



C-CASCADES

LE CYCLE DU CARBONE LE LONG DU CONTINUUM AQUATIQUE CONTINENT-OCÉAN: UN ÉLÉMENT-CLÉ POUR LES PROJECTIONS CLIMATIQUES.

..... Objectifs du projet C-CASCADES

DANS SON DERNIER RAPPORT D'ÉVALUATION¹ (AR5, 2013), LE GROUPE D'EXPERTS INTERGOUVERNEMENTAL SUR L'ÉVOLUTION DU CLIMAT (GIEC) RECONNAIT LE TRANSPORT DE CARBONE LE LONG DU CONTINUUM AQUATIQUE RELIANT LES ÉCOSYSTÈMES TERRESTRES AUX OCÉANS COMME UN ÉLÉMENT-CLÉ DU CYCLE GLOBAL DU CARBONE.

Cependant, la quantification du rôle de ce continuum aquatique (des eaux continentales aux zones côtières) et de ses dynamiques dans le cycle global du carbone en est encore à ses débuts:

- Les modèles Système Terre du climat et des cycles biogéochimiques utilisés pour le 5^{ème} rapport d'évaluation du GIEC ne prennent pas en compte les flux latéraux de carbone le long du continuum ni les échanges associés de CO₂ et de méthane (CH₄) avec l'atmosphère.
- Les perturbations du cycle du carbone dues aux activités humaines le long du continuum (p.ex. utilisation des sols, pollutions domestiques et industrielles, changement climatique, gestion hydraulique) n'ont pas encore été quantifiées.

Ce manque de connaissances conduit à des incertitudes sur les bilans de carbone, régionaux et mondiaux, ainsi que sur les projections climatiques, éléments-clés qui servent de référence aux politiques climatiques. Afin de produire des avancées majeures dans ce domaine, le projet européen C-CASCADES (Actions Marie Curie – Innovative Training Network) a pour but d'améliorer de façon significative les capacités prédictives des modèles Système Terre en y intégrant, pour la première fois, le transfert de carbone des continents vers l'océan. Les analyses du système couplé carbone-climat et de sa réponse aux perturbations anthropiques (dues aux activités humaines) seront effectuées à toutes les échelles: locale, régionale et mondiale.

1. Ciais, P., *et al.*, 2013: Carbon and Other Biogeochemical Cycles. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.



C-CASCADES

a Marie Curie Innovative Training Network



..... A l'échelle d'un bassin versant: l'exemple de la forêt boréale

En absorbant environ 5% des émissions anthropiques de CO₂ (soit près de 0.5 gigatonnes de carbone par an (GtC.an⁻¹) en moyenne sur la dernière décennie; 1 Gt = 10⁹ t), la forêt boréale de l'hémisphère nord joue un rôle important dans la séquestration du carbone par les écosystèmes terrestres. La quantification locale du flux de CO₂ d'une forêt (1 km²) peut être obtenue grâce aux mesures d'une tour à flux, qui permet de mesurer la productivité nette des écosystèmes (PNE), c'est à dire le bilan

annuel de CO₂ échangé entre cette forêt et l'atmosphère (Fig. 1). La PNE correspond donc à la différence entre la quantité de CO₂ fixée par photosynthèse (productivité primaire brute) et celle réémise vers l'atmosphère par respiration des sols et des plantes: toutefois le stockage de carbone dans la forêt (ΔC) n'est pas égal à la PNE car une fraction de celle-ci est transférée des sols vers les milieux aquatiques.

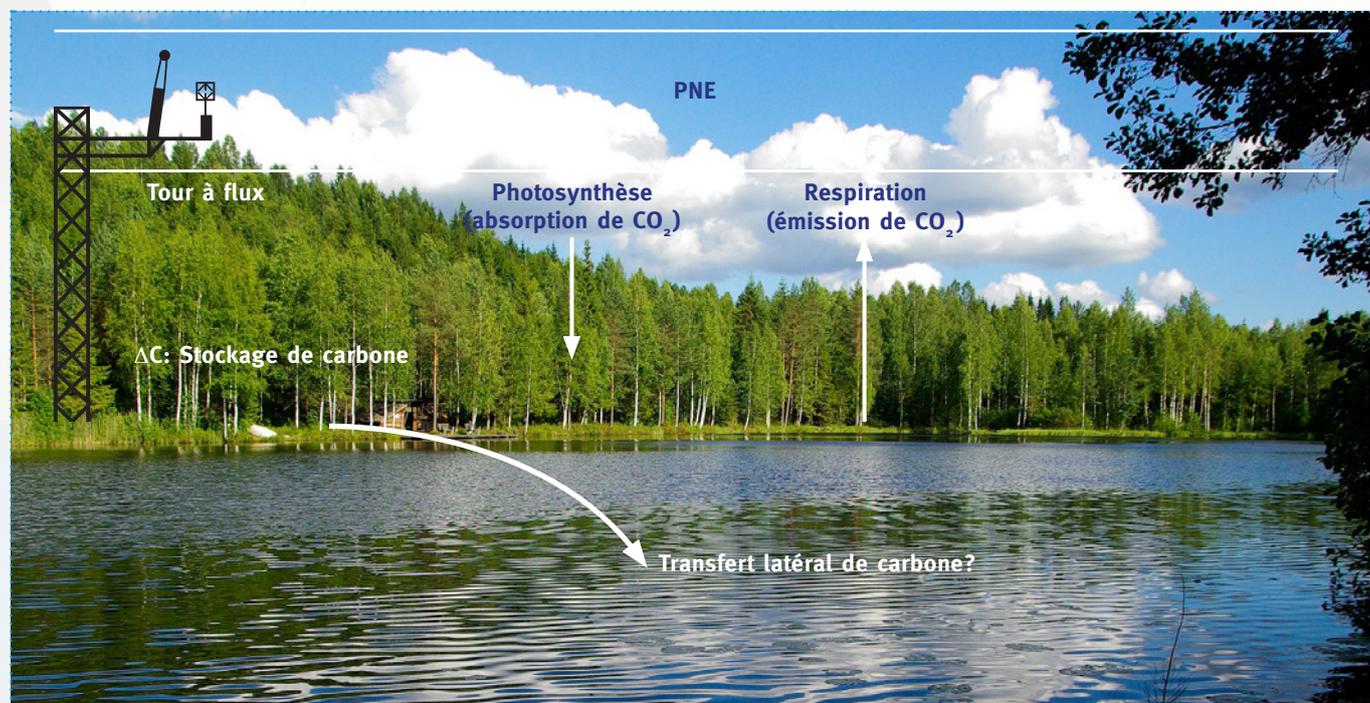


Fig. 1 – Mesure de la productivité nette des écosystèmes (PNE) par une tour à flux. La PNE est égale au stockage de carbone (ΔC) dans l'écosystème auquel il faut ajouter le transfert latéral de carbone vers les systèmes aquatiques.

Quel est l'ordre de grandeur du transfert latéral de carbone dans un petit bassin versant boréal et quelles sont les conséquences pour les estimations du puit de carbone terrestre ?

Des études récentes² effectuées dans un petit bassin versant de la forêt boréale suédoise ont montré que la quantité de carbone exportée vers le continuum aquatique représente une fraction significative de la PNE (entre 4 et 28%), ce qui conduit à une surestimation du puit de carbone terrestre à l'échelle de ce bassin si on fait l'approximation $\Delta C = PNE$. Une part du CO₂ absorbée par la forêt mesurée comme PNE n'est donc pas piégée par l'écosystème, mais est transférée vers les eaux continentales (Fig. 1). Étant donné que beaucoup de décisions politiques et de stratégies de gestion du carbone se basent sur les estimations du puit de carbone terrestre, il est capital d'informer les décideurs au sujet de cette surestimation lorsque les tours à flux sont utilisées.

Comment le transfert latéral de carbone va-t-il évoluer dans le futur pour les bassins versants boréaux et comment le puit de carbone terrestre en sera-t-il affecté ?

Le transfert latéral de carbone est fortement influencé par les précipitations, atteignant des valeurs plus élevées lors des années très humides. La tendance opposée est observée pour la PNE, puisque la couverture nuageuse réduit l'efficacité de la photosynthèse. Ainsi, la surestimation du stockage de carbone dans la forêt boréale sera probablement plus importante les années de fortes précipitations. Comme dans un futur proche, les projections prédisent un climat plus humide pour la région boréale, nous pouvons donc anticiper un puit de carbone terrestre moins efficace pour cette région.



COMMENT C-CASCADES VA-T-IL ABORDER CETTE QUESTION ?

C-CASCADES va améliorer la compréhension du transfert latéral de carbone ainsi que sa quantification à l'échelle locale dans des environnements très diversifiés incluant tous les systèmes du continuum aquatique reliant les continents aux océans: des ruisseaux alpins aux rivières de plaine, des fleuves à leur estuaire. De plus, de nouvelles technologies de mesures vont être développées, une étape cruciale pour mieux comprendre le cycle du carbone dans les milieux aquatiques continentaux et ses perturbations liées à l'activité humaine.

2. Öquist MG, Bishop K, Grelle A, Klemedtsson L, Kohler SJ, Laudon H, Lindroth A, Lofvenius MO, Wallin MB, Nilsson MB. 2014. The Full Annual Carbon Balance of Boreal Forests Is Highly Sensitive to Precipitation. Environmental Science & Technology Letters 1: 315-319.

..... À l'échelle régionale : l'exemple de l'Union Européenne

Le continuum aquatique reliant les continents aux océans déplace le carbone du lieu où le CO₂ est absorbé (PNE) induisant ainsi une incertitude pour les bilans de carbone régionaux. Par exemple, une étude majeure³ a montré que ce transfert latéral de carbone à l'échelle de l'ensemble des pays de l'Union Européenne est en fait comparable à la quantité de carbone accumulée dans les forêts européennes (Fig. 2).

De plus, une part importante du carbone qui se déverse dans le milieu aquatique à partir du sol, se décompose dans les ruisseaux, rivières, lacs, fleuves et estuaires et est réémise vers l'atmosphère sous forme de CO₂ et de CH₄ avant d'atteindre l'océan. Tout ceci contribue à une surestimation de la capacité de stockage du CO₂ anthropique par les écosystèmes terrestres européens.

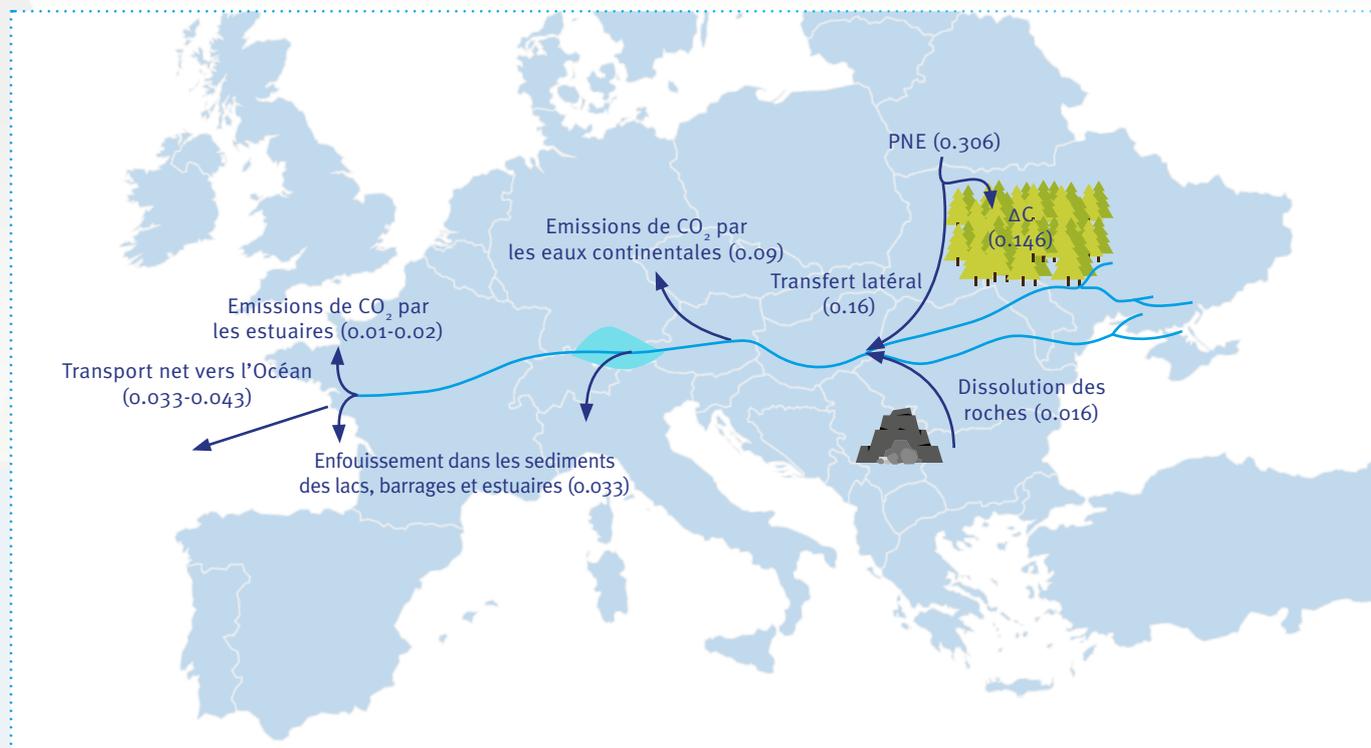


Fig. 2 – Cycle du carbone à l'échelle européenne incluant le transport latéral le long du continuum aquatique continent-océan (les flux sont en GtC.an⁻¹). La décomposition de cette boucle entre les flux naturels et ceux modifiés par l'activité humaine n'a pas encore été établie.

Enfin, le cycle du carbone le long du système aquatique continental a été profondément modifié par les activités humaines (p.ex. via l'érosion engendrée par l'agriculture, les eaux usées domestiques et industrielles riches en carbone organique dissous déversées dans le milieu aquatique après un traitement incomplet, la construction de barrages,...) et ce phénomène

va s'amplifier dans les décennies à venir. C'est pourquoi il est crucial de comprendre l'influence qu'auront le changement climatique et ces activités humaines sur les flux latéraux de carbone le long du continuum aquatique reliant les continents aux océans, ainsi que sur les échanges associés de CO₂ et de CH₄ avec l'atmosphère.



COMMENT C-CASCADES VA-T-IL ABORDER CETTE QUESTION ?

C-CASCADES propose de mieux comprendre, quantifier et modéliser le transport de carbone et les processus de transformations le long du continuum aquatique terrestre dans des régions aux caractéristiques climatiques et environnementales contrastées : du bassin de la Seine à celui du Danube, du fleuve Amazone à la région Arctique. Toutes ces études devraient conduire à des bilans régionaux de carbone plus précis. Elles permettront aussi de quantifier les changements passés et futurs des flux de carbone naturels et anthropiques des milieux aquatiques continentaux et les facteurs climatiques et environnementaux qui les gouvernent.

3. Ciais, P. et al.: The impact of lateral carbon fluxes on the European carbon balance. *Biogeosciences*, 5, 1259–1271, 2008. doi:10.5194/bg-5-1259-2008.

..... À l'échelle globale

A l'échelle globale, les perturbations du cycle du carbone dues aux activités humaines (émissions de CO₂ liées à l'utilisation du carbone fossile, aux changements d'usage des sols,...) négligent en général la contribution du continuum aquatique reliant les continents aux océans⁴ (Fig. 3). Il a pourtant été démontré que la prise en compte des flux de carbone de ces systèmes aquatiques continentaux pouvait

modifier les différentes composantes des bilans de carbone anthropiques, en déterminant dans quel réservoir est finalement stocké le carbone émis, fixé initialement par les plantes ou dissous dans l'océan⁵ (Fig. 4). Il est cependant important de mentionner qu'il subsiste de larges incertitudes sur la quantification du rôle du continuum aquatique dans le cycle global du carbone.

Bilan global de CO₂ anthropique excluant le continuum aquatique (GtC.an⁻¹) - 2004-2013

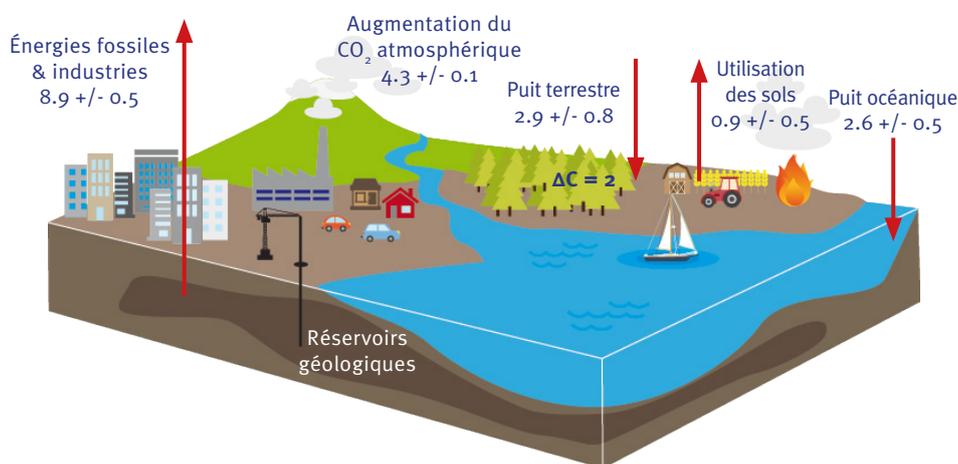


Fig. 3 – Représentation schématisée des perturbations du cycle global du carbone dues aux activités humaines, moyennées sur la décennie 2004-2013. Les flèches rouges représentent : les émissions de CO₂ associées aux énergies fossiles et aux industries, les émissions de CO₂ dues à la déforestation et à l'utilisation des sols, et la séquestration de CO₂ par les puits terrestres et océaniques. L'augmentation du CO₂ atmosphérique résulte de la différence entre ces flux. Source : Le Quéré et al., 2015⁴.

C-CASCADES va faire avancer la frontière des connaissances, en incluant les flux de carbone et leurs rétroactions le long du continuum aquatique dans les modèles Système Terre les

plus avancés pour améliorer la fiabilité des bilans mondiaux de carbone et ainsi aider à éclairer les décideurs politiques en matière de climat.

Bilan global de CO₂ anthropique incluant le continuum aquatique (GtC.an⁻¹) - 2004-2013

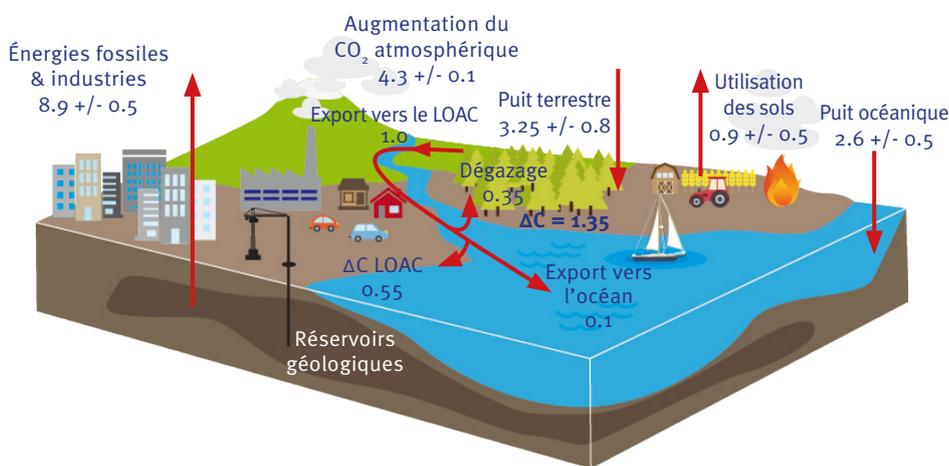


Fig. 4 – Représentation des perturbations des flux naturels de CO₂ en présence des processus du continuum aquatique reliant les surfaces continentales aux océans (LOAC pour 'Land-Ocean Aquatic Continuum') : transport du carbone dans les rivières (export vers le LOAC), sa décomposition dans les eaux de surface (rivières et lacs) qui rejette du CO₂ vers l'atmosphère (dégazage) et son accumulation dans les sédiments des lacs et réservoirs (ΔC LOAC). Source : Regnier et al., 2013⁵. Il est à noter qu'à cause du carbone exporté vers les rivières, le stockage du carbone anthropique par les écosystèmes terrestres (ΔC = 1,35 GtC.an⁻¹) est significativement plus faible que dans les analyses antérieures qui supposent que tout le carbone fixé par la végétation s'accumule dans les écosystèmes terrestres (ΔC = 2 GtC.an⁻¹ dans la Fig.3).



COMMENT C-CASCADES VA-T-IL ABORDER CETTE QUESTION ?

C-CASCADES va étudier les principaux processus qui déterminent le rôle du continuum aquatique reliant continents et océans dans le cycle global du carbone : contributions des sols, des rivières et des fleuves, des lacs et des réservoirs, des sédiments aquatiques, et de l'interface entre zones côtières et océan ouvert. La représentation de ces processus dans les modèles Système Terre va permettre d'établir un bilan de carbone complet et de réduire les incertitudes, en incluant explicitement les milieux aquatiques continentaux. Cette démarche est essentielle si l'on veut obtenir des projections climatiques fiables, éléments de référence pour les politiques sur le climat.

4. Le Quéré, C. et al.: Global Carbon Budget 2014. *Earth Syst. Sci. Data*, 7, 47-85, 2015.

5. Regnier P. et al.: Anthropogenic perturbation of the carbon fluxes from land to ocean. *Nature Geoscience*, 6, 597-607, 2013.



'C-CASCADES – Carbon Cascades from Land to Ocean in the Anthropocene'

Financement: Ce projet est financé par l'Union Européenne grâce au programme de recherche et d'innovation Horizon 2020 (convention de subvention No 643052 – Actions Marie Skłodowska-Curie – Innovative Training Network) ainsi que par le gouvernement Suisse.

Durée: 01.01.2015 > 31.12.2018

Consortium: Le consortium est composé de 9 partenaires académiques et de 4 partenaires intersectoriels: Université Libre de Bruxelles (Belgique); University of Exeter (Royaume-Uni); Institut Pierre-Simon Laplace-CNRS (France); Max-Planck Institute for Meteorology (Allemagne); University of Bristol (Royaume-Uni); Uppsala Universitet (Suède); Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (Suisse); Swiss Federal Institute of Technology Zurich (Suisse); GEOMAR Helmholtz Center for Ocean Research Kiel (Allemagne); Deltares (Pays-Bas); Kongsberg Maritime Contros GmbH (Allemagne); the Global Carbon Project (Australie); Veolia (France).

Coordinateur: Prof. Pierre Regnier (ULB) • **Gestionnaire de projet:** Emily Mainetti (emainett@ulb.ac.be)

Site web: <http://c-cascades.ulb.ac.be>

Contributeurs à la création de cette brochure: Pierre Regnier, Philippe Ciaï, Gesa Weyhenmeyer, Tatiana Ilyina, Josette Garnier, Audrey Marescaux et Emily Mainetti.

Graphisme: Celine Kerpelt – Curlie.be

