

Dynamique des formes du carbone dans le continuum aquatique de la Seine

Audrey Marescaux^{1,*}, Anunciacion Martinez¹, Abdelkader Azougui¹, Sébastien Bosc¹,
Benjamin Mercier¹, Alberto Vieira Borges², Vincent Thieu¹, Josette Garnier¹

¹ Sorbonne Universités, UPMC, CNRS, EPHE, UMR 7619 METIS, 4 place Jussieu, 75005 PARIS, France

² Université de Liège, Unité d'Océanographie Chimique, Institut de Physique (B5), B-4000, Belgium

* audrey.marescaux@upmc.fr

Résumé

Les émissions de dioxyde de carbone (FCO₂) des rivières ont été largement sous-estimées dans les bilans globaux de carbone. Récemment, plusieurs études ont quantifié ce flux entre $0,65_{+0,20}^{-0,17}$ PgC an⁻¹ (Lauerwald et al., 2015) et $1,80 \pm 0,25$ PgC an⁻¹ (Raymond et al., 2013). Afin d'améliorer ces estimations, de nouvelles études à l'échelle de bassins régionaux sont nécessaires. Le bassin versant de la Seine est un cas d'étude typique où s'exercent des pressions anthropiques fortes (agriculture intensive et population très dense) et dont les flux latéraux de carbone doivent être caractérisés.

Une stratégie d'échantillonnage de 40 sites comprenant différent types d'eau (petits cours d'eau, grands axes urbains, lacs et réservoirs, eaux souterraines), avec diverses occupations du sol (prairies, cultures forestières, zones humides et zones urbanisées), sur trois périodes hydrologiques contrastées, a été réalisée en 2016. Le carbone organique et inorganique, particulaire et dissous ont été analysés, ainsi que la pression partielle de CO₂ (pCO₂). La pCO₂ a été mesurée directement grâce à une technique utilisant des seringues couplées à la spectroscopie infrarouge. Une augmentation de la pCO₂ (de 1000 ppmv à 6000 ppmv) a été observée en lien avec les conditions hydrologiques et les occupations du sol. En effet, les valeurs les plus élevées ont été observées pour les prairies et les zones humides. De plus, les concentrations en carbone organique dissous semblent fortement liées aux pCO₂. Parallèlement, la détermination des pCO₂ de manières indirectes en utilisant le programme CO2SYS a permis de trouver une relation linéaire robuste avec les pCO₂ mesurées directement. Celle-ci nous a permis de reconstituer, à l'échelle de l'ensemble du bassin, l'évolution des pCO₂ en fonction de chroniques longues. Depuis 1976, la Seine apparaît comme une source nette de carbone et l'hétérotrophie y est plus prononcée le long de l'axe principal à l'aval de la Seine que dans ses secteurs d'amont. Les pCO₂ évoluent suivant les tendances des pollutions domestiques et industrielles qui diminuent progressivement depuis 1990.

1 Contexte

L'augmentation de la concentration du dioxyde de carbone (CO_2) dans l'atmosphère est observée grâce à des mesures en continu depuis 1958 (Fig.1a). La reconstruction des concentrations en CO_2 dans l'atmosphère grâce aux carottes glacières (Fig. 1b) met en évidence que les valeurs actuelles sont les plus élevées depuis 1000 ans (Etheridge et al., 1996 ; MacFarling Meure et al., 2006). Le GIEC estime même qu'elles sont les plus élevées depuis 800 000 ans. Depuis l'époque préindustrielle, une augmentation des concentrations de CO_2 atmosphérique de 40% est observée due à l'utilisation de combustibles fossiles (rejet de 8,3 [7,6 à 9,0] $\text{GtC} \text{ an}^{-1}$ moyenné sur 2002-2011) ainsi qu'aux changements d'utilisation des sols (rejet de 0,9 [0,1 à 1,7] $\text{GtC} \text{ an}^{-1}$ moyenné sur 2002-2011). Et ce, malgré une augmentation des puits de carbone terrestres et océaniques d'environ 30% chacun sur la période 1750-2011 (GIEC 2014, AR5).

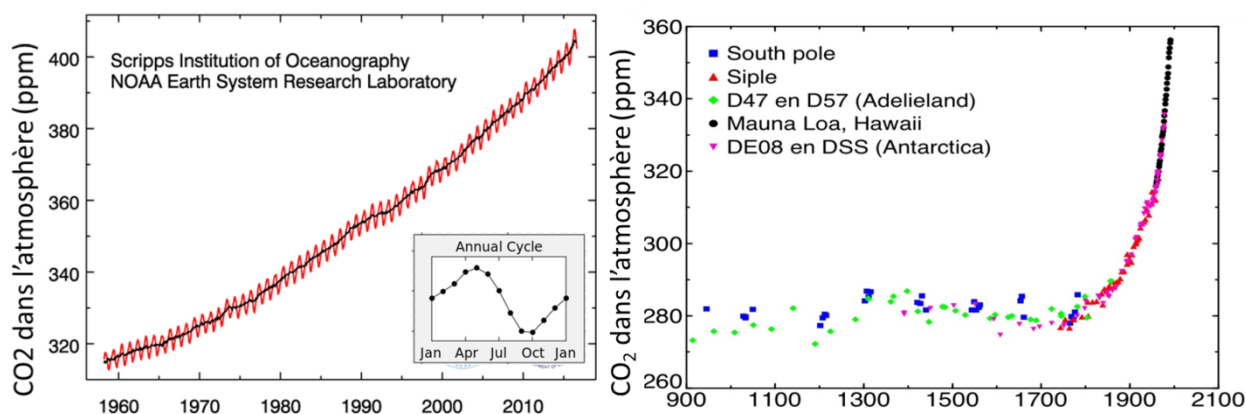


Fig. 1a) Enregistrement de concentrations en dioxyde de carbone atmosphérique à l'observatoire de Mauna Loa (Scripps CO_2 , NOAA-ESRL Physical Sciences Division) ; Fig. 1b) Concentrations en CO_2 dans l'atmosphère issues de mesures dans des carottes glacières avant 1958 (Etheridge et al., 1996 ; MacFarling Meure et al., 2006) et à l'observatoire de Mauna Loa depuis 1958 (Scripps CO_2 , NOAA-ESRL Physical Sciences Division).

Selon le GIEC (2014, AR5), l'accumulation de 240 [230 à 250] GtC dans l'atmosphère depuis 1750 est la plus grande contribution au réchauffement du système climatique terrestre ainsi qu'à l'acidification des océans. L'augmentation des températures du globe observée est de 0,85 [0,65 à 1,06] $^{\circ}\text{C}$ au cours de la période 1880 – 2012. Une diminution des glaciers du Groenland et en Antarctique est également observée ainsi qu'une augmentation du niveau moyen des mers (élévation de 0,19 m [de 0,17 à 0,21 m] entre 1901 et 2010) (GIEC 2014, AR5) et la destruction des habitats côtiers (Harley et al., 2006).

Malgré le rôle primordial du cycle du carbone dans notre système climatique, les échanges latéraux de carbone le long du continuum aquatique Terre-Océan ont longtemps été sous-estimés. Plus précisément, les rivières ont été représentées par un tuyau sans échange avec l'atmosphère, les sédiments, les lacs et les zones humides (Cole et al., 2007). Depuis une dizaine d'années, des études (2007, Cole et al., 2008, 2009, Battin et al., 2009, Tranvik et al. 2011, Aufdenkampe et al. 2013, Regnier et al., 2013) proposent des quantifications des flux entre les rivières et l'atmosphère à l'échelle globale basées sur la modélisation ou, à échelles régionales appuyées par des études in-situ. L'émission de carbone des rivières a été récemment estimée entre $0,65_{-0,17}^{+0,20} \text{ PgC} \text{ an}^{-1}$ (Lauerwald et al., 2015) et $1,80 \pm 0,25 \text{ PgC} \text{ an}^{-1}$ (Raymond et al., 2013). Ce flux non négligeable en comparaison des puits de carbone océanique et terrestre, respectivement $2,9 \pm 0,5$ et $2,5 \pm 0,9 \text{ PgC} \text{ an}^{-1}$ (Le Quéré et al., 2014), mérite d'être précisé à l'aide d'études à l'échelle de bassins versants.

2 Objectifs de l'étude

Cette étude entre dans le cadre d'une thèse (ITN, Marie Curie C-Cascades, <http://c-cascades.ulb.ac.be/>) dont l'objectif principal est de comprendre et de quantifier la dynamique du carbone dans le bassin versant de la Seine. Celui-ci est caractérisé par une population dense et une agriculture intensive qui ont un impact sur le cycle naturel du carbone (Garnier et al., 2001). Afin de réaliser cet objectif, le modèle biogéochimique Riverstrahler (Billen et al., 1994; Garnier et al., 2002) sous la plateforme pyNuts (Thieu et al., 2015) qui modélise actuellement les formes particulières et dissoutes de carbone organique, sera complété grâce à l'ajout d'un module de carbone inorganique. Le modèle permettra de calculer la part de la production primaire et de la respiration dans la séquestration ou l'émission du carbone. Enfin, la réalisation de bilans permettra de comprendre le rôle des hydrosystèmes dans la cascade du carbone et d'étudier les impacts de nouvelles contraintes anthropiques ou climatiques.

Plus précisément l'objectif de ce travail est d'apporter des premières mesures directes en pression partielle en CO₂ dans le bassin de la Seine et d'observer les facteurs de contrôle principaux de la pCO₂. Cela permettra de proposer et de valider l'implémentation de ce module de carbone inorganique dans le modèle PyNuts-Riverstrahler.

3 Méthodologie

3.1 Campagnes dans le bassin versant de la Seine à différentes saisons

Tout d'abord, trois campagnes ont été réalisées en 2016 (Fig. 2), lors de différentes saisons : hivernales, humide durant la crue de juin et sèche au cours de l'été. Lors de celles-ci, quarante stations d'échantillonnage ont été sélectionnées dans le bassin versant de la Seine selon différent(e)s (i) occupations du sol (zone urbaine, boisée, humide, agricole ou prairie), (ii) ordres de Strahler, (iii) écoulements à surface libre et eaux souterraines.

Les mesures et analyses effectuées concernent le carbone (COP, CIP, COD, CID, CO₂) mais également, des gaz à effet de serre (dioxyde de carbone, méthane, oxyde nitreux dissous) et autres variables d'intérêt (pH, alcalinité, température, nutriments, biomasse algale, oxygène...). Ces mesures sous ces différentes conditions devraient permettre d'identifier des facteurs de contrôle de la dynamique du carbone.

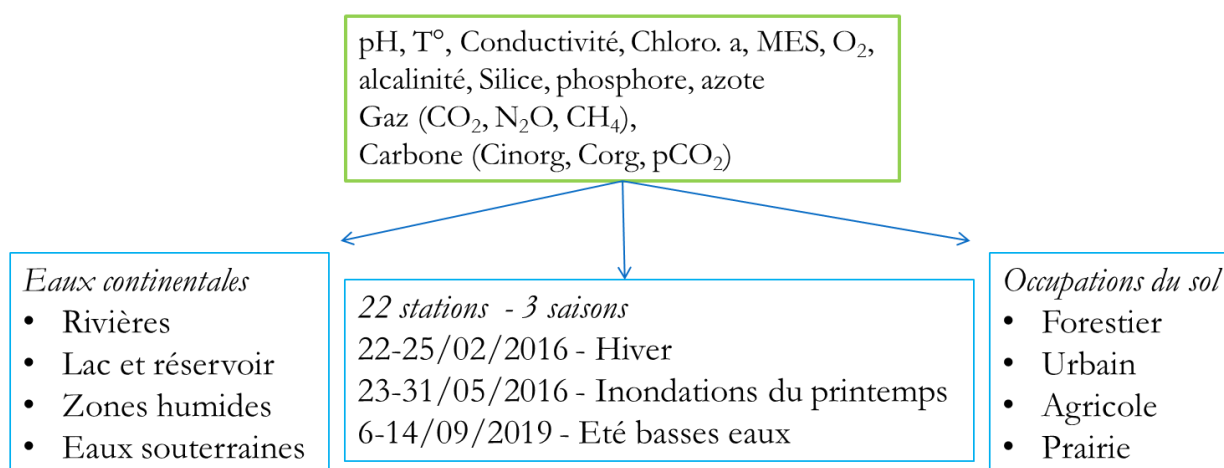


Fig. 2 Stratégie d'échantillonnage

3.2 Comparaison de mesures indirectes - directes de la pression partielle en CO₂ (pCO₂)

Les données de pression partielle en dioxyde de carbone (pCO₂) ont été mesurées de manières directe et indirecte. La technique directe (Abril et al., 2012) consiste à prélever un volume d'eau connu directement dans la rivière à l'aide de quatre seringues et ensuite, d'aspirer de l'air d'un certain volume connu dans ces mêmes seringues sur le site du prélèvement. Les seringues fermées à l'aide d'un robinet-3-voies sont

secouées pendant 10 minutes afin d'équilibrer la concentration en CO₂ dans l'air et dans l'eau grâce à la loi d'Henry. L'air équilibré est ensuite analysé par spectroscopie infrarouge afin de mesurer la pCO₂. Parallèlement, un échantillon d'air est prélevé et mesuré afin de pouvoir recalculer la concentration initiale de pCO₂ dans la rivière en fonction de la pCO₂ dans l'atmosphère, des températures de l'eau de la rivière et dans la seringue et de la solubilité du CO₂.

La technique indirecte est basée sur l'équilibre des carbonates et est notamment réalisable à l'aide du logiciel CO2SYS (Pierrot et al. 2006). Hormis la température de l'eau, un minimum de deux paramètres in situ parmi l'alcalinité, le pH, le carbone inorganique ou les concentrations en carbonate permettent de recalculer la pCO₂. Une comparaison des pCO₂ calculées d'une part, à l'aide du pH, de la température de l'eau et de l'alcalinité et d'autre part, à l'aide du pH, de la température de l'eau et du carbone inorganique dissous a été réalisée. Les techniques directes et indirectes sont également comparées entre-elles.

3.3 Utilisation de données de l'Agence de l'Eau Seine Normandie (AESN) et reconstruction de la dynamique de la pCO₂

Afin de pouvoir reconstruire des dynamiques spatio-temporelles de pCO₂ à l'aide des données de bases de données telles que celles de l'Agence de l'Eau Seine Normandie (AESN), une relation entre les mesures indirectes et directes de pCO₂ est recherchée.

Cette relation permettra également de reconstruire des profils longitudinaux de pCO₂ le long de l'axe principal de la Seine et de comparer ces profils à ceux d'études précédentes sur d'autres gaz à effet de serre comme l'oxyde nitreux (N₂O) (Garnier et al., non publié) et le méthane (CH₄) (Garnier et al., 2013).

4 Résultats

4.1 Analyse des mesures de terrain

Le graphique « boîte à moustaches » ci-dessous représente la pCO₂ dans les rivières par utilisations du sol (agriculture, urbain, forêt, prairie, zones humides) pendant différentes périodes (février, septembre, mai-juin). Les débits et les températures des différentes campagnes sont de 708, 180, 720, m³ s⁻¹ et de 6,8 ; 18,18 ; 13,6 °C respectivement en février, septembre, mai-juin. Tout d'abord, on observe que les rivières situées en zones humides et en prairies ont des pCO₂ supérieures aux autres catégories d'utilisations du sol (Fig. 3). En outre, il existe un gradient des valeurs de pCO₂ entre les périodes : février < septembre < mai-juin, les concentrations étant les plus élevées lors de la crue printanière de mai-juin.

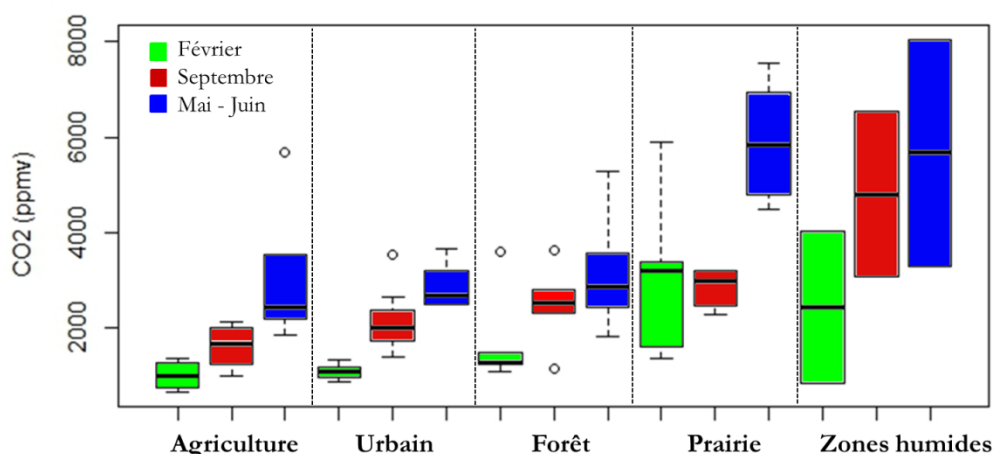


Fig. 3 Pressions partielles en dioxyde de carbone mesurées à l'aide de la technique des seringues couplées à un détecteur IR regroupées par périodes (février, septembre, mai-juin 2016) en fonction de différentes utilisations du sol. Les parties inférieures et supérieures des boîtes représentent le 25^e et 75^e centile (les quartiles inférieurs et supérieurs), la bande dans la boîte est le 50^e percentile (la médiane) et les extrémités représentent le maximum et le minimum des valeurs.

Lors de la crue de mai-juin, les matières organiques dégradables sont probablement plus présentes dans la rivière ce qui peut être dû à la remise en suspension, lors des précipitations intenses, des sédiments de fond de rivière et des berges enrichis en matière organique fraîche en cette période vernale. De plus, un débordement des nappes aquifères plus concentrées en pCO_2 que les rivières peut avoir participé à l'augmentation des concentrations en matières organiques dégradables et en pCO_2 dans les rivières.

En effet, les concentrations en carbone organique dissous sont reliées linéairement avec les pCO_2 . Cette relation semble plus forte pour la période mai-juin et septembre. Pour la période de février, l'augmentation de la concentration en carbone organique dissous ne correspond pas toujours à une augmentation de la pCO_2 (Fig. 4). Les températures hivernales de l'eau (3,5 -9,5 °C) ralentissent de toute évidence le métabolisme des bactéries dégradant le carbone inorganique dissous (Barillier et al., 1993).

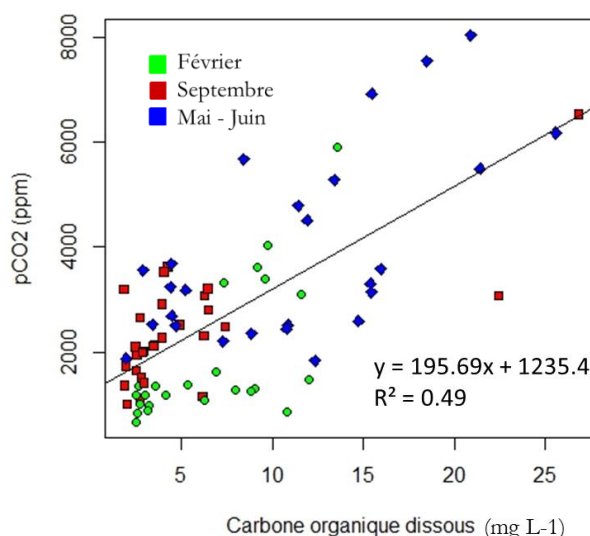


Fig. 4) Pressions partielles en CO_2 (ppm) mesurées à l'aide de la technique des seringues couplées à un détecteur IR en fonction du carbone organique dissous ($mg L^{-1}$) lors de trois périodes (février, septembre, mai-juin 2016).

4.2 Comparaison de mesures indirectes - directes de la pCO_2

Tout d'abord, on observe qu'en utilisant le logiciel CO2SYS pour calculer d'une part, les pCO_2 à l'aide du pH, de la température de l'eau (T) et de l'alcalinité et d'autre part, les pCO_2 à l'aide du pH, de la température de l'eau et du carbone inorganique dissous, les concentrations trouvées sont bien corrélées entre elles avec une pente proche de 1 (Fig. 5a). Toutefois, la pCO_2 calculée à l'aide des pH, T, alcalinité est préférée car les mesures d'alcalinité sont plus présentes que celles du carbone organique dissous dans les bases de données. Une relation a donc été établie entre les pCO_2 calculées grâce aux mesures in situ (pH, T, alcalinité) et la pCO_2 mesurée directement (cf. méthode infrarouge) sur le terrain, pour le bassin versant de la Seine (Fig. 5b). Cette relation, dont la pente est aussi assez proche de 1, permet d'utiliser les bases de données préexistantes en calculant les pCO_2 (pH, T, alcalinité) par le programme CO2SYS et en les corrigeant telle que :

$$pCO_2 \text{ corrigée} = \frac{pCO_2 \text{ calculée}}{1,04} \quad (\text{Eq.1})$$

Où pCO_2 calculée est la pCO_2 calculée à l'aide de COSYS à l'aide des pH, T et alcalinité [ppm].

Cette correction est toutefois mineure ici. Une surestimation est généralement observée avec l'utilisation de CO2SYS mais peut être plus importante dans les milieux acides et riches en acides organiques (Abril et al., 2015).

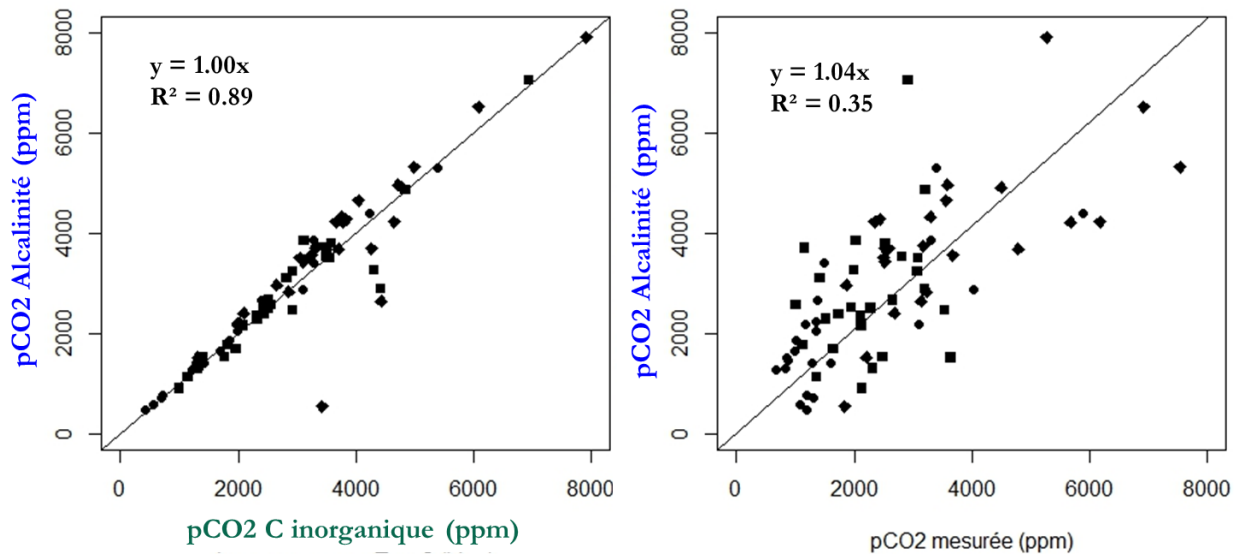


Fig. 5a) Pressions partielles en CO₂ (ppm) calculées par CO2SYS grâce aux pH, température de l'eau et alcalinité en fonction de celles calculées à l'aide des pH, température de l'eau et carbone inorganique dissous, Fig 5b) Pressions partielles en CO₂ (ppm) calculées par CO2SYS grâce aux pH, température de l'eau et alcalinité en fonction des pressions partielles mesurées (ppm) à l'aide de la technique des seringues couplées à un détecteur infrarouge.

4.3 Reconstruction de la pression partielle en dioxyde de carbone

La relation établie précédemment a donc été utilisée pour corriger les données des $p\text{CO}_2$ calculées à partir des valeurs de pH, T et alcalinité issues de l'Agence de l'Eau Seine-Normandie (AESN) pour le bassin versant de la Seine entre 1976 et 2013. Cela permet une reconstitution de la $p\text{CO}_2$ moyennée par mois, par année et regroupée selon l'abondance des données en trois périodes (1976-1995, 1996-2006, 2008-2013).

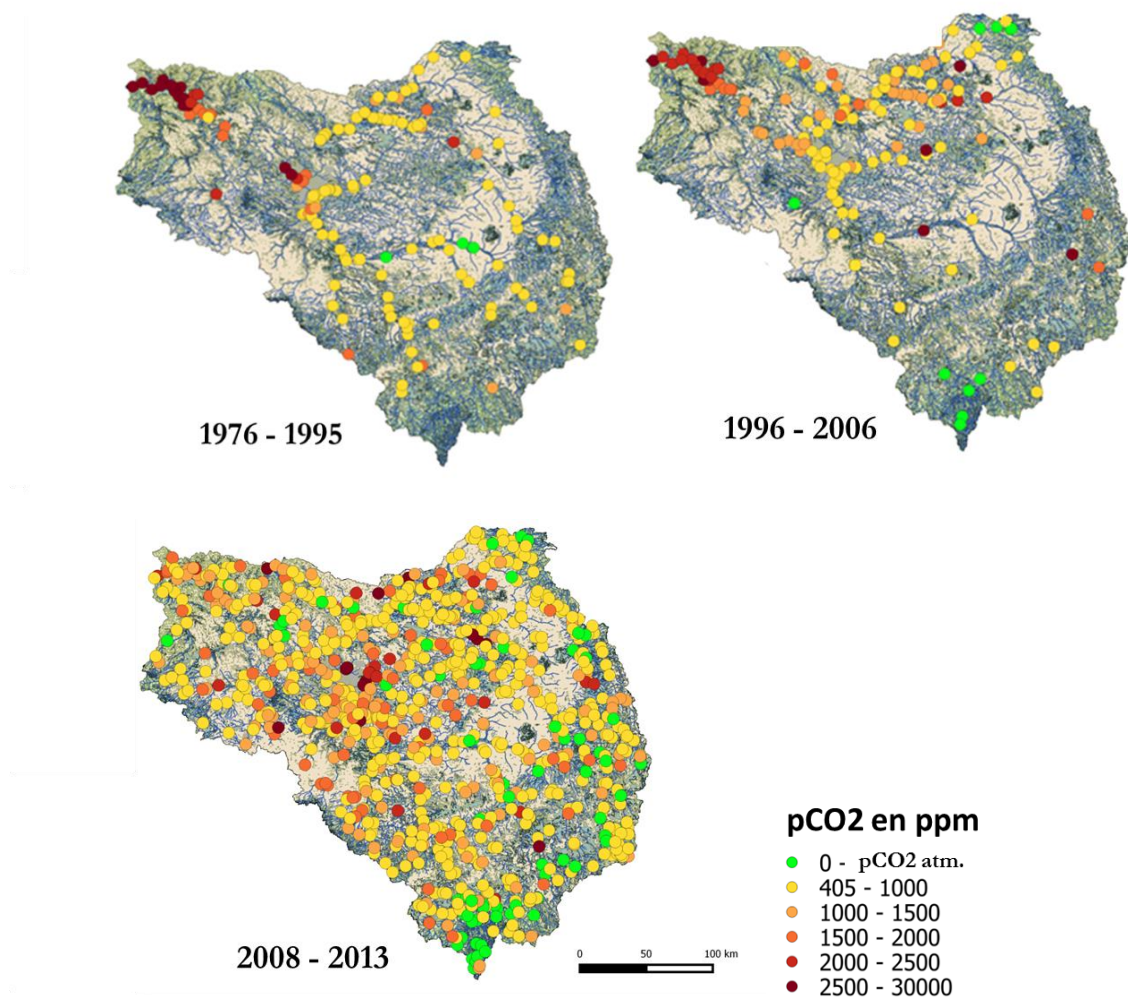


Fig. 6 Pressions partielles en dioxyde de carbone calculées grâce à CO2SYS (pH, T, alcalinité) et corrigées à l'aide de l'équation déterminée précédemment (Eq.1). Les valeurs sont moyennées selon trois périodes (1976-1995, 1996-2006 et 2008-2013). Data source AESN

Pour ces trois périodes, on observe tout d'abord que le bassin versant de la Seine est sursaturé en $p\text{CO}_2$ et est majoritairement hétérotrophe (Fig. 6). Cependant, depuis 1976, on observe une diminution des $p\text{CO}_2$ à la sortie de Paris ainsi qu'à l'estuaire. Enfin, on observe que les échantillons en équilibre avec l'atmosphère ou sous-saturés en $p\text{CO}_2$ se situent principalement dans les petits ordres d'amont alors que les axes principaux sont plus concentrés en $p\text{CO}_2$.

Une analyse de ces mêmes données (AESN) en suivi temporel des $p\text{CO}_2$ de l'amont et de l'aval du bassin versant de la Seine (séparés à la confluence Seine et Marne) met en évidence que les $p\text{CO}_2$ ont principalement diminué à l'aval du bassin, et ce à partir des années quatre-vingt-dix. On observe également, qu'en moyenne, les $p\text{CO}_2$ du bassin sont toujours supérieures à la concentration atmosphérique en $p\text{CO}_2$ (Fig. 7a).

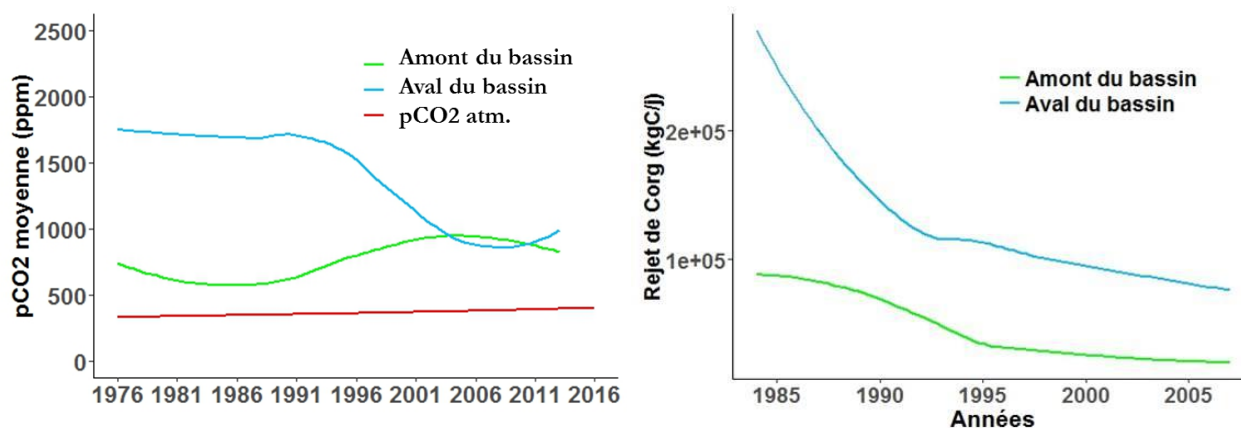


Fig. 7a) Pressions partielles en dioxyde de carbone calculées grâce à CO2SYS (pH, T, alcalinité) et corrigées à l'aide de l'équation déterminée précédemment (Eq.1) moyennées pour l'amont et l'aval du bassin séparés à la confluence Seine et Marne depuis 1976, Fig. 7b) Rejets de carbone organique des stations d'épuration et des industries moyennées pour l'amont et l'aval du bassin séparés à la confluence Seine et Marne depuis 1984.

Comme observé sur la Fig. 7a, on observe que les rejets de carbone organique des stations d'épuration et des industries diminuent aussi à l'amont et à l'aval du bassin versant depuis les années quatre-vingt et plus fortement pour l'aval du bassin. Ainsi, la forte diminution des pCO₂ observées à l'aval du bassin versant est à mettre en lien avec une diminution de carbone organique rejeté dans les rivières (Fig. 7b). Cela conforte l'hypothèse selon laquelle le carbone organique dissous est un facteur de contrôle des concentrations en pCO₂, interprétation évoquée ci-dessus lors de l'analyse des campagnes de terrain.

4.4 Étude de profils de différents gaz à effet de serre

Précédemment à cette étude, des profils longitudinaux de méthane (CH_4) (Garnier et al., 2013) et d'oxyde nitreux (N_2O) (Garnier et al., non publié) ont été réalisés le long de l'axe principal de la Marne et de la basse Seine. La relation établie précédemment pour corriger les valeurs des pCO_2 calculées (pH, T, alcalinité) permet de compléter ces profils de gaz à effet de serre pour une année humide (2010) et sèche (2011).

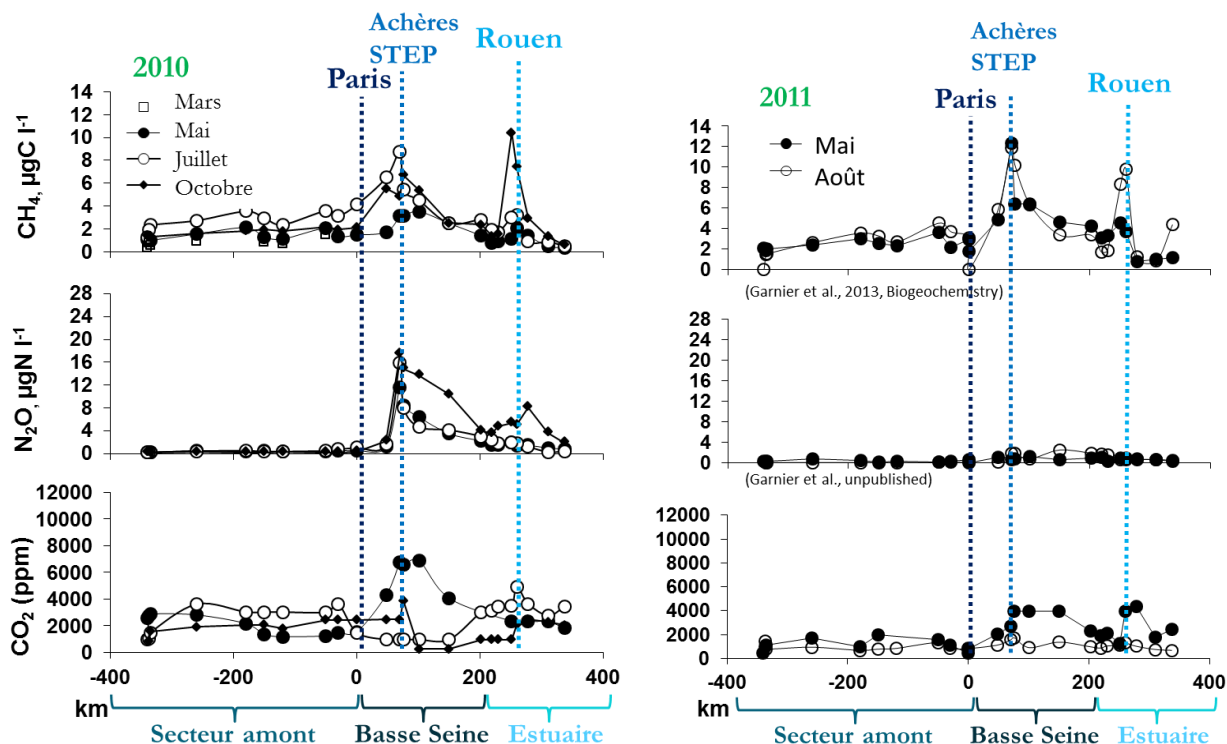


Fig. 8 Concentrations en CH_4 et N_2O mesurées et concentrations en CO_2 calculées le long de l'axe principal de la Marne et de la basse Seine. (Larzacourt = -340km, Paris=0km et Tancarville = 337km).

On observe un parallélisme entre les tendances des concentrations des trois gaz à effet de serre pour l'année humide (2010) ainsi que pour l'année sèche (2011) (Fig. 8). En effet, les concentrations sont maximales lors des sorties des grandes villes telles que Paris (prélèvement à l'aval de la station d'épuration d'Achères) et Rouen. Comme expliqué précédemment, une augmentation de matières organiques biodégradables dans la rivière conduit à une respiration plus importante et une augmentation des pCO_2 .

5 Conclusions

Les différentes mesures in-situ permettent une comparaison de la $p\text{CO}_2$ entre différentes situations étudiées et l'occupation du sol, les valeurs étant plus élevées en période de crue, plus élevées également dans les zones de prairies et les zones humides. Une relation forte entre le carbone organiques dissous et les $p\text{CO}_2$ apparait lors du printemps et de l'été mais semble moins prononcée en hiver. Les températures hivernales ralentissent probablement le métabolisme des bactéries dégradant le carbone organique dissous.

La comparaison des mesures directes (spectroscopie infrarouge) et des estimations indirectes (pH, alcalinité/carbone inorganique, température) de la pression partielle en dioxyde de carbone ($p\text{CO}_2$) permet d'exploiter les bases de données Agence de l'Eau Seine-Normandie et de reconstituer des chroniques spatio-temporelles (depuis 1976).

Nous montrons par les calculs des $p\text{CO}_2$ que le bassin de la Seine est globalement hétérotrophe et plus dans les grands axes de rivières que dans les têtes de bassin. Le bassin de la Seine est donc une source de carbone vers l'atmosphère. Cependant, la $p\text{CO}_2$ à la sortie de Paris et dans l'estuaire diminuent depuis les années 1990 parallèlement à une diminution forte des rejets en carbone organique par les sources ponctuelles des stations d'épuration. Enfin, la $p\text{CO}_2$ reste plus élevée dans les ordres supérieurs de Strahler que dans les petits ordres amont.

La comparaison des $p\text{CO}_2$ calculées le long de profils longitudinaux de l'axe principal de la Marne et de la basse Seine, révèle des tendances similaires à celles du N_2O et du CH_4 en 2010 (année humide) et 2011 (année sèche). Les maximums de concentrations des trois principaux gaz à effet de serre sont observés à la sortie des grandes villes telles que Paris et Rouen.

6 Perspectives

Lors de futurs travaux, des reconstructions de $p\text{CO}_2$ par sous-bassins, saisons et en lien avec les blooms algaux vont être analysées afin d'observer si des périodes clés d'autotrophie/ hétérotrophie apparaissent pour le bassin versant de la Seine. En parallèle, la réalisation éventuelle de nouvelles campagnes permettra de compléter le jeu de données, notamment par une campagne en mai-juin sans crue. Les comparaisons des différents gaz à effet de serre vont se poursuivre en analysant des données plus récentes.

Un module de carbone inorganique en cours de codage va à court terme être introduit dans le modèle Rive de pyNuts-Riverstrahler et devrait permettre de simuler et de quantifier les flux de carbone inorganique et organique dans le réseau hydrographique. Enfin, l'exploration du transfert du carbone sous de nouvelles contraintes (anthropiques et climatiques) sera réalisée.

Bibliographie

- Abril, G., Bouillon, S., Darchambeau, F., Teodoru, C. R., Marwick, T. R., Tamoo, F., ... Borges, A. V. (2015). Technical Note: Large overestimation of pCO₂ calculated from pH and alkalinity in acidic, organic-rich freshwaters. *Biogeosciences*, 12(1), 67–78. <http://doi.org/10.5194/bg-12-67-2015>
- Aufdenkampe, A. K., Mayorga, E., Raymond, P. A., Melack, J. M., Doney, S. C., Alin, S. R., ... Yoo, K. (2011). Riverine coupling of biogeochemical cycles between land, oceans, and atmosphere. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 9(1), 53–60. <http://doi.org/10.1890/100014>
- Barillier J., A. . G. (1993). Influence of Temperature and Substrate Concentration on Bacterial Growth Yield in Seine River Water Batch Cultures. *Applied and Environmental Microbiology*, 59(5), 1678–1682.
- Battin, T. J., Luyssaert, S., Kaplan, L. A., Aufdenkampe, A. K., Richter, A., & Tranvik, L. J. (2009). The boundless carbon cycle. *Nature Geosci*, 2(9), 598–600. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1038/ngeo618>
- Billen, G., Garnier, J., & Hanset, P. (1994). Modelling phytoplankton development in whole drainage networks: the RIVERSTRAHLER Model applied to the Seine river system. *Hydrobiologia*, 289(1-3), 119–137. <http://doi.org/10.1007/BF00007414>
- Cole, J. J., Prairie, Y. T., Caraco, N. F., McDowell, W. H., Tranvik, L. J., Striegl, R. G., ... Melack, J. (2007). Plumbing the Global Carbon Cycle: Integrating Inland Waters into the Terrestrial Carbon Budget. *Ecosystems*, 10(1), 172–185. <http://doi.org/10.1007/s10021-006-9013-8>
- Division Physical Sciences, & NOAA Earth System Research Laboratory. (n.d.). CO₂ Scripps program. Retrieved October 27, 2016, from <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/full.html>
- Etheridge, D. M., Steele, L. P., Langenfelds, R. L., Francey, R. J., Barnola, J. M., & Morgan, V. I. (1996). Natural and anthropogenic changes in atmospheric CO₂ over the last 1000 years from air in Antarctic ice and firn. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 101(D2), 4115–4128. <http://doi.org/10.1029/95JD03410>
- Garnier, J., Billen, G., Hannon, E., Fonbonne, S., Videnina, Y., & Soulie, M. (2002). Modelling the Transfer and Retention of Nutrients in the Drainage Network of the Danube River. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 54, 285–308. <http://doi.org/10.1006/ecss.2000.0648>
- Garnier, J., Servais, P., Billen, G., Akopian, M., & Brion, N. (2001). Lower Seine River and Estuary (France) Carbon and Oxygen Budgets during Low Flow. *Estuaries*, 24(6B), 964–976. <http://doi.org/10.2307/1353010>
- Garnier, J., Vilain, G., Silvestre, M., Billen, G., Jehanno, S., Poirier, D., ... Abril, G. (2013). Budget of methane emissions from soils, livestock and the river network at the regional scale of the Seine basin (France). *Biogeochemistry*, 116(1-3), 199–214. <http://doi.org/10.1007/s10533-013-9845-1>
- GIEC. (2014). *Changements climatiques 2014: Rapport de synthèse. Contribution des Groupes de travail I, II et III au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Sous la direction de l'équipe de rédaction principale]*. Genève, Suisse.
- Gypens, N., Borges, a. V., & Lancelot, C. (2009). Effect of eutrophication on air-sea CO₂ fluxes in the coastal Southern North Sea: A model study of the past 50 years. *Global Change Biology*, 15, 1040–1056. <http://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01773.x>
- Harley, C. D. G., Randall Hughes, A., Hultgren, K. M., Miner, B. G., Sorte, C. J. B., Thornber, C. S., ... Williams, S. L. (2006). The impacts of climate change in coastal marine systems: Climate change in coastal marine systems. *Ecology Letters*, 9(2), 228–241. <http://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2005.00871.x>

- Lauerwald, R., Laruelle, G. G., Hartmann, J., Ciais, P., & Regnier, P. A. G. (2015). Spatial patterns in CO₂ evasion from the global river network. *Global Biogeochemical Cycles*, 534–554. <http://doi.org/10.1002/2014GB004941>. Received
- MacFarling Meure, C., Etheridge, D., Trudinger, C., Steele, P., Langenfelds, R., Van Ommen, T., ... Elkins, J. (2006). Law Dome CO₂, CH₄ and N₂O ice core records extended to 2000 years BP. *Geophysical Research Letters*, 33(14), 2000–2003. <http://doi.org/10.1029/2006GL026152>
- Pierrot, D., Lewis, D. E., & Wallace, D. W. R. (2006). MS Excel Program Developed for CO₂ System Calculations. ORNL/CDIAC-105a. *Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tennessee*. http://doi.org/10.3334/CDIAC/otg.CO2SYS_XLS_CDIAC105a
- Raymond, P. A., Hartmann, J., Lauerwald, R., Sobek, S., McDonald, C., Hoover, M., ... Guth, P. (2013). Global carbon dioxide emissions from inland waters. *Nature*, 503(V), 355–359. <http://doi.org/10.1038/nature12760>
- Regnier, P., Friedlingstein, P., Ciais, P., Mackenzie, F. T., Gruber, N., Janssens, I. a., ... Thullner, M. (2013). Anthropogenic perturbation of the carbon fluxes from land to ocean. *Nature Geoscience*, 6(8), 597–607. <http://doi.org/10.1038/ngeo1830>
- Thieu, V., Silvestre, M., Billen, G., Garnier, J., Passy, P., Lassaletta, L. (2015) Transferts et exports de nutriments dans les continous rivières – zones côtières - Vers une application générique du modèle biogéochimique Riverstrahler aux grands fleuves de la façade Atlantique Nord-Est. *2nd international conference IS-Rivers*, Lyon – France
- Tranvik, L. J., Downing, J. A., Cotner, J. B., Loiselle, S. A., Striegl, R. G., Ballatore, T. J., ... Knoll, L. B. (2009). Lakes and reservoirs as regulators of carbon cycling and climate. *Limnology and Oceanography*, 54(6, part 2), 2298–2314. http://doi.org/10.4319/lo.2009.54.6_part_2.2298