | 10 |
| Comment les feux affectent-ils le bilan de carbone des forêts ? | 12 |
| Quel est l'impact d'une épidémie d'insectes ravageurs sur le bilan de carbone d'une forêt ? | 14 |
| Comment le bilan de carbone des plantations forestières diffère-t-il de celui des forêts naturelles ? | 16 |



Les forêts matures du Canada sont-elles des puits de carbone ?

Avant l'avènement des mesures de flux réalisées à partir de tours, la théorie classique en écologie présumait que les vieux peuplements forestiers tendaient vers un bilan en carbone neutre, ne séquestrant ni n'émettant de carbone. À long terme et en absence de perturbation majeure, les processus de photosynthèse et de respiration s'équilibreraient. Dans cette éventualité, les bénéfices au niveau de la séquestration de carbone permis par la conservation de forêts anciennes seraient de moindre importance, bien que les quantités de carbone séquestré dans ce type de peuplement soient tout de même considérables. Cependant, ces stocks de carbone sont vulnérables aux perturbations écologiques telles que les incendies ou les épidémies d'insectes, en particulier dans la forêt boréale du Canada.

Au Canada, nous avons réalisé des mesures de bilan annuel de carbone pour différents peuplements forestiers tempérés et boréaux. Ces mesures ont permis de mieux comprendre le rôle des forêts matures du Canada dans le cycle global du carbone. La forêt boréale représente plus de la moitié de la superficie forestière du Canada. Les analyses ont montré que les forêts matures du Canada tendent à être d'importants puits de carbone, avec un taux de séquestration annuel moyen allant de 0,1 à 0,8 t C/ha pour des peuplements d'épinettes noires et de pins gris en forêt boréale jusqu'à 4,2 t C/ha pour un peuplement de sapins de Douglas de la région tempérée de la côte ouest (Figure 1). Un peuplement mixte mature de la forêt boréale dans le nord de l'Ontario séquestre, en moyenne, 0,9 t C/ha annuellement alors qu'un peuplement de pins blancs en zone tempérée représente un puits de carbone annuel moyen de 1,6 t/ha (Figure 1).

Les analyses ont montré que les forêts matures du Canada tendent à être d'importants puits de CO₂

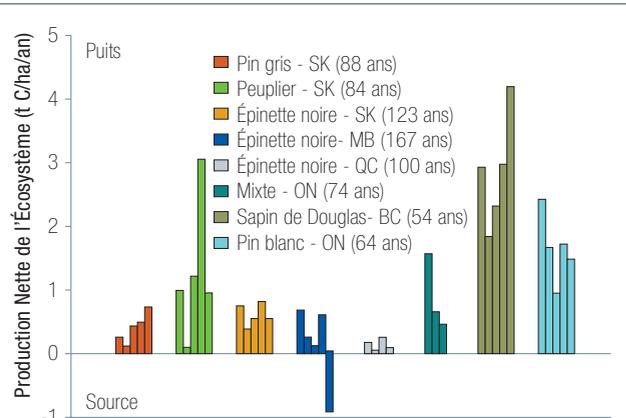
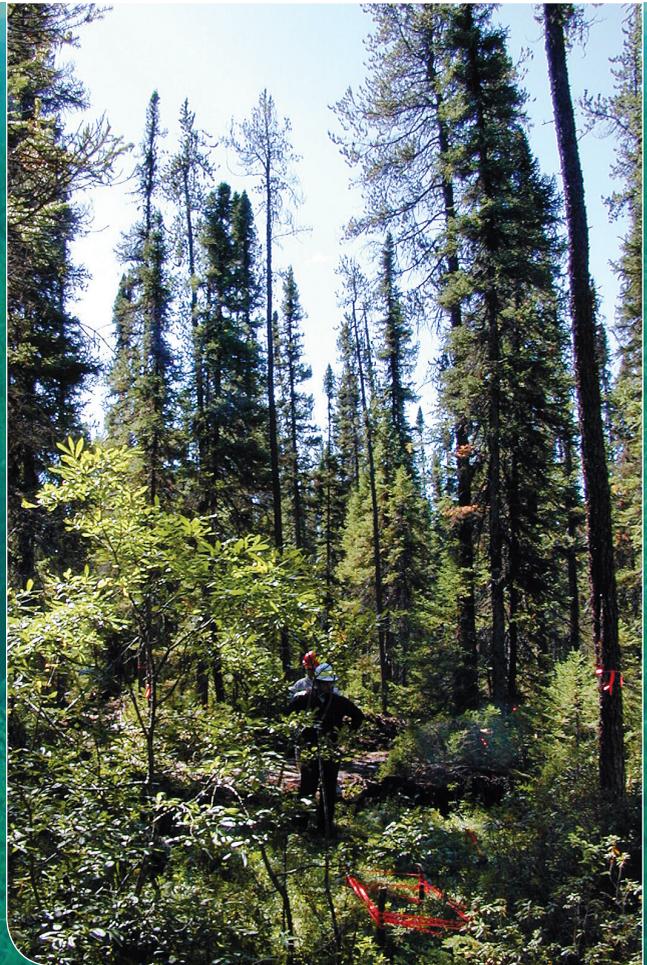


Figure 1. Séquestration ou émission totale annuelle de carbone (production nette de l'écosystème) de 2003 à 2007 par des peuplements matures de pins gris, de peupliers, d'épinettes noires et mixtes en forêt boréale de la Saskatchewan, du Manitoba, du Québec et de l'Ontario et par des peuplements matures de sapins de Douglas et de pins blancs en forêt tempérée de la Colombie Britannique et de l'Ontario. Chaque barre verticale représente la quantité totale de carbone séquestré par un site donné dans une année. Les valeurs positives indiquent une séquestration de carbone (puits) et les valeurs négatives indiquent des émissions de carbone (source).

Nos études ont également montré que l'équilibre hydrologique joue un rôle important dans la détermination de l'état de puits ou de source de carbone pour les pessières noires matures situées dans le nord. Les périodes de précipitations abondantes et de nappes phréatiques élevées tendent à limiter la respiration du sol et ainsi augmenter l'intensité du puits de carbone. Par exemple, un peuplement d'épinettes noires émettant annuellement 0,4 t C/ha est passé à une séquestration de 0,25 t C/ha à la suite d'une augmentation des précipitations annuelles en 1999. Une sécheresse de 3 ans survenue dans un peuplement de peupliers en forêt boréale a considérablement réduit la séquestration de carbone, bien que dans les environs, elle ait eu peu d'effet sur les peuplements d'épinettes noires et de pins gris, espèces mieux adaptées aux

sécheresses. L'épaisseur de la couverture neigeuse peut également être un facteur important. Une épaisseur de neige plus élevée en hiver s'accompagne d'une température du sol plus élevée et d'une perte de carbone par respiration plus importante. Des périodes nuageuses prolongées au cours des longues journées printanières des zones boréales peuvent limiter l'intensité lumineuse et la photosynthèse, conduisant à une diminution de la séquestration annuelle du carbone. Un printemps hâtif et chaud sur la côte ouest a tendance à augmenter la séquestration de carbone des forêts de sapins de Douglas, tandis qu'un été chaud produit l'effet contraire.

L'état des forêts matures, à savoir si elles sont des puits ou des sources de carbone, représente un enjeu important pour la politique climatique nationale. Bien que les forêts n'aient pas été considérées dans le Protocole de Kyoto de 1997, il y a eu une reconnaissance croissante de leur importance dans les négociations les plus récentes. La conférence des Nations Unies sur le climat à Cancun en 2010 a mené à l'établissement d'un Fonds vert destiné à aider les pays pauvres à réduire la déforestation et la dégradation de leurs forêts. Cependant, il faut garder à l'esprit que la moitié des forêts primaires du monde sont situées dans les régions boréales et tempérées de l'hémisphère Nord. Même si elles sont très vulnérables aux perturbations écologiques, ces forêts du nord sont d'importants stocks de carbone et agissent en tant que puits de carbone continus.



Pour plus d'informations, veuillez contacter M. Hank Margolis (hank.margolis@sbf.ulaval.ca)



Comment le cycle du carbone des forêts diffère-t-il à travers le Canada ?

Le cycle du carbone d'une forêt est influencé par le climat et les espèces végétales présentes. En conséquence, il varie d'une région à l'autre. Nous avons réalisé des mesures à long terme de flux de carbone dans plusieurs régions du pays afin de mieux connaître la variabilité du cycle du carbone à travers le Canada.

Les mesures de flux de carbone réalisées dans les forêts tempérées de la Colombie-Britannique et de l'Ontario et dans les forêts boréales de la Saskatchewan et du Québec montrent que les forêts tempérées matures séquestrent entre 1,0 et 4,2 t C/

ha par année alors que les forêts boréales matures séquestrent entre 0,1 et 0,8 t C/ha/an (Figure 1a). Le climat plus favorable des forêts tempérées permet une capture du carbone par la photosynthèse sur une plus longue période par rapport au climat des forêts boréales. En moyenne, les peuplements de sapins de Douglas et de pins blancs en forêt tempérée font de la photosynthèse respectivement 12 et 9 mois par année, tandis que les peuplements de pins gris et d'épinettes noires en forêt boréale font de la photosynthèse 7 mois par année (Figure 1b).

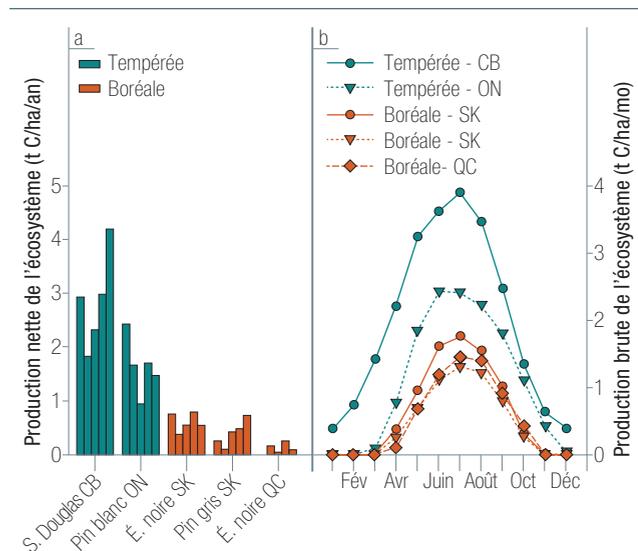


Figure 1. (a) Séquestration annuelle nette de carbone (production nette de l'écosystème) de 2003 à 2007 par des peuplements de sapins de Douglas et de pins blancs de la Colombie-Britannique et de l'Ontario et par des peuplements de pins gris et d'épinettes noires de la Saskatchewan et du Québec. Chaque barre verticale représente la quantité nette de carbone séquestré par année. (b) Quantité mensuelle moyenne de carbone capturé par la photosynthèse (production brute de l'écosystème) pour ces mêmes peuplements. Chaque symbole représente la capture moyenne pour le mois considéré, pour la période 2003 - 2007.

Le climat plus favorable des forêts tempérées permet une capture du carbone sur une plus longue période par rapport au climat des forêts boréales. En moyenne, les peuplements de sapins de Douglas et de pins blancs en forêt tempérée font de la photosynthèse respectivement 12 et 9 mois par année, tandis que les peuplements de pins gris et d'épinettes noires en forêt boréale font de la photosynthèse 7 mois par année.

La comparaison entre une pessière noire de l'ouest et une de l'est permet de visualiser l'effet des précipitations hivernales sur le cycle du carbone en forêt boréale. En hiver, la pessière de l'ouest émet moins de carbone que celle de l'est (Figure 2a). Les émissions hivernales représentent 8 % des émissions annuelles au site de l'ouest, alors qu'au site de l'est, elles en représentent 12 %. Cette différence peut être liée à un couvert nival plus important dans la forêt boréale de l'est, ce qui isole davantage le sol et le protège du gel pendant une plus longue période en hiver. Au cours de la période d'étude, le sol de la pessière de l'ouest a été gelé pendant plus de 80 % de l'hiver. Lorsque nous soustrayons du budget annuel de carbone de la

peissière de l'est, les pertes (0,3 t C/ha) attribuables à l'épaisse couverture nivale (Figure 2b, barres verticales dorées), la quantité de carbone séquestrée par celle-ci approche celle de la peissière de l'ouest (Figure 2b).

La quantité totale de carbone séquestré, ainsi que sa variabilité interannuelle, dépendent également du type d'écosystème forestier. Le taux annuel de séquestration de carbone du site situé en forêt feuillue (peuplier) tend à être plus élevé que celui des sites situés en forêt boréale (épinette noire) et en forêt mixte, malgré une période photosynthétiquement active de seulement cinq mois pour le site en forêt feuillue comparativement à sept mois pour les deux autres sites (Figure 3a, b). La variabilité climatique interannuelle influence davantage la séquestration de carbone de la peupleraie que celles des deux autres sites. Notamment, une sécheresse de plusieurs années a entraîné une réduction de la surface foliaire de la peupleraie en 2004, conduisant à des taux de séquestration de carbone similaires à ceux de la peissière noire. Un climat plus favorable en 2006 (après la sécheresse) a, par la suite, conduit à des taux de séquestration de carbone

La quantité totale de carbone séquestré, ainsi que sa variabilité interannuelle, dépendent également du type d'écosystème forestier.

similaires entre la peupleraie et le peuplement de sapins de Douglas (Figures 1a, 2b, 3a). D'autre part, la peissière noire de la Saskatchewan affiche de plus faibles taux de photosynthèse étant donné sa physiologie résineuse. Le peuplement mixte de l'Ontario affiche simultanément des caractéristiques de la forêt boréale et de la forêt feuillue. En plus de présenter une

activité photosynthétique plus faible que la peupleraie, ce dernier affiche une plus grande variabilité interannuelle au niveau de la séquestration de carbone et de plus grands taux de photosynthèse que la peissière noire (Figure 3b).

Pour plus d'informations, veuillez contacter
Mme Carole Coursolle (carole.coursolle@sbf.ulaval.ca)

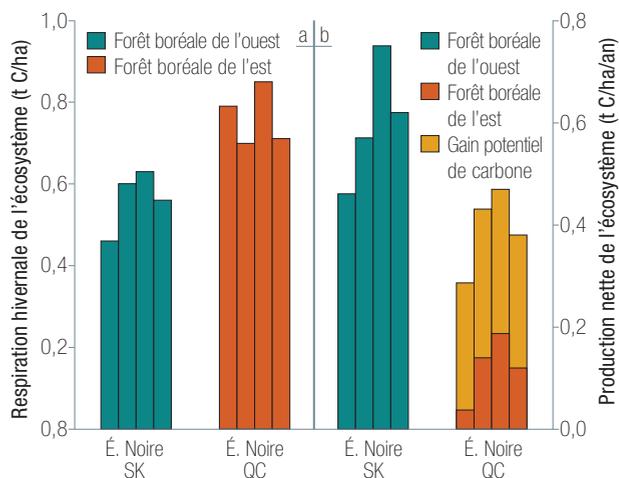


Figure 2. (a) Quantité de carbone émis par la respiration hivernale de novembre 2003 à octobre 2007 pour une peissière noire de l'ouest (Saskatchewan) et de l'est (Québec) de la forêt boréale. Chaque barre verticale représente la quantité de carbone émis pendant un hiver. (b) Séquestration annuelle nette du carbone par ces mêmes peissières de novembre 2003 à octobre 2007. Les barres verticales orange représentent la quantité réelle de carbone séquestré. Les barres verticales dorées représentent la quantité de carbone potentiellement séquestré par la peissière noire de l'est, dans l'éventualité où son taux de respiration hivernale aurait été semblable à celui de l'ouest.

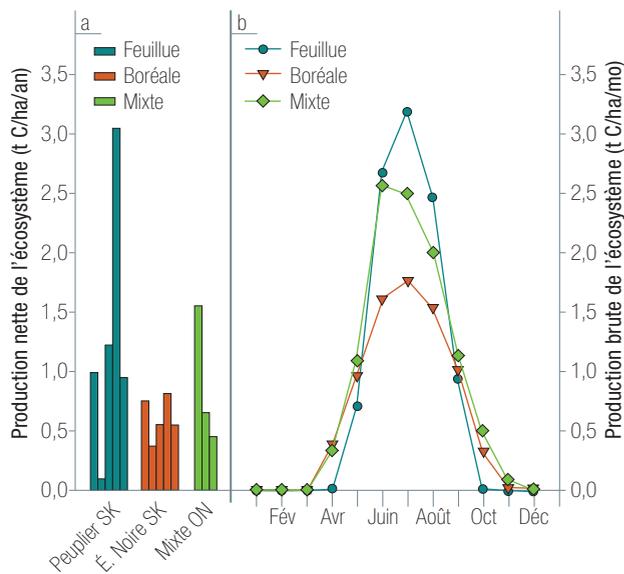


Figure 3. (a) Séquestration annuelle nette de carbone de 2003 à 2007 par des peuplements de peupliers, d'épinettes noires et mixte de la Saskatchewan et de l'Ontario. Chaque barre verticale représente la quantité nette de carbone séquestré par année. (b) Quantité mensuelle moyenne de carbone capturé par la photosynthèse (production brute de l'écosystème) pour ces mêmes peuplements. Chaque symbole représente la capture moyenne pour le mois considéré pour la période 2003 - 2007.



Qu'advient-il de la forêt suite à une coupe forestière ?

Les forêts fournissent du bois, des produits forestiers non ligneux et des habitats fauniques et protègent l'eau et le sol. Elles participent aussi à la régulation du climat et sont un lieu de loisir privilégié. Elles représentent une réserve de carbone de 1 640 Pg qui, sans elles, se retrouverait dans l'atmosphère sous forme de CO₂. Environ 70% de ce carbone est emmagasiné dans la litière et dans le sol. À mesure qu'elles croissent, les forêts absorbent du CO₂ par la photosynthèse. Une partie de ce CO₂ est alors stocké dans le bois sous forme de carbone, tandis que le reste est perdu par la respiration nécessaire à la croissance et à l'entretien. Que la récolte soit réalisée pour produire du bois ou pour déboiser un terrain, elle a pour premières conséquences la perte de réserves de carbone, la réduction de la qualité de l'habitat faunique et de la valeur esthétique du paysage, l'augmentation du ruissellement de surface et la diminution de l'évapotranspiration.



Suite à une coupe forestière, la photosynthèse diminue fortement en raison d'une réduction de la surface foliaire. La respiration de l'écosystème (RE) diminue également. Toutefois, la respiration du sol associée à la décomposition microbienne et qui représente une portion importante de la RE, peut augmenter suite à l'augmentation de la température et de la teneur en eau du sol qui résulte de l'absence d'un couvert forestier. De plus, la coupe par tronçonnage retire du carbone de la forêt en l'entreposant hors du site dans les produits du bois. Le feuillage, les branches, et les autres résidus de coupe qui sont laissés sur place se décomposent au fil du temps, libérant du CO₂ dans l'atmosphère.

Nos mesures montrent que l'exploitation forestière réduit la production brute de l'écosystème (PBE) par un facteur de 52, 73

Tableau 1. Pourcentage de réduction de la production brute de l'écosystème (PBE, photosynthèse) et de la respiration de l'écosystème (RE) après coupe pour des peuplements d'épinettes noires, de sapins de Douglas et de pins gris par rapport aux taux avant coupe.

| | Épinette noire (%) | Sapin de Douglas (%) | Pin gris (%) |
|-----|--------------------|----------------------|--------------|
| PBE | 52 | 73 | 94 |
| RE | 21 | 37 | 60 |

Tableau 2. Séquestration/émission annuelle nette de l'écosystème (production nette de l'écosystème) avant et après coupe pour des peuplements d'épinettes noires, de sapins de Douglas et de pins gris. Une valeur positive indique une séquestration de carbone (puits) alors qu'une valeur négative indique une émission de carbone (source) dans l'atmosphère.

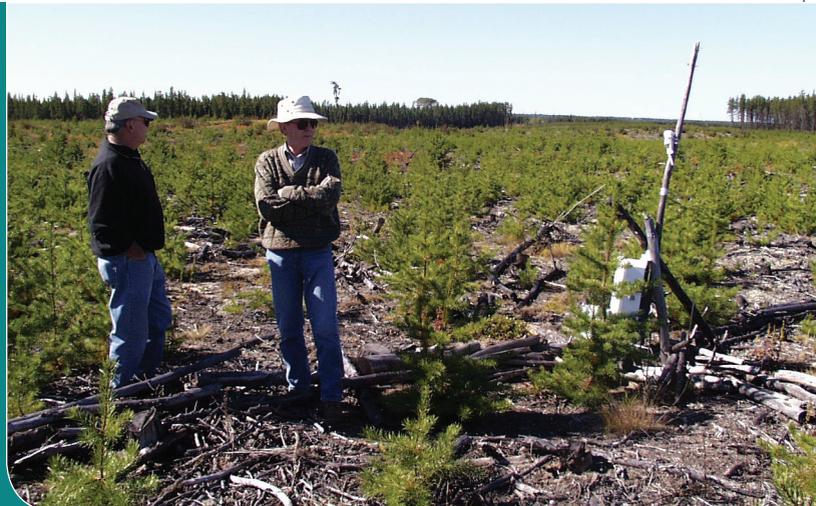
| | Épinette noire | Sapin de Douglas | Pin gris |
|----------------|----------------|------------------|----------|
| Avant (t C/ha) | 0,2 | 3,5 | 0,2 |
| Après (t C/ha) | -1,4 | -6,0 | -1,9 |

et 94 % dans les peuplements d'épinettes noires, de sapins de Douglas et de pins gris, respectivement (Tableau 1). Alors que la RE dans ces peuplements diminue, respectivement, de seulement 21, 37 et 60 %. Ces différences considérables de réduction entre la PBE et la RE résultent en une émission initiale de carbone de, respectivement, 1,4, 6,0 et 1,9 t/ha (Tableau 2). Les peuplements qui ont été récoltés émettent ainsi du carbone jusqu'à ce que son absorption via la croissance atteigne le niveau de la RE. Ce phénomène se produisant 10, 17 et 10 ans après la récolte pour les peuplements d'épinettes noires, de sapins de Douglas et de pins gris, respectivement. Par ailleurs, lorsque cet équilibre est atteint, les peuplements ont émis approximativement 4 à 50 t C/ha, dépendamment des espèces. Ces pertes ne sont compensées que lorsque les peuplements atteignent 19 à 40 ans d'âge. L'absorption de carbone réalisée au-delà de cet âge et jusqu'à la récolte représente le total net de carbone séquestré par un peuplement sur l'ensemble de sa révolution.

Au Canada, l'évapotranspiration (E) annuelle des forêts ne dépasse généralement pas 500 mm. Chez un peuplement de sapins de Douglas, où l' E est d'environ 400 mm par année, une diminution de 30 % a été observée suite à une coupe. Ce changement représente 120 mm d'eau additionnelle qui se déversent dans les cours d'eau et les eaux souterraines annuellement. Un rétablissement complet de l' E s'observe lorsque le nouveau peuplement forestier atteint l'âge de 12 ans. Une récolte forestière modifie également d'autres variables hydrologiques telles que l'accumulation de la neige, la période de fonte des neiges, l'interception des précipitations et les caractéristiques hydrauliques du sol. Ces changements transforment la dynamique de l'écoulement fluvial et le bilan hydrique du bassin versant.

Les activités forestières telles que l'établissement des chemins forestiers et des sentiers de débardage peuvent causer le compactage des sols, réduisant la percolation de l'eau et, ainsi, augmentant le ruissellement et l'érosion des sols. Une modification des propriétés relatives à la décomposition de la matière organique, au régime hydrique et à la compaction du sol est susceptible d'affecter les échanges de méthane (CH_4) et d'oxyde nitreux (N_2O). Une coupe forestière engendre une augmentation des émissions de CO_2 (et éventuellement de CH_4 et de N_2O), ce qui favorise le

Que la récolte soit réalisée pour produire du bois ou pour déboiser un terrain, elle a pour premières conséquences la perte de réserves de carbone, la réduction de la qualité de l'habitat faunique et de la valeur esthétique du paysage, l'augmentation du ruissellement de surface et la diminution de l'évapotranspiration.



phénomène du réchauffement climatique. Cependant, l'élimination du couvert forestier et l'accumulation plus importante de neige qui s'ensuit, se traduisent par une augmentation de l'albédo; phénomène qui peut neutraliser certains des effets liés au réchauffement climatique.

Pour plus d'informations, veuillez contacter M. Andy Black (ablack@mail.ubc.ca)



Comment les feux affectent-ils le bilan de carbone des forêts ?

Le rôle des feux dans les forêts canadiennes

Le feu représente un élément important de la dynamique des forêts canadiennes. L'ensemble des forêts est touché par le passage des feux, la fréquence étant toutefois beaucoup plus élevée dans la forêt boréale et dans l'ouest du pays. L'intervalle de retour des feux, période entre deux feux au même endroit, peut varier de quelques années à plusieurs centaines d'années. Au cours des dernières décennies, le temps moyen entre deux feux a été d'environ 140 ans au Canada, mais ce délai est possiblement en décroissance. Avec les changements climatiques, une plus grande superficie de forêts brûlées est à prévoir. La dynamique du carbone est affectée par le cycle de vie des forêts entre chaque perturbation. Le type de végétation présent s'adapte au cycle des feux, particulièrement en forêt boréale, affectant ainsi les échanges de carbone. Au sein du



Figure 1. Feu dans une jeune pinède dans le nord du Manitoba. La photographie a été prise quelques jours après l'incendie. Notez à quel point l'ensemble de la végétation a été brûlé. Les rochers dénudés montrent les endroits où le sol de la forêt a complètement brûlé.

PCC, nous avons étudié l'influence de ce cycle de vie sur le cycle du carbone, étant donné que la plupart des feux en forêt boréale tuent les arbres en place et enlèvent de la matière organique du sol. De plus, les forêts se régénèrent rapidement et cet équilibre entre les pertes et les gains de carbone doit être quantifié, afin d'en calculer l'effet net. Deux périodes peuvent être prises en considération, soit la période d'émission de carbone par la combustion, et la période de rétablissement pendant laquelle la nouvelle forêt se développe.

Les émissions de carbone lors de la combustion

Le feu s'accompagne de grandes émissions de carbone par le processus de la combustion. La quantité de carbone ainsi émise dans l'atmosphère peut être très variable d'un feu à l'autre, et dépend du type de forêt, des conditions d'humidité et de la nature de l'incendie lui-même. Généralement, la mince couverture de matière organique sèche au sol est complètement brûlée, tout comme les feuilles et les petites branches des arbres. Les troncs des arbres préalablement vivants

ne brûlent généralement pas et peuvent rester sur pied pendant plusieurs années (Figure 1). Au Canada, les pertes de carbone par combustion lors d'un feu sont, en moyenne, de 15 t/ha. Cette quantité peut toutefois être beaucoup plus importante lorsqu'un feu survient dans une région où le sol organique est très épais et où les conditions sont sèches. Un feu qui survient à la fin de l'été émet généralement plus de carbone qu'au printemps, puisque les conditions sont plus sèches.

Au Canada, les pertes de carbone par combustion lors d'un feu sont, en moyenne, de 15 t/ha.

Dynamique du carbone dans une jeune forêt après feu

Suite à un incendie, la décomposition de la végétation résiduelle morte émet du carbone par respiration. Cette respiration, effectuée par les organismes hétérotrophes, surpasse tous les gains de carbone réalisés par la photosynthèse de la nouvelle végétation en croissance. Cependant, dans plusieurs forêts, l'envahissement par des espèces pionnières ou des plantes adaptées au feu se fait rapidement. La vitesse de rétablissement du bilan de carbone dépend de la gravité de l'incendie, du type de forêt et des conditions environnementales. En forêt boréale, nous avons mesuré les flux de carbone annuels de plusieurs chronoséquences de forêts après feu. Les données recueillies par nos tours de flux indiquent qu'une forêt peut émettre du carbone pendant les 5 à 10 premières années après un feu, alors qu'elle peut par la suite devenir un puits net de carbone (Figure 2). Cependant, nous avons également constaté qu'une seconde période d'émission de carbone peut survenir lorsque les troncs des arbres morts au cours du feu tombent au sol et commencent à se décomposer (Figure 3). Si nous extrapolons et intégrons la courbe de la Figure 2, nous obtenons une accumulation nette de 15 t C/ha à environ 30 ans, ce qui compense la perte moyenne de carbone provoquée par la combustion directe lors d'un feu. Bien que cette affirmation signifie qu'une forêt qui connaît un intervalle de feu supérieur à 30 ans représente un puits net de carbone, une fréquence de feu plus élevée change la structure de la forêt et la dynamique de son rétablissement, créant un environnement différent par rapport à ceux où nos mesures de flux ont été réalisées.

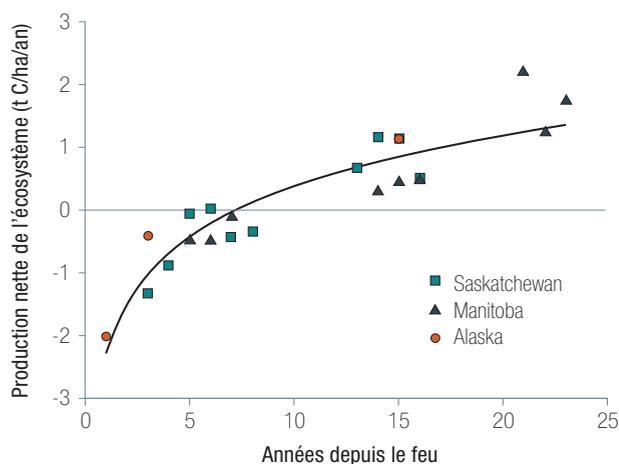


Figure 2. Séquestration/émission annuelle nette de carbone (production nette de l'écosystème) pour trois chronoséquences après feu en forêt boréale. Une valeur positive indique une séquestration de carbone alors qu'une valeur négative indique une émission de carbone. La courbe est la régression présentant la meilleure adéquation avec les données affichées.

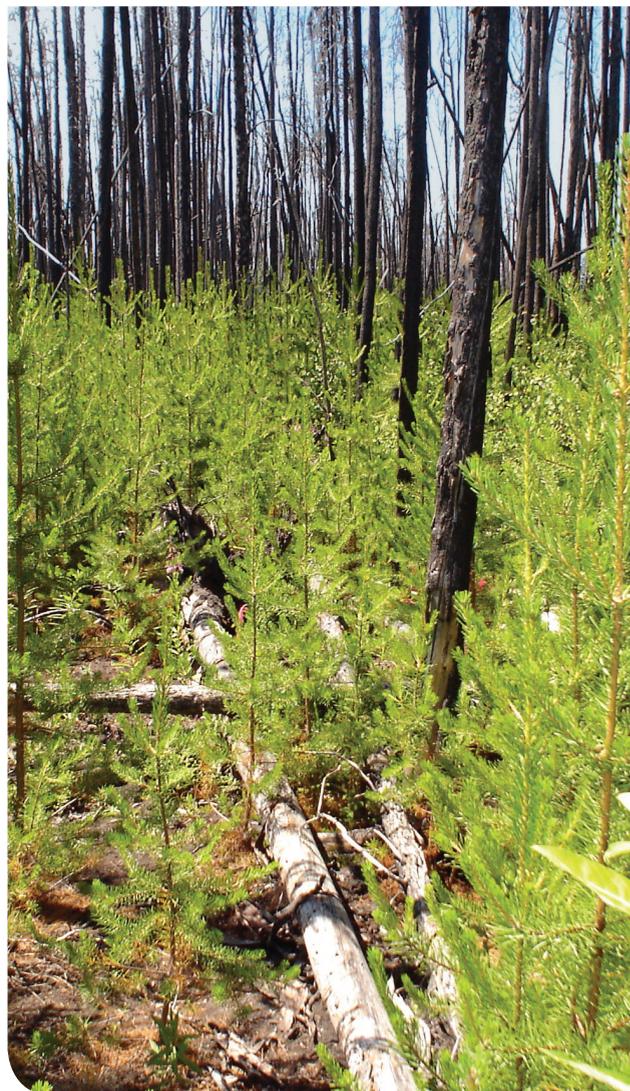


Figure 3. Jeune forêt de la Saskatchewan en rétablissement suite à un feu. La photo a été prise sept ans après l'incendie. La forte croissance des jeunes pins gris s'effectue parmi les chicots et les troncs d'arbres morts couchés au sol.

Les données recueillies par nos tours de flux indiquent qu'une forêt peut émettre du carbone pendant les 5 à 10 premières années après un feu, alors qu'elle peut par la suite devenir un puits net de carbone.

Pour plus d'informations, veuillez contacter M. Brian Amiro (brian_amiro@umanitoba.ca)



Quel est l'impact d'une épidémie d'insectes ravageurs sur le bilan de carbone d'une forêt ?

Les insectes jouent un rôle clé au sein des écosystèmes forestiers. Toutefois, ils peuvent altérer l'habitat faunique, causer des dommages économiques importants et nuire au bilan de carbone. Les épidémies d'insectes influencent la séquestration du carbone par la forêt, diminuant la photosynthèse de l'écosystème (PBE) et provoquant l'augmentation de la respiration de l'écosystème (RE). Au Canada, le dendroctone du pin ponderosa (DPP), la livrée des forêts et la tordeuse des bourgeons de l'épinette sont responsables de la majorité des épidémies d'insectes qui engendrent annuellement une plus grande mortalité chez les arbres que les coupes forestières ou les feux de forêts. La récente épidémie de DPP survenue en Colombie-Britannique (CB) est sans précédent en termes de mortalité arborescente et de superficie touchée. Elle pourrait sévèrement affecter le bilan de carbone des forêts de la CB et potentiellement celui des forêts situées à l'est des montagnes Rocheuses si l'infestation se propage. Le pin tordu, principal hôte de l'insecte, se trouve partout dans la région de l'intérieur de la CB. Des relevés aériens réalisés en 2009 ont révélé qu'environ 9 M d'hectares étaient affectés par le dendroctone, ce qui représente une baisse par rapport au sommet de 10 M d'hectares atteint en 2007.

Des mesures de flux de carbone ont été réalisées dans deux peuplements de pin tordu situés dans la région de l'intérieur de la CB.

Au Canada, le dendroctone du pin ponderosa (DPP), la livrée des forêts et la tordeuse des bourgeons de l'épinette sont responsables de la majorité des épidémies d'insectes qui engendrent annuellement une plus grande mortalité chez les arbres que les coupes forestières ou les feux de forêts.

Le peuplement MPB-06, âgé de 85 ans, fût attaqué en 2006. En 2010, seulement 16% des arbres étaient toujours en santé (Figure 1). Le peuplement MPB-03, âgé de 110 ans, fût attaqué pour la première fois en 2003, et, en 2007, il y avait plus de 95% de mortalité dans la canopée. Ces deux peuplements ont affiché une résilience considérable face aux épidémies du DPP. Après avoir émis 0,8 t C/ha l'année suivant l'attaque, le peuplement MPB-06 a séquestré 0,6 t C/ha trois ans plus tard, alors que le peuplement MPB-03 a oscillé entre une faible séquestration et une faible émission de carbone au cours des années suivant l'attaque (Tableau 1). Alors que MPB-06 fût une source modérée de carbone pendant les deux premières années après l'attaque, la végétation et les arbres toujours vivants ont affiché une vigueur accrue au cours des troisième et quatrième années, résultant en une augmentation de la PBE et une séquestration nette de carbone. Pour le peuplement MPB-03, aucune mesure n'a été réalisée avant la quatrième année suivant l'épidémie, année au cours de laquelle le site fût une source de carbone. Bien que ce site ait séquestré de faibles quantités de carbone au cours des deux années suivantes, il est devenu une source de carbone sept ans après la perturbation à

Tableau 1. Séquestration/émission annuelle nette de carbone (production nette de l'écosystème) de deux peuplements de pin tordu en Colombie-Britannique ayant subi une épidémie du dendroctone du pin ponderosa. Une valeur positive indique une séquestration de carbone alors qu'une valeur négative indique une émission de carbone. MPB-06 a été attaqué en 2006 et MPB-03 en 2003.

| Année | Production nette de l'écosystème (t C/ha/an) | |
|-------|--|--------|
| | MPB-06 | MPB-03 |
| 2007 | -0,8 | -0,6 |
| 2008 | -0,5 | 0,03 |
| 2009 | 0,1 | 0,06 |
| 2010 | 0,6 | -0,3 |



Figure 1. Photographies du couvert forestier montrant la progression de l'attaque du dendroctone du pin ponderosa au site MPB-06 en Colombie-Britannique. L'épidémie a commencé en août 2006, le peuplement entrait ainsi dans le stade vert de l'attaque. Le stade rouge est survenu en 2007, le stade rouge-gris en 2008 et le stade gris (arbres morts) en 2010.

la suite d'une sécheresse (Tableau 1). Malgré une diminution rapide de la proportion d'arbres sains au site MPB-06 en 2007 et 2008 (Figure 1), et une mortalité presque complète du couvert forestier au site MPB-03, la végétation et les arbres toujours vivants ont semblé bénéficier d'une plus faible compétition pour les nutriments et l'eau et d'une augmentation du rayonnement solaire atteignant les niveaux inférieurs du couvert forestier et le sous-bois. D'autres études suggèrent que les arbres qui survivent connaissent une croissance rapide pendant des décennies, jusqu'à ce que la canopée se referme et que la compétition limite la croissance annuelle. Il faut plusieurs années pour que les arbres morts tombent au sol et commencent à se décomposer. Ce phénomène entraîne une augmentation de la RE, ce qui annule en partie les effets positifs de l'augmentation de la PBE sur la séquestration du carbone.

Les évaluations de l'impact régional de l'épidémie du DPP en CB diffèrent quelque peu de nos observations. Une étude par modélisation réalisée par le Service canadien des forêts a montré que l'impact de l'épidémie a atteint son sommet en 2009 avec des émissions régionales de 0,5 t C/ha/an, comparativement à une séquestration légère avant la perturbation. Des études par télédétection réalisées de 2002 à 2005 sur la zone d'infestation ont montré une diminution de 10 à 20 % de la PBE par rapport aux niveaux pré-épidémiques. Ces résultats divergents obtenus par ces différentes approches soulignent l'importance de la prise de mesures directes des flux de carbone à l'échelle du peuplement, ainsi que l'utilisation des autres techniques, afin d'étudier le rétablissement à l'échelle du paysage suite à l'épidémie du DPP.



Comment le bilan de carbone des plantations forestières diffère-t-il de celui des forêts naturelles ?

Une grande proportion des forêts du nord-est des États-Unis et du Canada sont des plantations forestières qui occupent d'anciennes terres agricoles ou abandonnées. La plupart de ces forêts, qui sont à différents stades de développement, ont des niveaux de séquestration (puits) ou d'émission (source) de carbone qui diffèrent de ceux des forêts issues de la régénération naturelle. Le niveau de séquestration ou d'émission de carbone dépend du stade de développement, des espèces arborescentes présentes, des éléments nutritifs dans le sol, du régime de gestion et, surtout, du climat de la région où la forêt se développe. Des mesures de flux de CO₂ réalisées dans des plantations de pins blancs (*Pinus strobus* L.) d'âges différents (7, 20, 35 et 70 ans) à Turkey Point, dans le sud de l'Ontario, suggèrent que les plantations atteignent le maximum de séquestration environ 30 ans plus tôt que les peuplements régénérés naturellement, qui atteignent généralement le maximum de séquestration entre l'âge de 50 et 70 ans (Figure 1). Ces plantations de 7, 20, 35 et 70 ans ont, respectivement, séquestré 0,66, 7,36, 3,92 et 1,24 t C/ha, entre 2005 et 2008. L'interpolation de ces résultats permet d'estimer une séquestration nette totale de carbone de 229 t/ha au cours des 70 premières années suite à une plantation de ce type.

L'allocation du carbone entre les feuilles, les tiges et les racines dans les plantations évolue rapidement au cours du développement

Des mesures de flux de CO₂ réalisées dans des plantations de pins blancs (*Pinus strobus* L.) d'âges différents (7, 20, 35 et 70 ans) à Turkey Point, dans le sud de l'Ontario, suggèrent que les plantations atteignent le maximum de séquestration environ 30 ans plus tôt que les peuplements régénérés naturellement, qui atteignent généralement le maximum de séquestration entre l'âge de 50 et 70 ans

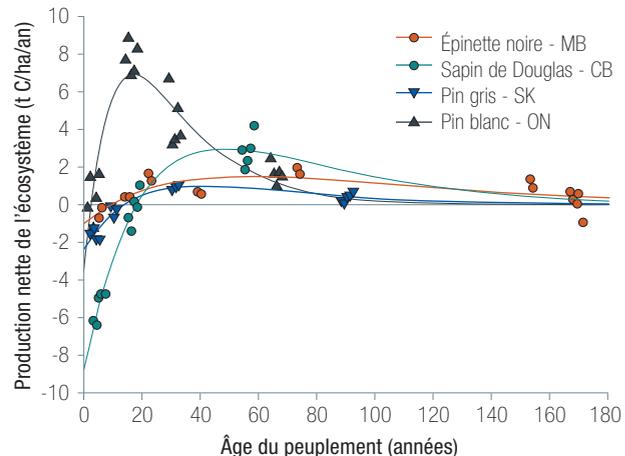


Figure 1. Chronoséquence de la production annuelle nette de l'écosystème de forêts naturelles (épinette noire, sapin de Douglas, pin gris) et de plantation (pin blanc) en fonction de leur âge. Une valeur positive indique une séquestration nette de carbone alors qu'une valeur négative indique une émission nette de carbone sur une base annuelle.

du peuplement. Des mesures de la dimension des arbres et de la croissance annuelle des tiges ont indiqué que la production de bois de tige par les arbres représente 27% de la biomasse totale des arbres dans le peuplement âgé de 7 ans par rapport à

55% dans le peuplement de 70 ans (Figure 2a). De plus, la contribution du feuillage à la biomasse totale diminue avec l'âge du peuplement, passant de 34% chez le plus jeune peuplement à 2% chez le plus vieux. Le développement des branches est considérable chez les peuplements de 20 et 35 ans, représentant, respectivement,



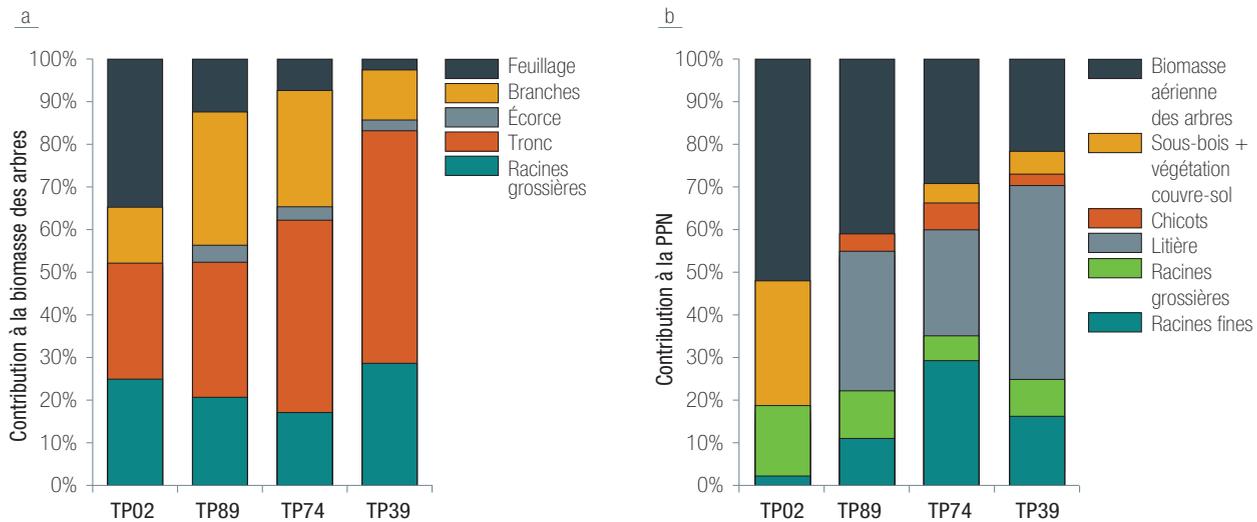


Figure 2. Contribution relative moyenne des différentes composantes (a) de la biomasse des arbres et (b) de la productivité primaire nette (PPN) chez les sites âgés de 7 (TP02), 20 (TP89), 35 (TP74) et 70 (TP39) ans.

33% et 27% de la biomasse. La contribution de la production de biomasse aérienne des arbres à la production primaire nette (PPN, production annuelle totale de biomasse) diminue avec l'âge du peuplement, passant de 51% chez le peuplement de 7 ans à 21% chez le peuplement de 70 ans (Figure 2b). La croissance de la végétation couvre-sol dans le peuplement de 7 ans (30% de la PPN) et la litière chez les trois plus vieux sites (25 à 46% de la PPN) sont d'autres éléments importants de la PPN

Les changements climatiques peuvent considérablement affectés la séquestration du carbone des plantations et des forêts naturelles. Les mesures de flux réalisées à Turkey Point suggèrent que, contrairement aux forêts dans le nord canadien, le taux de séquestration du carbone diminue avec une augmentation de la température en saison de croissance. Une sécheresse en début de saison de croissance qui survient avec une vague de chaleur pendant l'été (comme en 2005) ou une sécheresse qui survient en été (comme en 2007) réduit l'absorption nette de carbone d'environ 0,5 à 1,5 t/ha dans les forêts jeunes et matures, engendrant la

Les mesures de flux réalisées à Turkey Point suggèrent que, contrairement aux forêts dans le nord canadien, le taux de séquestration du carbone diminue avec une augmentation de la température en saison de croissance.

neutralité carbonique chez les peuplements matures. Une étude expérimentale conduite en 2009 a suggéré qu'une sécheresse sévère en début de saison de croissance, en l'absence de stress thermique, peut causer à elle seule une réduction de la séquestration annuelle nette de carbone de 17% au site mature âgé de 70 ans. De plus, l'accroissement annuel du diamètre de la tige est fortement corrélé aux changements dans les précipitations annuelles (Figure 3). Les sécheresses et les stress thermiques influencent essentiellement la photosynthèse, plutôt que la respiration de l'écosystème.



Pour plus d'informations, veuillez contacter M. M. Altaf Arain (arainm@mcmaster.ca)



Les tourbières et le cycle du carbone

Publications suggérées pour lectures complémentaires

- Adkinson, A.C., K.H. Syed, L.B. Flanagan. 2011. Contrasting responses of ecosystem CO₂ exchange to variation in temperature and water table depth in two peatlands in northern Alberta, Canada. *Journal of Geophysical Research-Biogeosciences* 116, G01004, doi: 10.1029/2010JG001512.
- Dimitrov, D.D., R.F. Grant, P.M. Lafleur, E. Humphreys. 2010. Modelling the effects of hydrology on ecosystem respiration at Mer Bleue bog. *Journal of Geophysical Research-Biogeosciences* 115, G04043, doi:10.1029/2010JG001312.
- Dimitrov, D.D., R.F. Grant, P.M. Lafleur, E. Humphreys. 2010. Modelling subsurface hydrology of Mer Bleue bog. *Soil Science Society of America Journal* 74: 680-694.
- Dimitrov, D.D., R.F. Grant, P.M. Lafleur, E. Humphreys. 2010. Modelling peat thermal regime of an ombrotrophic peatland with hummock-hollow microtopography. *Soil Science Society of America Journal* 74: 1406-1425.
- Flanagan, L.B., K.H. Syed. 2011. Stimulation of both photosynthesis and respiration in response to warmer and drier conditions in a boreal peatland ecosystem. *Global Change Biology* 17, doi: 10.1111/j.1365-2486.2010.02378.x.

- Long, K.D., L.B. Flanagan, T. Cai. 2010. Diurnal and seasonal variation in methane emissions in a northern Canadian peatland measured by eddy covariance. *Global Change Biology* 16: 2420-2435, doi:10.1111/j.1365-2486.2009.02083.x.
- Roulet N.T., P.M. Lafleur, P.J.H. Richard, T.R. Moore, E.R. Humphreys, J. Bubier. 2007. Comparison of a six year contemporary carbon balance and the carbon accumulation for the last 3,000 years for a northern peatland. *Global Change Biology* 13: 397-411.
- Sonnentag, O., J.M. Chen, N.T. Roulet, W. Ju, A. Govind, 2008. Spatially explicit simulation of peatland hydrology and carbon dioxide exchange: The influence of topography. *Journal of Geophysical Research-Biogeosciences* 113, G02005, doi: 10.1029/2007JG000605.
- Wu, J., N.T. Roulet, T.R. Moore, P. Lafleur, E. Humphreys. 2011. Dealing with microtopography of an ombrotrophic bog for simulating ecosystem-level CO₂ exchanges. *Ecological Modelling* 222: 1036-1047.



Les tourbières canadiennes, absorbent-elles
ou émettent-elles du carbone ? 20

Les émissions de méthane des tourbières
contre-balancent-elles leur séquestration de carbone ? 22



Les tourbières canadiennes, absorbent-elles ou émettent-elles du carbone ?

Les tourbières occupent environ 13% de la superficie terrestre du Canada et sont principalement réparties dans les régions boréales et subarctiques. Malgré leur étendue relativement faible, elles contiennent environ 60% du carbone total stocké dans les sols canadiens. La datation par le radiocarbone des dépôts sédimentaires basaux montre que ce carbone (sous forme de végétation décomposée) s'est accumulé lentement au cours des 5 000 à 8 000 dernières années. Nous savons que les tourbières du nord sont des puits de CO₂ atmosphérique depuis longtemps. Cependant, le réchauffement climatique récent risque fortement d'influencer ces écosystèmes et nous devons nous poser la question – les tourbières sont-elles toujours des puits de carbone, et comment se comporteront-elles dans un climat futur en perpétuel changement ?

Les stations de flux situées en tourbière dans l'est et dans l'ouest canadien (EPFS et WPFS, respectivement) ont été mises sur pied afin d'étudier les échanges de carbone entre les tourbières et l'atmosphère. Le site WPFS, situé au centre de l'Alberta, est une tourbière minérotrophe boisée où la nappe phréatique se situe près de la surface et où l'eau se déplace latéralement en transportant les nutriments. En revanche, le site EPFS est une tourbière ombrotrophe (Mer Bleue, près d'Ottawa, ON) qui possède une nappe phréatique plus profonde et qui n'est alimentée en eau et en nutriments que par les précipitations atmosphériques. Les années de mesures réalisées à ces deux sites révèlent que ces tourbières sont des puits de carbone sur une base annuelle. Le site EPFS affiche une plus grande variabilité, allant d'un bilan neutre à une séquestration de 1,5 t C/ha/an. De 2004 à 2009, la tourbière

Les années de mesures réalisées à ces deux sites révèlent que ces tourbières sont des puits de carbone sur une base annuelle.

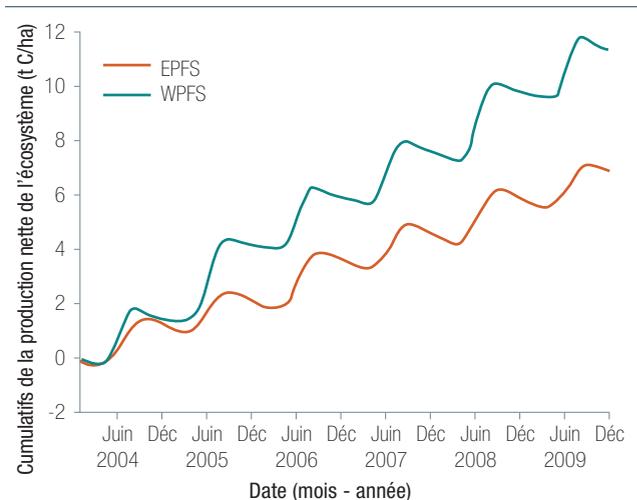


Figure 1. Cumulatifs de la séquestration nette de carbone (PNE, production nette de l'écosystème) de 2004 à 2009 à la tourbière de l'ouest en Alberta (WPFS) et à la tourbière de l'est en Ontario (EPFS). Les périodes d'augmentation et de légère diminution représentent, d'une part, la séquestration de carbone par l'écosystème au cours de la saison de croissance et, d'autre part, les émissions de carbone au cours de la saison de dormance (hiver). D'un point de vue global, les deux tourbières ont séquestré du CO₂ atmosphérique au cours de cette période d'étude.

minérotrophe a séquestré un total de 11,3 t C/ha et la tourbière Mer Bleue a séquestré 6,9 t C/ha (Figure 1). La différence considérable entre ces deux tourbières s'explique par les différents mécanismes d'approvisionnement en nutriments et le type de végétation dominante. Le site WPFS est moins acide et possède un couvert forestier dense (composé d'épinettes et de mélèzes), ce qui le rend plus productif que le site EPFS. Au cours des 50 dernières années, un changement au niveau de la succession végétale s'est produit au site WPFS, possiblement en réponse au réchauffement et au climat plus sec qui ont engendré un environnement plus favorable à la croissance des arbres, améliorant ainsi la productivité et la séquestration de carbone. D'autre part, l'analyse des carottes de

tourbe de la tourbière Mer Bleue a révélé que cette dernière persiste sous sa forme actuelle depuis des siècles. Ses petits arbustes et sa couverture de mousse sont adaptés à l'environnement très acide qui limite l'invasion par des espèces végétales plus productives. Ce caractère permet à la tourbière de résister aux changements externes.

La variabilité interannuelle de la séquestration de carbone fournit quelques indices sur l'avenir possible de ces puits de carbone. Au site EPFS, les sécheresses qui se produisent tous les 5 à 7 ans provoquent une réduction de la séquestration de carbone jusqu'à près de la neutralité. Une augmentation de la fréquence des sécheresses dans le futur aura un effet considérable sur l'absorption du carbone à ce site. À l'inverse, une diminution constante de la nappe phréatique au site WPFS n'a pas provoqué une plus faible séquestration de carbone. Au contraire, la photosynthèse et la respiration de l'écosystème ont augmenté, sans toutefois entraîner de changement au niveau de la séquestration observée sur une période de quatre ans. Les impacts des changements climatiques à ce site seront probablement plus complexes et dépendront de la succession végétale et de l'évolution de la nappe phréatique (diminution, stabilisation ou augmentation). Des processus similaires à travers le Canada, dans des tourbières minérotrophes boisées et des tourbières ombrotrophes, pourraient permettre à l'ensemble des tourbières de demeurer un important puits de carbone.

De 2004 à 2009, la tourbière minérotrophe a séquestré un total de 11,3 t C/ha et la tourbière Mer Bleue a séquestré 6,9 t C/ha

Pour plus d'informations, veuillez contacter M. Larry Flanagan (larry.flanagan@uleth.ca) ou M. Peter Lafleur (plafleur@trentu.ca)

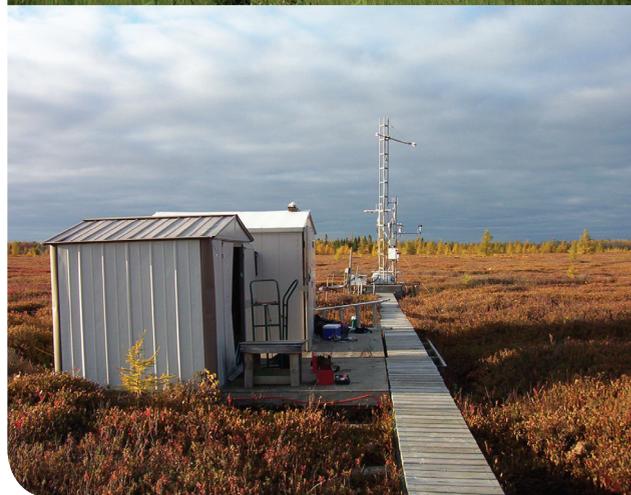
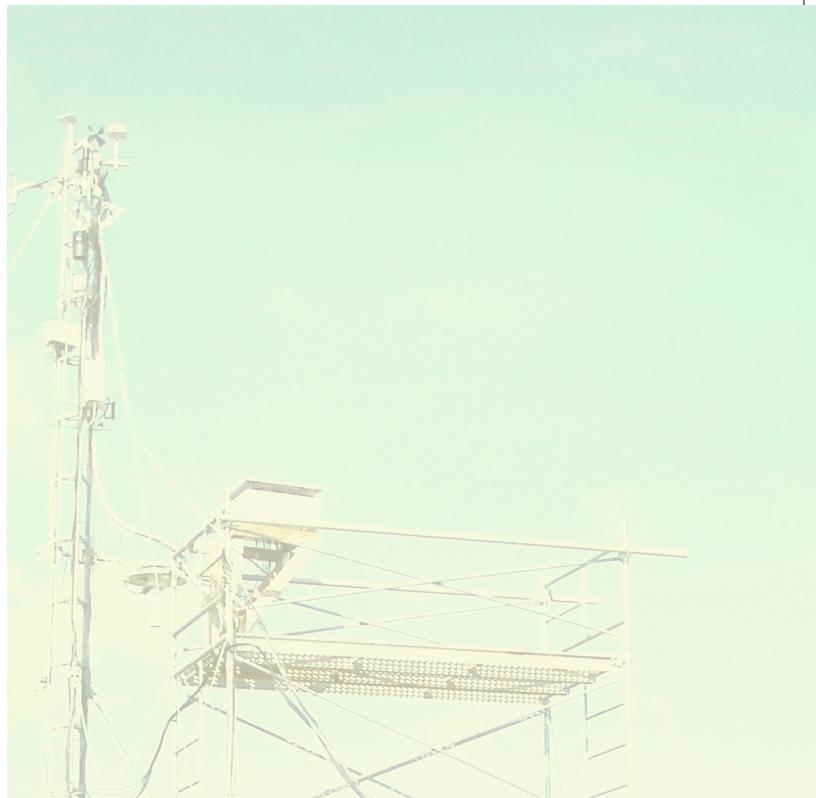


Figure 2. Tours de flux de la tourbière de l'ouest (photo du haut) et de la tourbière de l'est (photo du bas).



Les émissions de méthane des tourbières contre-balancent-elles leur séquestration de carbone ?

Les émissions mondiales de méthane (CH_4) provenant de sources naturelles (milieux humides, termites et océans) équivalent à environ 225 Tg CH_4/an , ce qui représente approximativement 37 % de l'ensemble des émissions terrestres de méthane. Selon les estimations, les milieux humides des latitudes nordiques libèrent entre 6 et 40 Tg CH_4/an . La magnitude de ces émissions peut influencer significativement le budget de carbone total de certains écosystèmes nordiques, dont les milieux humides et les tourbières. Sur une base moléculaire, le méthane possède un potentiel de réchauffement global (PRG), envisagé sur une période de 100 ans, qui est 25 (g/g) ou 9,1 (mol/mol) fois plus élevé que le CO_2 . Par conséquent, il est important de mesurer et de comprendre les taux relatifs d'échanges de CO_2 et de méthane dans le calcul du bilan de carbone des tourbières.

Comparativement aux taux de séquestration de CO_2 et aux taux d'émission de méthane mesurés simultanément dans d'autres tourbières boréales, les taux d'émission de méthane mesurés dans les tourbières des stations de flux WPFS (située dans l'ouest canadien) et EPFS (située dans l'est canadien) étaient relativement bas. Par exemple, dans la tourbière minérotrophe du site WPFS, la quantité totale de carbone libéré sous forme de méthane de la fin mai à la fin septembre 2007 était de 0,024 t/ha. En revanche, le taux de séquestration nette de carbone pour la même période était relativement élevé, soit 2,2 t/ha. Cependant, 2007 fût une année relativement sèche au site WPFS, et la perte de carbone par les émissions de méthane pourrait être plus importante au cours des années où la nappe phréatique est plus élevée. Dans la tourbière ombrotrophe du site EPFS, la perte moyenne de carbone

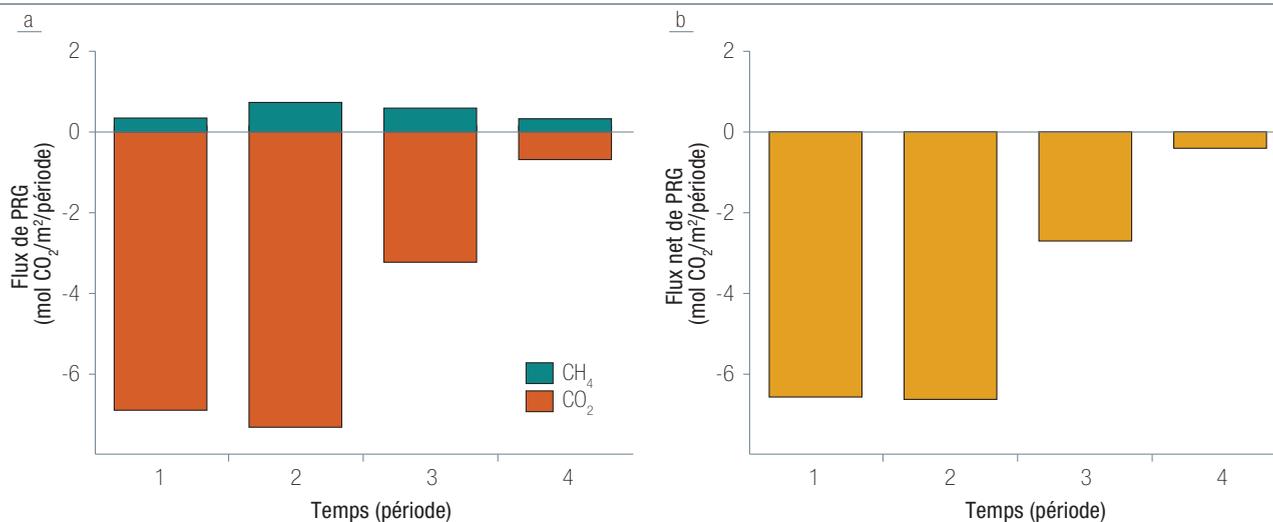


Figure 1. Comparaison des variations saisonnières en 2007 dans la tourbière de la station de flux WPFS (située dans l'ouest canadien) pour : (a) le potentiel de réchauffement global (PRG) du méthane et du CO_2 , et (b) le PRG net. Les flux net de PRG représentent la somme des flux de PRG du méthane et du CO_2 . Un flux positif indique une perte de la part de la tourbière. Les flux de PRG ont été exprimés en équivalents CO_2 (sur une période de 100 ans, où l'effet du méthane équivaut à 9,1 fois l'effet du CO_2 , sur une base moléculaire) et ont été calculés à partir des données de flux de méthane. Les périodes représentent les intervalles suivants : (1) fin mai à fin juin (jours 144 - 180), (2) ~juillet (jours 181 - 215); (3) ~août (jours 216 - 244) et (4) septembre (jours 245 - 269).



par émission de méthane était de 0,037 t/ha/an. Ce taux d'émission est considérablement plus faible que le taux annuel moyen de séquestration de carbone (0,6 t/ha/an) mesuré à ce site pour la période 1998-2009. Par ailleurs, des taux significativement plus élevés d'émission de méthane (0,09 à 0,14 t C/ha/an) ont été enregistrés dans des tourbières situées dans le nord de la Suède.

Le taux d'émission de méthane du site WPFS, lorsqu'exprimé en unités d'équivalent CO_2 , c'est-à-dire en prenant en considération le PRG de ces deux gaz, équivaut à 10 % du taux de séquestration de CO_2 d'une saison de croissance (Figure 1). Les calculs du PRG des tourbières doivent tenir compte du fait que ces dernières sont simultanément et continuellement des sources de méthane et des puits de CO_2 . Une analyse approfondie montre que l'effet de refroidissement (i.e. PRG négatif) d'une tourbière est proportionnel à la quantité totale de carbone accumulé dans la tourbière (épaisseur de la tourbe) tout au long de son développement (en milliers d'années), alors que l'effet de réchauffement (i.e. PRG positif) est proportionnel aux taux d'émission de méthane des dernières décennies (environ 50 ans), puisque le méthane a une plus courte durée de vie dans l'atmosphère. Après une cinquantaine d'années, l'effet du méthane se stabilise, alors que l'effet de refroidissement du carbone séquestré demeure, ce qui compense le réchauffement initial induit par l'émission de méthane.

L'effet de refroidissement (i.e. PRG négatif) d'une tourbière est proportionnel à la quantité totale de carbone accumulé dans la tourbière (épaisseur de la tourbe) tout au long de son développement (en milliers d'années), alors que l'effet de réchauffement (i.e. PRG positif) est proportionnel aux taux d'émission de méthane des dernières décennies (environ 50 ans)

Au site WPFS, il a été estimé que les émissions totales de méthane de la tourbière au cours des 50 dernières années (3,2 t CH_4 /ha) auraient provoqué un effet de réchauffement équivalent à environ $42 \times 10^{-15} \text{ W/m}^2$. En revanche, la quantité totale de carbone qui s'est accumulée dans la tourbière au cours des 2 200 dernières années est d'environ 510 t C/ha, ce qui aurait provoqué un effet de refroidissement équivalent à environ $101 \times 10^{-15} \text{ W/m}^2$. Ces estimations montrent que l'effet de refroidissement induit par la séquestration de CO_2 a contré l'effet de réchauffement induit par les émissions de méthane, résultant en un effet de refroidissement net de $59 \times 10^{-15} \text{ W/m}^2$ au cours du développement de la tourbière de l'ouest.

Pour plus d'informations, veuillez contacter M. Larry Flanagan (larry.flanagan@uleth.ca)



Le cycle du carbone aux échelles régionale, nationale et mondiale

Publications suggérées pour lectures complémentaires

- Arain, M.A., F. Yuan, T.A. Black. 2006. Soil-plant nitrogen cycling modulated carbon exchanges in a western temperate conifer forest in Canada. *Agricultural and Forest Meteorology* 140 : 171-192.
- Beer, C., M. Reichstein, E. Tomelleri, P. Ciais, M. Jung, N. Carvalhais, C. Rödenbeck, M.A. Arain, D. Baldocchi, G.B. Bonan, A. Bondeau, A. Cescatti, G. Lasslop, A. Lindroth, M. Lomas, S. Luyssaert, H.A. Margolis, K.W. Oleson, O. Rouspard, E. Veenendaal, N. Viovy, C. Williams, F.I. Woodward, D. Papale. 2010. Terrestrial gross carbon dioxide uptake : global distribution and co-variation with climate. *Science* 329 : 834-838.
- Bernier, P.Y., L. Guindon, W.A. Kurz, G. Stinson. 2010. Reconstructing and modelling 71 years of forest growth in a Canadian boreal landscape : a test of the CBM-CF3S carbon accounting model. *Canadian Journal of Forest Research* 40 : 109-118.
- Govind, A., J.M. Chen, H. Margolis, W. Ju, O. Sonntag, M. Giasson. 2009. A spatially explicit hydro-ecological modeling framework (BEPS-TerrainLab V2.0) : Model description and test in a boreal ecosystem in eastern North America. *Journal of Hydrology* 367 : 200-216.
- Grant, R.F., A.G. Barr, T.A. Black, H.A. Margolis, J.H. McCaughey, J.A. Trofymow. 2010. Net ecosystem productivity of temperate and boreal forests after clearcutting – a Fluxnet-Canada synthesis. *Tellus B*, 62 : 475-496.
- Grant, R.F., R.S. Jassal, T.A. Black, C. Bruemmer. 2010. Changes in net CO₂ and N₂O exchange with fertilization of Douglas fir : mathematical modelling in ecosys. *Journal of Geophysical Research* 115, G04009, doi:10.1029/2009JG001094.
- Hilker, T., N.C. Coops, C. Schwalm, R.S. Jassal, T.A. Black, P. Krishnan. 2008. Effects of mutual shading of tree crowns on prediction of photosynthetic light use efficiency in a coastal Douglas-fir Forest. *Tree Physiology*, 28, 825-834.

- Hilker, T., N.C. Coops, S. Coggins, M.A. Wulder, M. Brown, T.A. Black, Z. Nasic, D. Lessard. 2009. Detection of foliage conditions and disturbance from multi-angular high spectral resolution remote sensing. *Remote Sensing of Environ.* 113 : 421-434.
- Ju, W., J.M. Chen, T.A. Black, A.G. Barr, H. McCaughey, N.T. Roulet. 2010. Spatially explicit modelling of coupled water and carbon cycles in Canada's forests and wetlands. *Tellus* doi:10.1111/j.1600-0889.2010.00459.x.
- Piao, S., P. Ciais, P. Friedlingstein, P. Peylin, M. Reichstein, S. Luyssaert, H. Margolis, J. Fang, A. Barr, A. Chen, A. Grelle, D. Hollinger, T. Laurila, A. Lindroth, A. Richardson, T. Vesala. 2008. Net carbon dioxide losses of northern ecosystems in response to autumn warming. *Nature* 451 : 49-53.
- Ponton, S., L.B. Flanagan, K.P. Alstad, B.G. Johnson, K. Morgenstern, N. Kijun, T.A. Black, A.G. Barr. 2006. Comparison of ecosystem water-use efficiency among Douglas fir forest, aspen forest and grassland using eddy covariance and carbon isotope techniques. *Global Change Biology* 12 : 294-310.
- Yuan, F., M.A. Arain, A.G. Barr, T.A. Black, C.P.-A. Bourque, C. Coursolle, H.A. Margolis, J.H. McCaughey, S.C. Wofsy. 2008. Modeling analysis of primary controls on net ecosystem productivity of seven boreal and temperate coniferous forests across an east-west continental transect in Canada. *Global Change Biology* 14 : 1-20, doi : 10.1111/j.1365-2486.2008.01612.x.
- Zhang, Q.-Y., E.M. Middleton, H.A. Margolis, G.G. Drolet, A.G. Barr, T.A. Black. 2009. Can a satellite-derived estimate of the fraction of PAR absorbed by chlorophyll (FAPARchl) improve predictions of light-use efficiency and ecosystem photosynthesis for a boreal aspen forest? *Remote Sensing of Environment* 113 : 880-888.



Comment les mesures de flux et les mesures météorologiques et biophysiques permettent-elles d'améliorer la représentation des processus de surface dans les modèles climatiques? 26

Les concentrations atmosphériques des gaz à effet de serre (GES), que nous disent-elles sur les sources et les puits régionaux au Canada? 28

Comment avons-nous utilisé les données des tours de flux et des tours de grande taille pour estimer la distribution nord-américaine des sources et des puits de carbone? 30

Comment les tours de flux nous aident-elles à comprendre le budget mondial du carbone? 32



Comment les mesures de flux et les mesures météorologiques et biophysiques permettent-elles d'améliorer la représentation des processus de surface dans les modèles climatiques?

Les données de flux d'énergie, de vapeur d'eau et de carbone et les données météorologiques et biométriques amassées aux sites du PCC/RRFC ont été utilisées pour aider à étendre et tester le schéma canadien de surface terrestre (modèle CLASS, 'Canadian Land Surface Scheme'). Le modèle CLASS, développé par Environnement Canada, est un sous-modèle qui représente les échanges d'énergie et d'eau entre la surface terrestre et l'atmosphère dans le modèle canadien des systèmes terrestres (CanESM) et le modèle régional canadien du climat (MRCC). Les modèles climatiques sont utilisés pour simuler les changements passés et projeter les changements futurs du climat terrestre selon différents scénarios d'émissions et de concentration de CO₂, développés sur la base de différentes projections socio-économiques et de croissance démographique. Ils fournissent des jeux de données qui sont utilisés pour mener des recherches sur les impacts et l'adaptation aux changements climatiques et pour guider les politiques. Les modèles climatiques canadiens ont apporté une contribution significative aux rapports d'évaluation produits par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). Le GIEC évalue les informations scientifiques et socio-économiques pertinentes à la compréhension des impacts potentiels des changements climatiques.

Des modules décrivant la photosynthèse des plantes et la respiration des sols avaient été incorporés dans le modèle CLASS afin d'y introduire la capacité à simuler le cycle du carbone des écosystèmes

Les résultats de cette étude ont contribué à évaluer l'impact potentiel des changements climatiques futurs et/ou des variations des réserves de carbone des forêts sur l'absorption et l'émission de carbone des écosystèmes forestiers qui se développent dans différents types d'environnements à travers le Canada.

terrestres tels que les forêts, les prairies ou les cultures. Pendant le PCC, des processus biogéochimiques, tels que l'absorption d'azote par les plantes et le cycle de l'azote dans le sol ont ensuite été intégrés au modèle CLASS afin de développer un modèle couplé, portant sur les cycles du carbone et de l'azote, connu sous le nom de CN-CLASS. CN-CLASS a été utilisé afin d'étudier l'effet des variables climatiques et des réserves de carbone propres à chaque site sur la production nette de l'écosystème de sept sites forestiers du PCC à travers le Canada. Les données observées et simulées ont montré que, sur une base annuelle, les sites en forêt boréale ont été, soit près de la neutralité carbonique ou de faibles puits de carbone, séquestrant de 0,3 à 1,8 t C/ha/an, tandis que les forêts tempérées ont été des puits de carbone modérés ou forts, séquestrant de 1,5 à 5 t C/ha/an en fonction de l'âge des forêts et du régime climatique¹ (Figure 1). L'évaluation de la sensibilité du modèle a démontré que la température de l'air et la biomasse aérienne sont les principaux facteurs ayant un impact sur la séquestration annuelle de carbone des forêts canadiennes. Les résultats de cette étude ont contribué à évaluer l'impact potentiel des changements climatiques futurs et/ou des variations des réserves de carbone des forêts sur l'absorption et l'émission de carbone des écosystèmes forestiers qui se développent dans différents types d'environnements à travers le Canada. Le modèle CN-CLASS a été un outil efficace pour la synthèse et/ou l'extrapolation des mesures d'échanges de carbone de petite à plus grande échelle. Par exemple, ce modèle a été inclus dans une étude menée par le Programme nord-américain du carbone (NACP) dont l'objectif était de développer et de valider des modèles dynamiques d'écosystèmes terrestres permettant d'améliorer les estimations quantitatives des incertitudes dans les simulations des cycles du carbone et de l'eau à l'échelle régionale et à l'échelle du site.

1 Yuan, F.M., Arain, M.A., Barr, A.G., Black, T.A., Bourque, C.P.A., Coursolle, C., Margolis, H.A., McCaughey, J.H., and Wofsy, S.C. 2008. Modeling analysis of primary controls on net ecosystem productivity of seven boreal and temperate coniferous forests across a continental transect. *Global Change Biol* 14(8): 1765-1784.

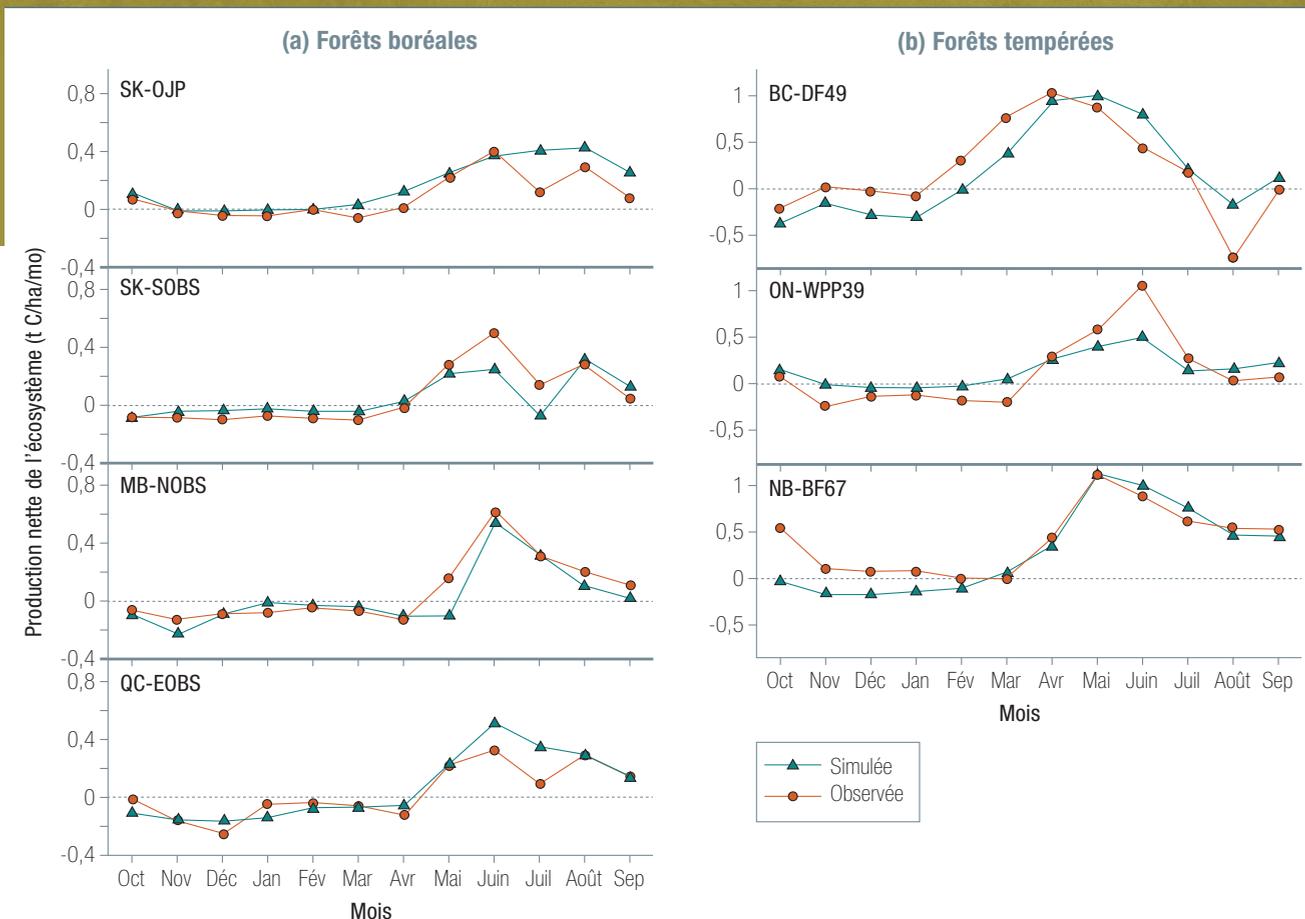


Figure 1. Production nette de l'écosystème (NEP) mensuelle simulée (CN-CLASS) et observée sur sept sites en forêts de conifères à travers le Canada. Une valeur positive indique une séquestration de carbone (puits) alors qu'une valeur négative indique une émission de carbone (source). JP : Pin gris, BS : Épinette noire, DF : Sapin de Douglas, WP : Pin blanc, BF : Sapin baumier.

Une représentation simplifiée des processus du cycle de l'azote, basée sur le modèle CN-CLASS, a récemment été incorporée dans le modèle canadien des écosystèmes terrestres (CTEM, 'Canadian Terrestrial Ecosystem Model'). Le modèle CTEM est un modèle dynamique de la végétation développé au Centre canadien de la modélisation et de l'analyse climatique d'Environnement Canada (CCmaC), qui simule les processus du cycle du carbone terrestre dans le modèle canadien des systèmes terrestres (CanESM).

L'inclusion des processus du cycle de l'azote dans le CTEM permettra de mieux évaluer l'impact d'un manque d'azote sur les écosystèmes terrestres. L'accessibilité des nutriments (et en particulier de l'azote) limite la croissance des plantes et la fixation du carbone. Des modèles couplés du cycle de l'azote et du cycle du carbone fournissent la possibilité d'étudier les réponses des écosystèmes terrestres aux futures concentrations plus élevées de CO₂ et au réchauffement du climat qui en résultera.

Pour plus d'informations, veuillez contacter M. Altaf Arain (arainm@mcmaster.ca)

Les concentrations atmosphériques des gaz à effet de serre (GES), que nous disent-elles sur les sources et les puits régionaux au Canada ?

Le Programme canadien du carbone (PCC) a contribué à l'expansion du réseau d'Environnement Canada sur les mesures des gaz à effet de serre (GES) à travers le Canada. Ces mesures de concentration déterminent le nombre de molécules de GES dans une quantité donnée d'air atmosphérique. Le dioxyde de carbone (CO_2) et le méthane (CH_4) sont les deux principaux gaz mesurés. Une carte de ce réseau est illustrée à la Figure 1. Ce réseau fournit une image complète de la distribution des GES au Canada. Le site situé dans l'Arctique, à Alert, est d'une importance internationale. De nombreux pays y mesurent les GES de façon indépendante et comparent leurs données de manière à s'assurer que leurs réseaux puissent être liés correctement de façon à obtenir un portrait global cohérent.

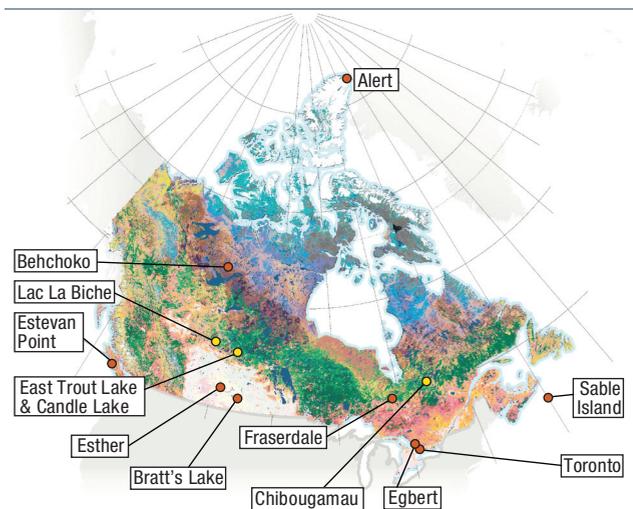


Figure 1. Emplacements des stations d'observation des gaz à effet de serre (GES) d'Environnement Canada superposés sur une carte de la couverture végétale du Canada (gracieuseté du Centre canadien de télédétection). Les trois stations indiquées par un point jaune ont été établies avec la participation de Fluxnet-Canada et du Programme canadien du carbone.

Les données de concentration des GES fournissent un point de vue à grande échelle des sources et des puits de carbone. En raison du mélange de l'air, associé aux vents, qui prend place dans l'atmosphère, l'augmentation et la diminution des concentrations des GES dans la basse atmosphère reflètent l'émission (source) et la séquestration (puits) de carbone sur une distance de plusieurs centaines de kilomètres. En d'autres mots, l'atmosphère représente une immense chambre dans laquelle les sources et les puits de GES se manifestent au fur et à mesure que les concentrations des GES changent à l'intérieur de cette chambre. Avec une précision de mesure et un recouvrement suffisants, la signature d'une région, en termes de source ou de puits de carbone, peut être détectée et quantifiée. Par exemple, les augmentations des concentrations de CO_2 présentées à la Figure 2 sont attribuables à la libération

En raison du mélange de l'air, associé aux vents, qui prend place dans l'atmosphère, l'augmentation et la diminution des concentrations des GES dans la basse atmosphère reflètent l'émission (source) et la séquestration (puits) de carbone sur une distance de plusieurs centaines de kilomètres.

de CO_2 causée par la respiration de l'écosystème au cours de l'automne et de l'hiver, alors que les diminutions sont attribuables à l'absorption photosynthétique de CO_2 par les écosystèmes au cours de la saison de croissance. Les différences entre les sites au niveau des concentrations en CO_2 (Figure 2) renseignent sur la distribution spatiale et fournissent des informations régionales relatives aux sources et aux puits naturels de carbone et aux émissions anthropiques provenant principalement de l'utilisation des combustibles fossiles.

La figure 3 offre un exemple d'une perspective à l'« échelle régionale » donnée par les mesures de concentrations atmosphériques en GES. Les concentrations mesurées à chacun des sites du PCC recouvrent

l'ensemble des régions qui sont reliées par des courants aériens et une période de temps pouvant aller jusqu'à 5 jours. Les résultats montrent que les sources de CO₂ ont le potentiel d'influencer de vastes régions couvrant plusieurs centaines de kilomètres. Aux sites Lac La Biche et East Trout Lake, les concentrations plus élevées en CO₂ sont probablement liées aux émissions associées aux activités industrielles dans les régions environnantes. À Chibougamau, les plus grandes concentrations en CO₂ observées semblent principalement liées aux émissions provenant des États-Unis.

Une perspective à l'«échelle régionale» est difficile à obtenir par d'autres types de mesures. Les tours de flux mesurent seulement les flux sur une superficie d'environ un kilomètre carré. De même, les relevés en forêt et les mesures écologiques nécessitent beaucoup de main-d'œuvre et, par conséquent, sont limités à des zones restreintes. Un objectif important des recherches effectuées par le PCC est de fusionner les données de terrain avec les données atmosphériques en utilisant des modèles informatiques afin d'obtenir une vue d'ensemble détaillée des sources et des puits de carbone et de GES à l'«échelle régionale».

Aux sites Lac La Biche et East Trout Lake, les concentrations plus élevées en CO₂ sont probablement liées aux émissions associées aux activités industrielles dans les régions environnantes. À Chibougamau, les plus grandes concentrations en CO₂ observées semblent principalement liées aux émissions provenant des États-Unis.

Connaître à l'échelle régionale les sources et les puits de GES est important, puisque :

- Une perspective à l'échelle régionale constitue un moyen de déduire les processus et les réponses à l'échelle du biome (e.g. les Prairies, les forêts boréales)
- Cette intégration à grande échelle (biome) est nécessaire afin de mieux comprendre les impacts des perturbations majeures telles que les sécheresses et les épidémies du dendroctone du pin ponderosa.

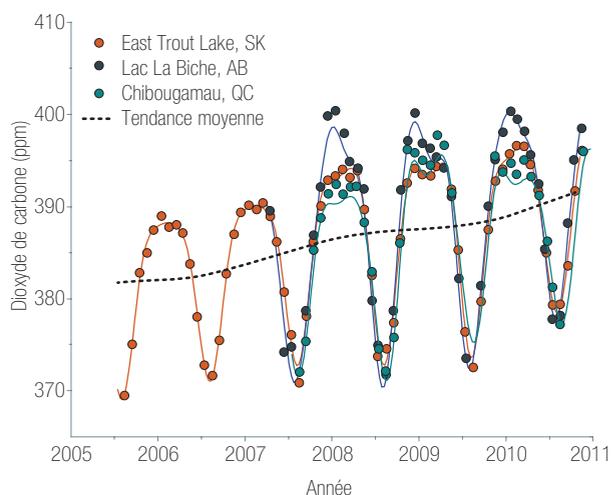


Figure 2. Concentrations mensuelles moyennes de CO₂ (ppm) calculées à partir d'observations horaires en continues réalisées à trois sites au Canada. Ces mesures montrent les distributions spatiale et temporelle des émissions de CO₂ dans l'air et fournissent des informations régionales sur les émissions et les séquestrations de carbone par la végétation et les sols ainsi que sur les émissions de CO₂ résultant de l'utilisation des combustibles fossiles. En hiver, les sites situés près des centres urbains, tel que le site Lac La Biche, sont plus susceptibles de présenter des concentrations élevées, du fait de leur situation à proximité de fortes émissions produites par des activités industrielles.

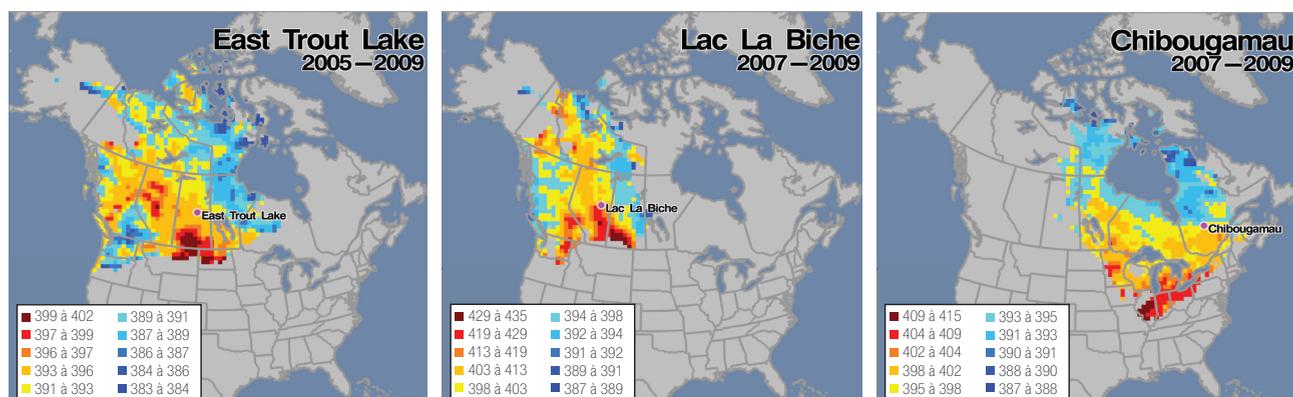


Figure 3. Analyses des mesures de concentration en CO₂ (ppm) provenant des trois sites du PCC pour la période hivernale (novembre à février). Les emplacements des sites sont indiqués par des cercles.

Pour plus d'informations, veuillez contacter M. John Lin (jl@uwaterloo.ca) ou M. Doug Worthy (doug.worthy@ec.gc.ca)

Comment avons-nous utilisé les données des tours de flux et des tours de grande taille pour estimer la distribution nord-américaine des sources et des puits de carbone ?

Les données des tours de flux et les données de concentration atmosphérique en CO_2 provenant des tours de grande taille diffèrent grandement par la taille de leurs empreintes (surface terrestre représentée par les données mesurées), qui est respectivement, d'environ 1 km^2 et 10^4 - 10^5 km^2 . Ces deux types de données peuvent être utilisés de différentes façons afin d'obtenir le bilan régional terrestre des flux de carbone et sa distribution spatiale. Développer une approche scientifique qui puisse fournir ce type d'informations à grandes échelles spatiales est essentiel afin de mieux comprendre les impacts des changements climatiques sur les écosystèmes terrestres. De telles informations sont nécessaires à la formulation et à la vérification de politiques climatiques.

Les tours de flux peuvent être considérées comme les « piquets » soutenant la distribution spatiale variable des flux de carbone. En général, les modèles processuels de l'écosystème sont utilisés pour calculer, en se basant sur des jeux de données maillées, cette distribution spatiale. Elle est ainsi fixée au « piquet » qu'est la tour de flux, ce qui signifie que les paramètres du modèle sont ajustés de façon à ce que les flux modélisés s'accordent avec les flux mesurés sur la tour. En utilisant cette méthode, les données de flux mesurées dans un nombre limité de sites sont interpolées et extrapolées à la région de façon mécaniste. Cette approche est communément dénommée « bottom-up scaling » (modèle ascendant) dans la littérature anglophone. La figure 1 illustre la distribution, dérivée de cette approche, des sources et des puits de carbone pour les forêts nord-américaines de 2000 à 2006 avec une résolution de 1 km. La distribution spatiale modélisée des flux a ainsi été fixée à 37 tours de flux de l'Amérique du Nord. Pour ce faire, le modèle intégré du cycle du carbone des écosystèmes terrestres (InTEC) a été utilisé. Ce dernier a également intégré les éléments perturbants et non-perturbants (le CO_2 , l'azote, le climat) du cycle du carbone des forêts. Les informations relatives aux éléments perturbants requises par le modèle sont obtenues en intégrant

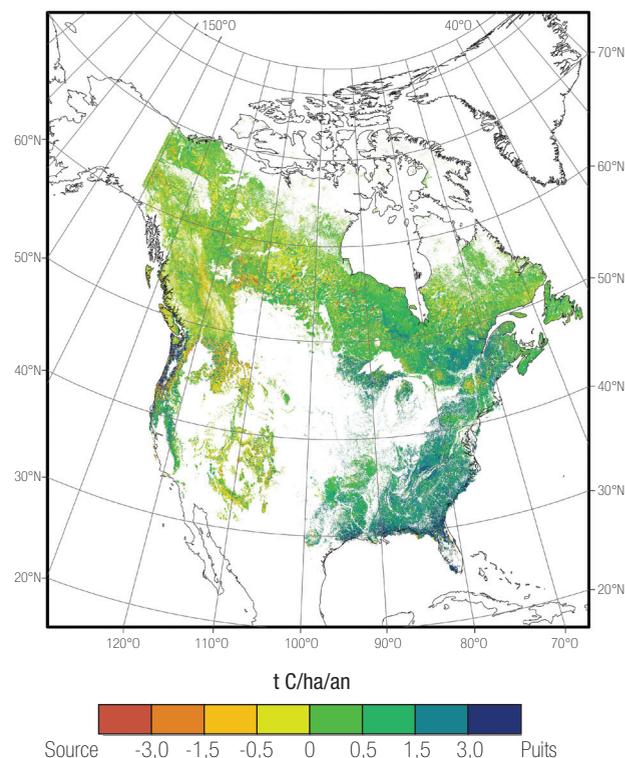


Figure 1. Distribution des sources et des puits de carbone (production nette des biomes, PNB) dans les forêts de l'Amérique du Nord estimée par modélisation ascendante à partir des données des tours de flux et basée sur des jeux de données maillées portant sur le type de forêt, l'indice de surface foliaire, l'âge des peuplements, le climat, la production primaire brute (PPB) de l'année 2000 (MODIS pour les États-Unis et le modèle BEPS pour le Canada) et la texture du sol. Les zones non-forestières ne sont pas incluses. Une valeur positive indique une séquestration nette de carbone alors qu'une valeur négative indique une émission nette de carbone. $R^2 = 0,71$ et la moyenne de l'erreur de biais = $-0,48 \text{ t C/ha/an}$.

les données fournies par le FIA (US Forest Inventory and Analysis), l'Inventaire forestier national du Canada (IFN), la Base nationale de données sur les feux de forêt et la télédétection

par satellites. D'autres ensembles de données utilisés dans ce type de modélisation comprennent l'indice de surface foliaire et le type de forêt déterminés par télédétection, les estimations de la production primaire brute (PPB) par MODIS, les données climatiques mensuelles et des données sur la texture du sol. La moyenne modélisée de la production nette des biomes (PNB, qui représente la PPB moins le carbone émis par la respiration et les perturbations) pour la période de 2000 à 2006 est de 32 Tg C/an et de 390 Tg C/an pour, respectivement, les forêts du Canada et celles des États-Unis.

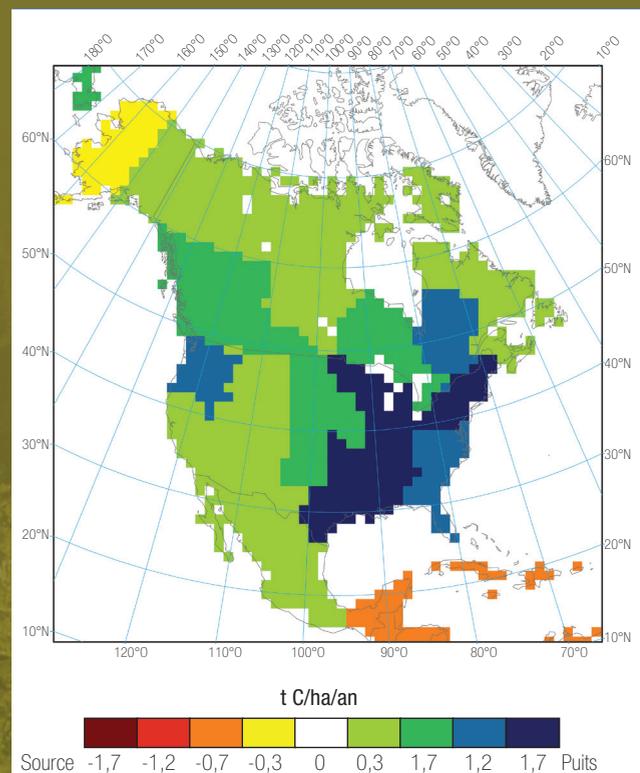


Figure 2. Distribution des sources et des puits de carbone (PNB) en Amérique du Nord divisée en 30 régions. Les résultats affichés représentent la moyenne pour la période de 2002 à 2006 et sont obtenus par modélisation inversée (descendante) réalisée à partir des données de concentration en CO₂ mesurées au sein de 208 sites marins et continentaux. Une valeur positive indique une séquestration nette de carbone alors qu'une valeur négative indique une émission nette de carbone.

Les données de CO₂ atmosphérique, collectées mondialement à plus de 200 sites et disponibles auprès de la base de données GlobalView, sont grandement affectées par les flux de carbone de surface qui se trouvent à l'intérieur de l'empreinte de chaque site et, par conséquent, peuvent être utilisées pour estimer les flux de surface par inversion atmosphérique (approche souvent qualifiée de modélisation descendante). La figure 2 montre la répartition du PNB de 2002 à 2006 répartis en 30 régions pour l'Amérique du Nord. Selon cette approche, l'influence des émissions issues de l'utilisation des combustibles fossiles et des flux océaniques

est d'abord soustraite. En plus des 196 sites marins, les concentrations en CO₂ mesurées au sein de 12 sites nord-américains sont utilisées afin de rendre cette inversion possible. Pour cette période de 5 ans, la moyenne inversée du PNB est de 236 ± 130 Tg C/an et de 580 ± 140 Tg C/an pour, respectivement, le Canada et les États-Unis. Ces estimations comprennent les grands puits des zones agricoles du centre des États-Unis, lesquels n'étaient pas inclus dans les résultats de l'approche par modèle ascendant cités précédemment. La répartition spatiale des PNB inversés est similaire à celle montrée à la figure 1, en particulier pour les grands puits de carbone du sud-est des États-Unis, de l'Ontario et du Québec.

Les tours de flux peuvent être considérées comme les « piquets » soutenant la distribution spatiale variable des flux de carbone. En général, les modèles processuels de l'écosystème sont utilisés pour calculer, en se basant sur des jeux de données maillées, cette distribution spatiale. Elle est ainsi fixée au « piquet » qu'est la tour de flux, ce qui signifie que les paramètres du modèle sont ajustés de façon à ce que les flux modélisés s'accordent avec les flux mesurés sur la tour.



Comment les tours de flux nous aident-elles à comprendre le budget mondial du carbone ?

Les données provenant des tours de flux du PCC/RRFC ont été combinées avec celles d'autres régions du monde afin de construire une base de données mondiale (Fluxnet) permettant de faire des analyses à grande échelle. Les données ont été assemblées à partir de plus de 400 sites à travers la planète, représentant plus de 3 500 années-sites de données. Les scientifiques canadiens ont étroitement collaboré avec des scientifiques d'autres pays afin de mener à bien ces analyses planétaires.

Étant donné que les tours de flux permettent de mesurer directement le carbone, l'eau et les échanges d'énergie, elles peuvent être utilisées en tant que références avec lesquelles les modèles mondiaux peuvent être testés. Les approches par « intelligence artificielle » sont utilisées

pour établir, à l'échelle du site, des relations entre les mesures de flux et des jeux de données descriptives, lesquelles sont également disponibles mondialement. Les variables descriptives comprennent des variables météorologiques et des données multi-spectrales qui proviennent de capteurs satellitaires à partir desquelles nous pouvons dériver les classes de couverture terrestre et les patrons saisonniers du rayonnement réfléchi. Les relations statistiques qui en résultent peuvent être utilisées avec les données descriptives mondiales afin de calculer les flux globaux. Tout comme ces données, les flux ainsi estimés varient dans le temps et dans l'espace.

Ces analyses ont été utilisées afin d'obtenir des cartes mondiales de la photosynthèse annuelle moyenne, de la respiration de l'écosystème,

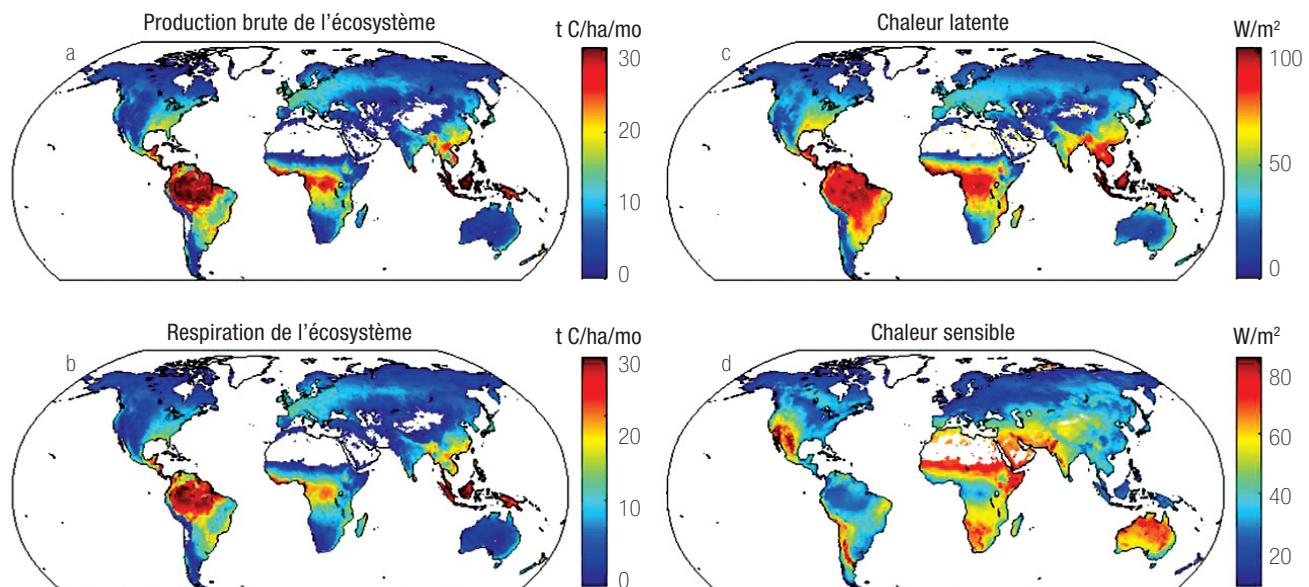


Figure 1. Moyenne annuelle des flux mondiaux de a) la production brute de l'écosystème (photosynthèse), b) la respiration de l'écosystème, c) la chaleur latente (évapotranspiration) et d) la chaleur sensible pour la période de 1982 à 2008.

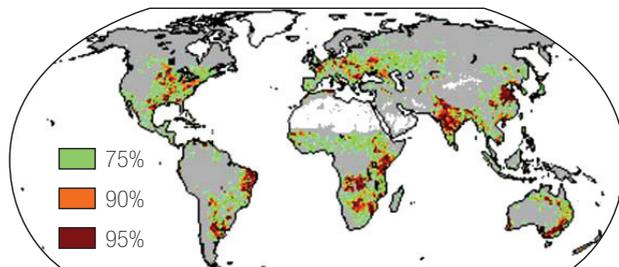


Figure 2. «Points forts» de la variabilité interannuelle de la production nette des écosystèmes. 75% indique que la variabilité est supérieure à 75% de la valeur moyenne pour la période de 1982 à 1998.

de l'évapotranspiration (chaleur latente) et de la chaleur sensible pour la période de 1982 à 2008¹ (Figure 1). La figure 2 illustre les «points forts» de la variabilité interannuelle de la production nette des écosystèmes (PNE) pour la même période. Les résultats indiquent que, pour la plupart des régions du monde, la variabilité de la PNE est plus fortement liée à la variabilité de la photosynthèse qu'à la variabilité de la respiration. La figure 3 montre la différence entre le flux photosynthétique le plus faible et le plus élevé au cours

1 Jung, M., Reichstein, M., Margolis, H.A., Cescatti, A., Richardson, A.D., Arain, M.A., Arneth, A., Bernhofer, C., Bonal, D., Chen, J., Gianelle, D., Gobron, N., Kiely, G., Kutsch, W., Lasslop, G., Law, B.E., Lindroth, A., Merbold, L., Montagnani, L., Moors, E.J., Papale, D., Sottocornola, M., Vaccari, F., Williams, C. 2011. Global patterns of land-atmosphere fluxes of carbon dioxide, latent heat, and sensible heat derived from eddy covariance, satellite, and meteorological observations. *Journal of Geophysical Research – Biogeosciences* (sous presses).

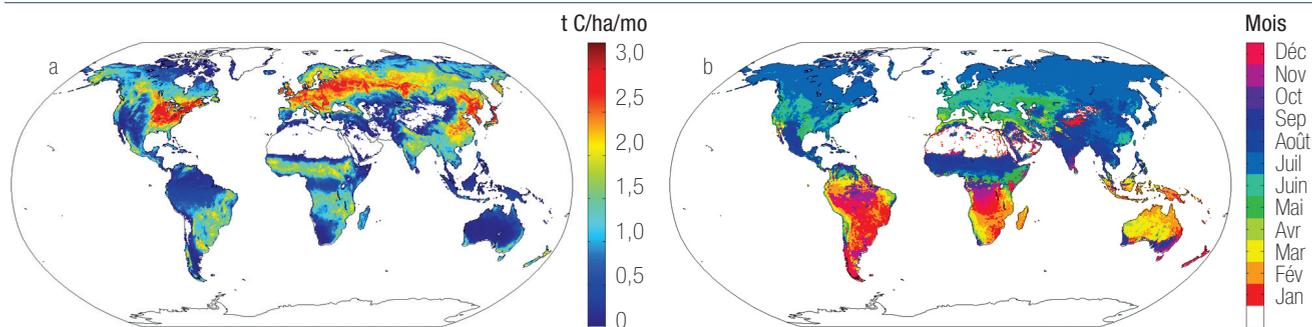


Figure 3. (a) Différence entre le plus petit et le plus grand flux photosynthétique mensuel (Production brute de l'écosystème) au cours d'une année, c'est-à-dire l'amplitude du cycle saisonnier. Les forêts tropicales humides présentent un flux photosynthétique relativement uniforme alors que les forêts boréales présentent une grande différence entre les flux hivernaux et les flux estivaux, toutefois les flux estivaux maximaux étant modestes, l'amplitude du cycle saisonnier y reste modérée. Les forêts tempérées présentent de faibles flux en hiver, lorsque les feuilles sont tombées et des flux estivaux maximaux très élevés, elles possèdent donc les plus grandes amplitudes. (b) Mois dans lequel les plus grands flux de photosynthèse se produisent, généralement au cours de l'été ou du printemps local.

Étant donné que les tours de flux permettent de mesurer directement le carbone, l'eau et les échanges d'énergie, elles peuvent être utilisées en tant que références avec lesquelles les modèles mondiaux peuvent être testés.

d'une année (l'amplitude du cycle saisonnier) et le mois de l'année où le flux photosynthétique est le plus élevé¹. Ces informations spatiales sont une référence précieuse qui peuvent être utilisées pour tester les modèles processuels de la végétation. Ces modèles visent à représenter en détails les processus physiologiques et biophysiques, alors que nos

cartes de références conçues à l'aide des données ne sont fondées sur aucune hypothèse biologique. Par conséquent, les processus manquants et les autres types d'erreurs dans ces modèles devraient être plus faciles à détecter.

Ce travail utilise les données de covariance des turbulences acquises par l'ensemble de la communauté Fluxnet, accessibles grâce à l'effort de synthèse investi dans la constitution de la base de données LaThuile (www.fluxnet.org) qui inclut les réseaux et projets suivants: AmeriFlux, AfriFlux, AsiaFlux, CarboAfrica, CarboEurope-IP, CarboItaly, CarboMont, ChinaFlux, Fluxnet-Canada, GreenGrass, KoFlux, le projet «Large Scale Biosphere-Atmosphere Experiment in Amazonia», Nordic Centre for studies of Ecosystem Carbon Exchange, OzFlux, TCOS SIBERIA et US-China Carbon Consortium.

Pour plus d'informations, veuillez contacter M. Hank Margolis (hank.margolis@sbf.ulaval.ca)



Les changements climatiques et le cycle du carbone

Publications suggérées pour lectures complémentaires

Grant, R.F., A.G. Barr, T.A. Black, H.A. Margolis, A.L. Dunn, J. Metsaranta, S. Wang, J.H. McCaughey, C.P.-A. Bourque. 2009. Interannual variation in net ecosystem productivity of Canadian forests as affected by regional weather patterns – a Fluxnet-Canada synthesis. *Agricultural and Forest Meteorology* 149: 2022–2039.

Margolis, H.A., L.B. Flanagan, B.D. Amiro. 2006. The Fluxnet-Canada Research Network: Influence of climate and disturbance on carbon cycling in forest and peatlands. *Agricultural and Forest Meteorology* 140: 1–5; doi:10.1016/j.agrformet.2006.08.013.

Teklemariam, T., P.M. Lafleur, T.R. Moore, N.T. Roulet, E.R. Humphreys. 2010. The direct and indirect effects of inter-annual meteorological variability on ecosystem carbon dioxide exchange at a temperate ombrotrophic bog. *Agricultural and Forest Meteorology* 150: 1402–1411.

Yi S., M.K. Woo, M.A. Arain. 2007. Impact of peat and vegetation on permafrost degradation under climate warming. *Geophysical Research Letters* 34, L16504, doi: 10.1029/2007GL030550.



Comment l'étude des variations interannuelles
de la productivité des forêts peut-elle nous aider
à prédire les effets des changements climatiques ? 36

Comment les cycles du carbone des forêts
et des tourbières du Canada réagiront-ils face
aux changements climatiques à venir ? 38



Comment l'étude des variations interannuelles de la productivité des forêts peut-elle nous aider à prédire les effets des changements climatiques ?

Nos données de mesures de flux ne couvrent pas encore une période suffisamment longue pour permettre de bien connaître la façon dont les changements climatiques affectent nos forêts, principalement parce que la productivité est grandement affectée par la variation météorologique interannuelle. Néanmoins, cette variation peut donner un aperçu de la façon dont les changements climatiques à venir pourront affecter la productivité des forêts.

La variation interannuelle de la température affecte fortement la productivité des forêts. Par exemple, 2004 fut une année fraîche et humide dans le centre du Canada, alors que 2006 fut une année chaude. L'augmentation de la photosynthèse au cours du printemps chaud de 2006 a permis une séquestration de 3 t C/ha par un

peuplement de peupliers situé en Saskatchewan, alors qu'en 2004, sa séquestration de carbone était presque nulle (Figure 1). Toutefois, dans les zones côtières de la Colombie-Britannique, nous avons constaté qu'une période plus chaude a eu un effet contraire sur la productivité forestière. Un peuplement de sapins de Douglas a séquestré du carbone pendant la majeure partie de 1999, année particulièrement fraîche en raison d'un épisode La Niña, et a émis du carbone au cours des courtes vagues de chaleur de l'été 2004, année assez chaude en raison d'un épisode El Niño (Figure 2), réduisant ainsi la séquestration de 2 t C/ha par rapport à 1999. Sur chacun de nos sites situés en forêt boréale, nous avons trouvé que les émissions de carbone augmentent brusquement lorsque la température dépasse 25 °C.

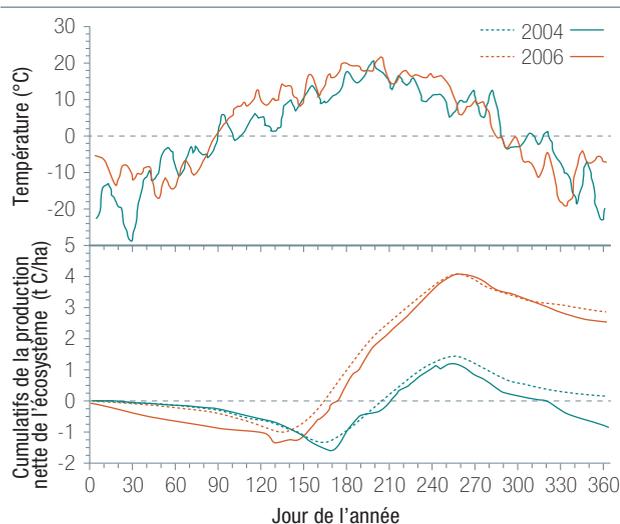


Figure 1. Température moyenne de l'air mesurée en 2004, année plus fraîche, et 2006, année plus chaude, et cumulatifs de la production nette de l'écosystème (PNE) mesurée (pointillés) et modélisée (traits pleins) au cours de ces mêmes années sur un site de peupliers en Saskatchewan. Des températures plus élevées ont entraîné une augmentation de la PNE modélisée et mesurée à ce site d'environ 3 t C/ha. La PNE au jour 365 indique la quantité totale de carbone séquestré (valeur positive) ou émis (valeur négative) au cours de l'année.

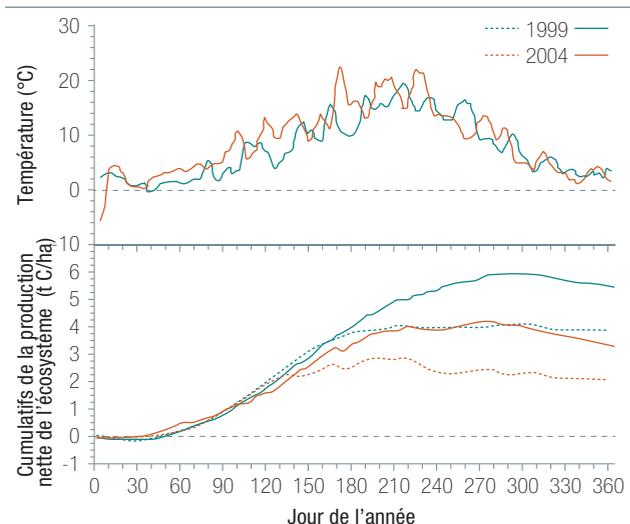


Figure 2. Température moyenne de l'air mesurée en 1999, année plus fraîche, et 2004, année plus chaude, et cumulatifs de la production nette de l'écosystème (PNE) mesurée (ligne pointillée) et modélisée (traits pleins) au cours de ces mêmes années sur un site de sapins de Douglas en Colombie-Britannique. Des températures plus élevées ont entraîné une diminution de la PNE modélisée et mesurée à ce site d'environ 2 t C/ha. La PNE au jour 365 indique la quantité totale de carbone séquestré (valeur positive) au cours de l'année.

Nous avons également constaté que la variation interannuelle des précipitations affecte fortement la productivité des forêts. Une grande sécheresse survenue dans le centre du Canada de 2001 à 2003 a provoqué une baisse de la séquestration annuelle dans la peupleraie de la Saskatchewan, passant de 3 t C/ha en 2001 à 1 t C/ha en 2003 (Figure 3). La mortalité des arbres a également augmenté suite à la sécheresse.

Notre compréhension de l'effet de la variation météorologique sur la productivité des forêts peut être utilisée afin de prédire comment, à long terme, les changements climatiques pourront affecter la productivité future en intégrant dans des modèles mathématiques notre compréhension du fonctionnement des écosystèmes. Ces modèles sont ensuite comparés aux mesures réelles, comme celles prises par le PCC. Si notre compréhension est juste, le modèle devrait simuler les réponses aux conditions météorologiques mesurées aux sites du PCC et aux autres sites, et ce de la toundra arctique à la forêt tropicale. Les modèles peuvent ensuite être utilisés pour prédire les réponses des écosystèmes aux changements climatiques à venir.

Par exemple, les séquestrations/émissions de carbone à court terme modélisées dans les figures 1 à 3 permettent de produire les courbes modélisées du carbone ligneux total à long terme de la figure 4. Bien que la séquestration rapide du carbone au site de sapins de Douglas (Figure 2) ait été associée à la croissance rapide du carbone ligneux depuis la dernière récolte de 1949 (Figure 4), les plus courtes saisons de croissance de la peupleraie (Figures 1 et 3) ont causé une plus faible croissance du carbone ligneux suite au dernier feu de remplacement du peuplement survenu dans les années 1920 (Figure 4). Similairement, les très faibles séquestrations de carbone des sites d'épinettes noires et de pins gris ont été associées à la

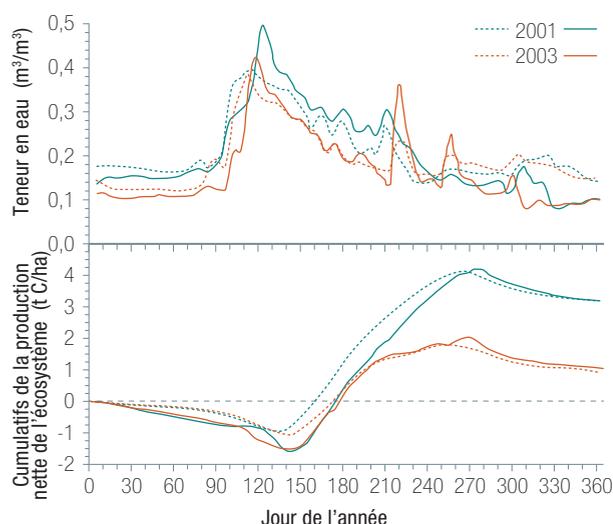


Figure 3. Teneur en eau du sol (7,5 cm de profondeur) et production nette de l'écosystème (PNE) mesurées (pointillés) et modélisées (traits pleins) en 2001 et 2003; première et troisième année d'une sécheresse de trois ans sur un site de peupliers en Saskatchewan. L'assèchement du sol a abaissé la PNE de 2 t C/ha durant la sécheresse. La PNE au jour 365 indique la quantité totale de carbone séquestré (valeur positive) au cours de l'année.

Notre compréhension de l'effet de la variation météorologique sur la productivité des forêts peut être utilisée afin de prédire comment, à long terme, les changements climatiques pourront affecter la productivité future en intégrant dans des modèles mathématiques notre compréhension du fonctionnement des écosystèmes.

très faible croissance du carbone ligneux dans les années qui ont suivi les derniers feux de remplacement des peuplements, survenus au début des années 1900 (Figure 4). Les taux modélisés de la croissance du carbone ligneux sous les différents climats des sites du PCC ont été vérifiés en les comparant avec les taux estimés à partir d'inventaires forestiers.

Comment les taux de croissance varieront-ils dans le futur? Des modèles de projection des taux de croissance sont en cours de production pour certains de nos sites selon un éventail de scénarios de changements climatiques

prévus pour les différentes régions du Canada. En général, ces prévisions indiquent une augmentation de la croissance du carbone ligneux dans les forêts non perturbées dans le futur, en raison de l'allongement des saisons de croissance et des concentrations atmosphériques en CO₂ plus élevées. Cependant, ces augmentations sont sensibles aux perturbations, telles que la sécheresse, le feu ou les insectes ravageurs, qui pourraient devenir plus fréquentes. Ces perturbations doivent donc être prises en compte dans les études approfondies portant sur les impacts des changements climatiques sur la productivité des forêts.

Pour plus d'informations, veuillez contacter M. Robert Grant (Robert.Grant@ualberta.ca)

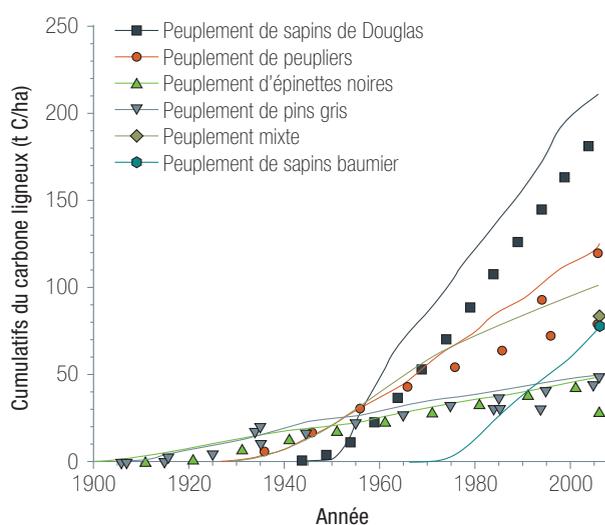


Figure 4. Cumulatifs du carbone ligneux modélisés (lignes) et mesurés, ou dérivés à partir de mesures de diverses études, aux sites, ou près des sites, du Programme canadien du carbone. Les effets des conditions météorologiques sur la PNE, comme ceux des figures 1 à 3, déterminent les effets des changements climatiques sur la croissance de la forêt.



Comment les cycles du carbone des forêts et des tourbières du Canada réagiront-ils face aux changements climatiques à venir?

Les forêts répondent de façon dynamique aux changements de température et de précipitation. Les résultats provenant des mesures effectuées par les tours de flux ont montré que, sur quelques jours ou quelques semaines, une diminution de la température du sol ou de la teneur en eau du sol peut réduire la perte de carbone des sols, puisque la respiration associée à la décomposition diminue. Les processus relatifs aux arbres, tels que la photosynthèse et l'évapotranspiration, diminuent également sous des conditions plus froides. Toutefois, la diminution se fait plus lentement en période de sécheresse, ce qui entraîne une augmentation à court terme de la séquestration nette de carbone par les forêts lors des périodes sèches. Cependant, autant l'absorption de carbone par les arbres que la perte par la respiration associée à la décomposition s'adaptent aux nouvelles conditions climatiques, ce qui conduit à des changements au niveau des réserves de carbone des forêts à long terme.

Les mesures de la croissance des arbres et de la teneur en carbone dans le sol, effectuées sur dix sites en forêt mature couvrant un gradient climatique au Canada, ont été utilisées afin de prédire la réponse des forêts aux changements climatiques. Contrairement à la teneur en carbone dans le sol, la croissance annuelle moyenne des arbres, telle que représentée par l'accroissement annuel moyen du carbone dans la biomasse, a été fortement corrélée à la température annuelle moyenne tel

En se basant sur cette étude, nous ne pouvons pas affirmer que le réchauffement lui-même causera une perte à long terme du carbone stocké dans les sols forestiers bien drainés, étant donné que la croissance des arbres y est également stimulée. Toutefois, une tendance vers un climat plus sec pourrait causer une telle perte.

long du gradient climatique (Figure 1). Ceci suggère que, sous des conditions de croissance plus chaudes, la fixation supplémentaire de carbone obtenue par la croissance plus rapide des arbres est généralement compensée par une décomposition accrue et une augmentation de l'émission de carbone par le sol.

D'autre part, la teneur en carbone dans les sols forestiers est fortement liée à la quantité moyenne annuelle d'humidité disponible (différence entre les précipitations et l'évapotranspiration potentielle). Les sites plus secs avaient une plus faible teneur en carbone que les sites plus humides. Notre analyse a révélé des différences entre les réponses à court terme des écosystèmes forestiers à des événements météorologiques et leurs réponses

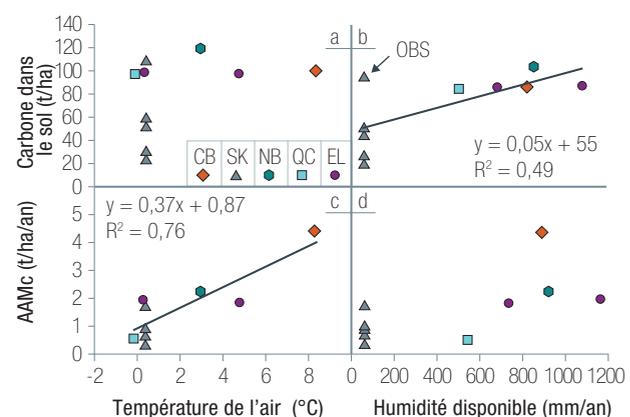


Figure 1. Carbone dans le sol (a, b) et accroissement annuel moyen du carbone (AAMc) dans la biomasse (c, d) en fonction de la température annuelle moyenne (a, c) et de l'humidité moyenne annuelle disponible (b, d). Les données sont présentées pour les sites à couvert fermé des stations de Fluxnet-Canada du Nouveau-Brunswick (NB), du Québec (QC), de la Saskatchewan (SK) et de la Colombie-Britannique (CB). Deux sites ECOLEAP de sapins baumiers (EL) situés au Québec et au Nouveau-Brunswick sont également inclus. Une valeur de $R^2=0,79$ est obtenue en (b) lorsque le site mal drainé OBS (Old Black Spruce) est exclu de l'analyse.

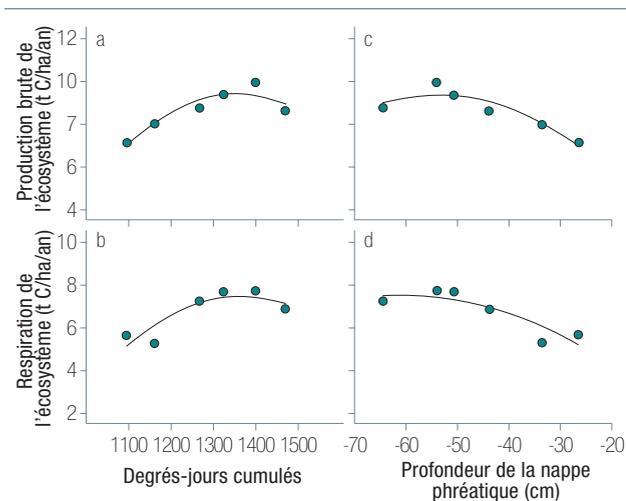


Figure 2. Réponses de (a) la production brute annuelle de l'écosystème et (b) la respiration annuelle de l'écosystème aux variations de températures (exprimée en degrés-jours cumulés, mars à octobre) et réponses de (c) la production brute de l'écosystème et (d) la respiration de l'écosystème aux variations de la profondeur de la nappe phréatique (mai à octobre; valeur moyenne) au site de la station de flux de la tourbière de l'ouest.

à long terme aux changements du climat. En se basant sur cette étude, nous ne pouvons pas affirmer que le réchauffement lui-même causera une perte à long terme du carbone stocké dans les sols forestiers bien drainés, étant donné que la croissance des arbres y est également stimulée. Toutefois, une tendance vers un climat plus sec pourrait causer une telle perte.

La plupart des tourbières ont été des puits de carbone continus depuis des millénaires. Toutefois, il a été prédit que l'exposition à des températures plus élevées et à des conditions plus sèches, liées aux changements climatiques, modifiera l'équilibre entre la photosynthèse et la respiration des écosystèmes, ce qui risquerait de provoquer une perte de CO₂ par les tourbières. L'un des objectifs de recherche de la station de flux de la tourbière de l'ouest dans le nord de l'Alberta était de déterminer la sensibilité des productions brute et nette de l'écosystème et de la respiration de l'écosystème aux variations de la température et de la profondeur

En l'absence de feux de forêt ou d'autres perturbations majeures, d'importantes séquestrations nettes de carbone pourront s'effectuer pendant des décennies au site de la tourbière de l'ouest.

de la nappe phréatique. Notre étude a été menée dans une tourbière minérotrophe boisée, modérément riche, le type de tourbière le plus abondant de l'Ouest canadien, dans une région où les tourbières constituent un élément important du paysage. Les mesures effectuées de 2004 à 2009 ont montré que la température a fortement varié et que le niveau moyen de la nappe phréatique au cours de la saison de croissance (mai à octobre) a diminué. Contrairement aux

prévisions antérieures, la production brute de l'écosystème et la respiration de l'écosystème ont affiché des hausses similaires en réponse aux conditions plus chaudes et plus sèches (Figure 2). La tourbière est demeurée un important puits net de carbone avec une séquestration annuelle moyenne de 1,9 t/ha. Une analyse statistique détaillée a indiqué que la variation interannuelle de la profondeur de la nappe phréatique a été la principale cause des variations observées de la production brute de l'écosystème et de la respiration. Un niveau plus bas de la nappe phréatique peut augmenter la température du sol, améliorer l'approvisionnement en oxygène des racines et augmenter la disponibilité des éléments nutritifs, facteurs qui devraient normalement stimuler la production et la respiration d'un écosystème.

En l'absence de feux de forêt ou d'autres perturbations majeures, d'importantes séquestrations nettes de carbone pourront s'effectuer pendant des décennies au site de la tourbière de l'ouest. Toutefois, les conditions plus chaudes et plus sèches induites par les changements climatiques pourraient également augmenter le risque de perturbations par le feu, ce qui libérerait d'importantes quantités de carbone stocké et réinitialiserait l'écosystème à un stade primaire moins productif de la succession.

Pour plus d'informations, veuillez contacter M. Pierre Bernier (pierre.bernier@rncan-nrcan.gc.ca) ou M. Larry Flanagan (larry.flanagan@uleth.ca)

Participants scientifiques

Paul Arp (U. New Brunswick)
Brian Amiro (U. Manitoba)
Altaf Arain (McMaster U.)
Alan Barr (Environnement Canada)
Frederick Beall (Service canadien des forêts)
André Beaudoin (Service canadien des forêts)
Pierre Bernier (Service canadien des forêts)
Jag Bhatti (Service canadien des forêts)
Francine Bigras (Service canadien des forêts)
T. Andrew Black (U. British Columbia)
Charles Bourque (U. New Brunswick)
Phil Burton (Service canadien des forêts)
Al Cameron (Service canadien des forêts)
Douglas Chan (Environnement Canada)
Jing Chen (U. Toronto)
Nicholas Coops (U. British Columbia)
Michael Dumas (Service canadien des forêts)
Larry Flanagan (U. Lethbridge)
Art Fredeen (U. Northern British Columbia)
Robert Grant (U. Alberta)
Susan Grayston (U. British Columbia)
Robert Guy (U. British Columbia)
Kaz Higuchi (Environnement Canada)
Ted Hogg (Service canadien des forêts)
Lin Huang (Environnement Canada)
Elyn Humphreys (Carleton U.)
Mark Johnson (U. British Columbia)
Werner Kurz (Service canadien des forêts)
Peter Lafleur (Trent U.)
Mike Lavigne (Service canadien des forêts)
John Lin (U. Waterloo)
Nigel Livingston (U. Victoria)
Hank Margolis (U. Laval)
J. Harry McCaughey (Queen's U.)
Jim McLaughlin (Ontario Ministry of Natural Resources)
Douglas J. McRae (Service canadien des forêts)
Fan-Rui Meng (U. New Brunswick)
Tim Moore (McGill U.)
Ian Morrison (Service canadien des forêts)
Mike Novak (U. British Columbia)
Gunilla Oberg (U. British Columbia)
David Paré (Service canadien des forêts)
Nick Payne (Service canadien des forêts)
Derek Peddle (U. Lethbridge)
Changhui Peng (U. du Québec à Montréal)
Joseph Pomeroy (Environnement Canada)
Cindy Prescott (U. British Columbia)
Dave Price (Service canadien des forêts)
Phil Reynolds (Service canadien des forêts)
Pierre Richard (U. Montréal)
Nigel Roulet (McGill U.)
Réal Roy (U. Victoria)
Nick Payne (Service canadien des forêts)
Neal Scott (Queen's U.)
Jonathan Seaquist (McGill U.)
David Spittlehouse (British Columbia Ministry of Forests)
Ian Strachan (McGill U.)
Roland Stull (U. British Columbia)
Edwin Swift (Service canadien des forêts)
Paul Treitz (Queen's U.)
Erin Thompson (Environnement Canada)
J.A. (Tony) Trofymow (Service canadien des forêts)
Ken Van Rees (U. Saskatchewan)
Shusen Wang (Canadian Centre for Remote Sensing)
Michael Whitarcar (U. Victoria)
Doug Worthy (Environnement Canada)
Michael Wulder (Canadian Forest Service)

Comité de direction

Robert Beauregard (PCC) – U. Laval

Dominique Blain (PCC) - Environnement Canada

Denis Brière (RRFC) – U. Laval

Dawn Conway (observateur) - FCSCA

Reinhart Ceulemans (PCC) - U. Antwerpen

Marc D'lorio (RRFC) – Ressources naturelles Canada

Roger Dahlman (RRFC) – Department of Energy (É.U.)

Kevin Driscoll (RRFC) (observateur) – CRSNG

James Elliot (RRFC) – Pêches et Océans Canada

Yvan Hardy (Président, PCC)

David B. Layzell (RRFC) – BIOCAP Canada

Hank Margolis (RRFC, PCC) – U. Laval

J. Harry McCaughey (RRFC) – Queen's U.

Denis St-Onge (Président, RRFC) – Commission géologique du Canada (émérites)

Douglas Whelpdale (RRFC) – Service météorologique du Canada

R. Kelman Wieder (RRFC) – Villanova U.

Jim Wood (RRFC), (observateur, PCC) – Ressources naturelles Canada

Comité scientifique

Brian Amiro (RRFC, PCC) – U. Manitoba

Altaf Arain (RRFC, PCC) – McMaster U.

Alan Barr (RRFC, PCC; Co-président) – Env. Canada

Pierre Bernier (RRFC, PCC; Co-président) – Res. naturelles Canada

T. Andrew Black (RRFC, PCC) – U. British Columbia

Charles Bourque (RRFC) – U. New Brunswick

Jing M. Chen (RRFC, PCC) – U. Toronto

Wenjun Chen (RRFC) – Ressources naturelles Canada

Nicholas Coops (PCC) – U. British Columbia

Larry Flanagan (RRFC, PCC) – U. Lethbridge

Robert Grant (RRFC, PCC) – U. Alberta

John Lin (PCC) – U. Waterloo

Peter Lafleur (RRFC, PCC) – Trent U.

Hank Margolis (RRFC, PCC; Co-président) – U. Laval

J. Harry McCaughey (RRFC, PCC) – Queen's U.

Nigel Roulet (RRFC) – McGill U.

Steven C. Wofsy (RRFC) – Harvard U.

Doug Worthy (PCC) – Environnement Canada

Glossaire

Albédo : Proportion du rayonnement solaire réfléchi, plutôt qu'absorbé, par une surface. Plus la surface est sombre, plus l'albédo est faible (neige fraîche : 0,9, asphalte : 0,04).

Bilan de carbone : Somme nette des entrées et des sorties de carbone d'un écosystème donné.

Changements climatiques : Changements à long terme de la distribution statistique des régimes climatiques sur une période de temps allant de la décennie aux millions d'années.

Chronoséquence : Ensemble de sites forestiers qui partagent des caractéristiques similaires, mais qui sont d'âges différents.

Climat : Conditions météorologiques moyennes, principalement la température, l'humidité, les précipitations, le vent et l'ensoleillement, d'une région donnée.

Combustible fossile : Combustible formé sur des millions d'années à partir de restes de plantes et d'animaux morts et enfouis (gaz naturel (méthane), pétrole et charbon).

Covariance des turbulences : Technique utilisée en micrométéorologie permettant de mesurer les flux verticaux (e.g. du CO₂, de la vapeur d'eau, de la chaleur) à l'intérieur de la couche limite atmosphérique.

Cycle du carbone : Processus par lequel le carbone se déplace sous ses différentes formes à travers et au sein des systèmes terrestres.

Décomposition : Processus par lequel le matériel végétal est séquentiellement décomposé via le lessivage par l'eau, la fragmentation physique par la faune et les champignons et l'altération chimique par les micro-organismes.

Écosystème : Ensemble des parties vivantes et non-vivantes d'un système naturel qui fonctionne en tant que somme de relations interdépendantes.

Émission : Rejet d'une substance, comme les gaz à effet de serre, dans l'atmosphère.

Évaporation : Processus par lequel un liquide est transformé en gaz.

Évapotranspiration : Somme de l'évaporation et de la transpiration ; Deux processus par lesquels les écosystèmes renvoient l'eau dans l'atmosphère.

Flux de chaleur latente : Quantité d'énergie, provenant de la radiation nette reçue à la surface, utilisée pour évaporer l'eau de la surface du sol vers l'atmosphère.

Flux de chaleur sensible : Quantité d'énergie, provenant de la radiation nette reçue à la surface, dissipée sous forme d'énergie thermique.

Flux : Mesure de la circulation d'une certaine quantité (e.g. de chaleur, de CO₂, de vapeur d'eau) par unités de surface et de temps.

Gaz à effet de serre : Gaz atmosphériques qui laissent passer le rayonnement à courte longueur d'onde, mais qui absorbent et réémettent le rayonnement à grande longueur d'onde (infrarouge) émis par la surface terrestre. Les principaux gaz à effet de serre présents dans l'atmosphère terrestre sont la vapeur d'eau, le CO₂, le méthane, l'oxyde nitreux et l'ozone.

Hectare (ha) : Surface de 10 000 m², soit 100 m x 100 m.

Neutralité carbonique : Se dit lorsque la quantité de carbone libérée dans l'atmosphère égale la quantité séquestrée.

Perturbation : Changement marqué des conditions environnementales menant à un changement au sein d'un écosystème (e.g. le feu, la coupe forestière, les épidémies d'insectes, les maladies et les chablis).

Pétagramme (Pg) : Unité de masse égale à 10¹⁵ g, 10⁹ tonnes (t) ou 1 gigatonne (Gt).

Photosynthèse : Processus par lequel les plantes et les algues convertissent le CO₂ en composés organiques, notamment en sucres, en utilisant l'énergie du rayonnement solaire.

Potentiel d'évapotranspiration : Quantité maximale d'eau susceptible d'être évaporée à partir d'une surface dans l'éventualité où une source d'eau suffisante est disponible pour satisfaire à la demande atmosphérique en humidité.

Potentiel de réchauffement global (PRG) : Mesure de la contribution d'une masse donnée d'un gaz à effet de serre au réchauffement de la planète par rapport à celle de la même masse de CO₂ (PRG = 1).

Production brute de l'écosystème (PBE) : Production de sucres par un écosystème par l'entremise de la photosynthèse.

Production nette de l'écosystème (PNE) : Absorption ou émission nette de CO₂ par un écosystème sur une période de temps donnée (PBE – RE). Une valeur positive indique une absorption nette de CO₂ par un écosystème (puits de carbone) alors qu'une valeur négative indique une émission nette de CO₂ vers l'atmosphère (source de carbone).

Production primaire nette : Biomasse produite par unité de temps (PBE – RA).

Puits de carbone : Absorption de carbone atmosphérique par un écosystème. Un puits de carbone est un réservoir de carbone qui accumule et stocke le carbone pendant une période de temps indéfinie.

Réserve de carbone : Quantité de carbone contenue dans un « bassin », c'est-à-dire un réservoir ou un système ayant la capacité d'accumuler ou de libérer du carbone. Dans le contexte forestier, elle réfère à la quantité de carbone stockée dans l'écosystème forestier mondial, principalement dans la biomasse vivante et le sol, et dans une moindre mesure, dans le bois mort et la litière.

Respiration autotrophe (RA) : Émission de CO₂ par la végétation vivante grâce à des processus métaboliques.

Respiration de l'écosystème (RE) : Ensemble des émissions de CO₂ par un écosystème produites par les respirations autotrophe et hétérotrophe.

Respiration hétérotrophe : Émission de CO₂ par les microorganismes du sol (e.g. les bactéries, les champignons) et les animaux via les processus métaboliques, comprenant la décomposition de la matière organique du sol.

Séquestration de carbone : Processus d'absorption de carbone atmosphérique et de stockage dans un réservoir, comme les arbres ou le sol.

Source de carbone : Émission de carbone par un écosystème vers l'atmosphère. Une source de carbone est un réservoir de carbone qui émet du carbone vers l'atmosphère.

Téragramme (Tg) : Unité de masse égale à 10¹² g, 10⁶ tonnes (t) ou 1 mégatonne (Mt).

Transpiration : Processus par lequel l'eau présente dans les plantes est transférée vers l'atmosphère sous forme de vapeur.

