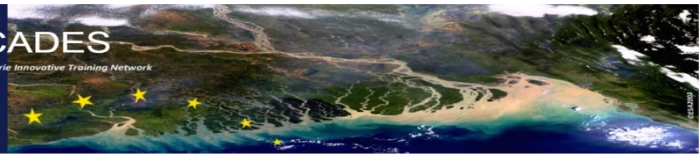
C-cycling from streams to sea:
introducing a new integrative river-estuarine modeling approach applied to the Seine aquatic continuum

Audrey Marescaux, Goulven Laruelle, Josette Garnier, Vincent Thieu

Journées de Modélisation des Surfaces Continentales
Paris, 14-15 novembre 2019



Except where otherwise noted, this work is licensed under
http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/

vincent.thieu@sorbonne-universite.fr

This project has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under the Marie Sklodowska-Curie grant agreement No 643052.

- Pourquoi *(est-ce si compliqué de)* prendre en compte les milieux aquatiques dans les bilans de Carbone ?

- Que nous apprend l'étude d'un système *tempéré* et *ultra-anthropisé* comme la Seine ?

- Les processus physiques et biogéochimiques impliqués dans la cascade du C sont-ils les mêmes le long du *continuum rivière-estuaire* ?

- Pourquoi *(est-ce si compliqué de)* prendre en compte les milieux aquatiques dans les bilans de Carbone ?

- Que nous apprend l'étude d'un système *tempéré* et *ultra-anthropisé* comme la Seine ?

- Les processus physiques et biogéochimiques impliqués dans la cascade du C sont-ils les mêmes le long du *continuum rivière-estuaire* ?

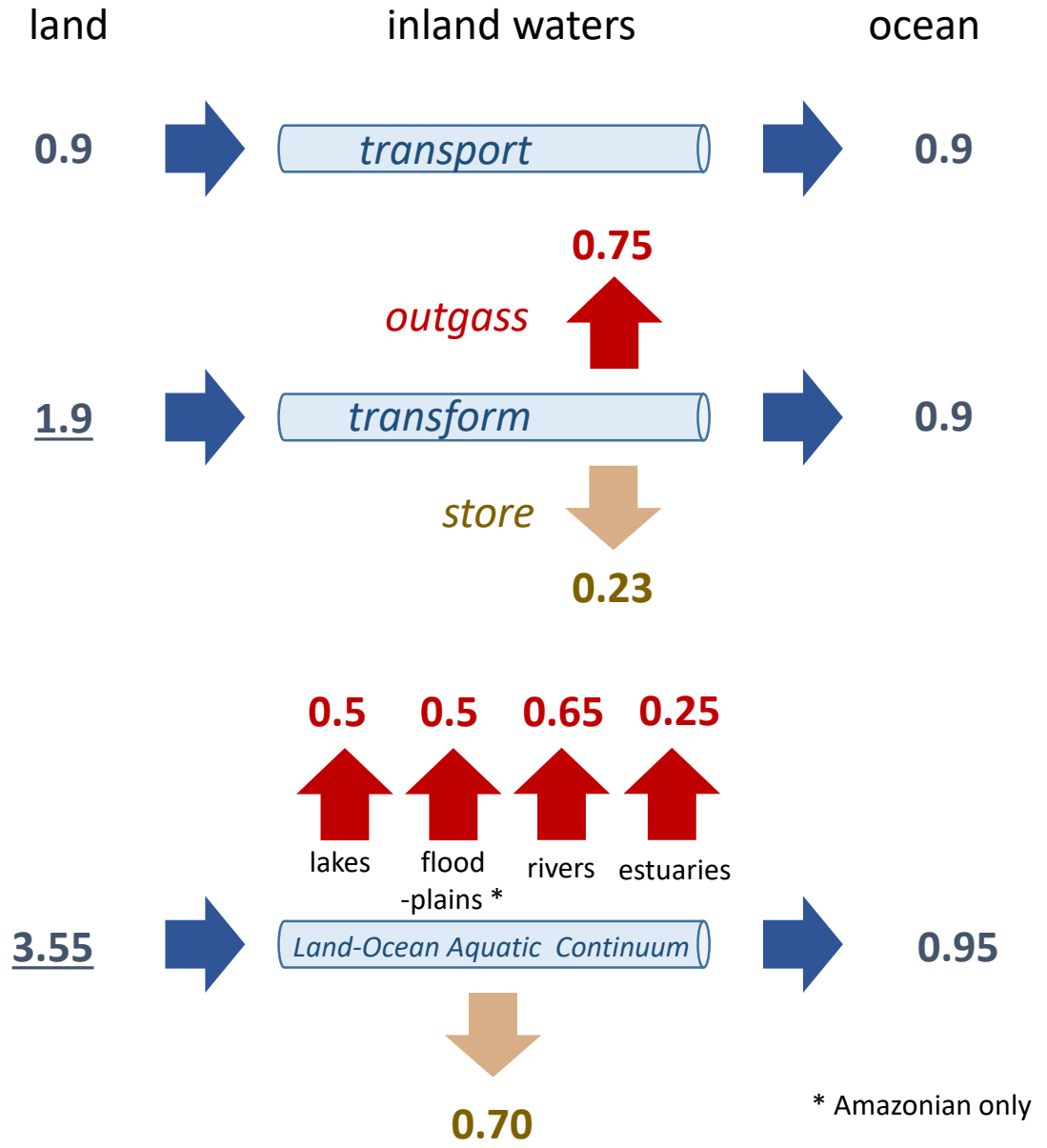
- Bilan de carbone (CO_2) à l'échelle mondiale, **PgC/an**

  - IPCC - AR4, 2007
  - Reconnaissance tardive du rôle actif des hydrosystèmes

  - Cole et al. 2007, IPCC-AR5, 2014 => évasion ~ 1 PgC/an
  - Réévaluation permanente des apports terrestres
    en moy. à + 0.31 PgC/an entre 2007-2017 (Drake et al 2017)

  - Dernier bilan C dans le LOAC, - ITN C-Cascades (2018)
    évasion du CO_2 ~ 1.9 PgC/an et stockage ~ 0.7 PgC/an

  - Hétérogénéité Haute/Moy./Basse latitudes + Hotspots
  - Incertitudes sur les processus et la quantification de l'évasion du CO_2



(C-Cascades Factsheet 2018)

- Pourquoi *(est-ce si compliqué de)* prendre en compte les milieux aquatiques dans les bilans de Carbone ?

- Que nous apprend l'étude d'un système *tempéré* et *ultra-anthropisé* comme la Seine ?

- Les processus physiques et biogéochimiques impliqués dans la cascade du C sont-ils les mêmes le long du *continuum rivière-estuaire* ?

76 000 km²

dont 57% agriculture

22 000 km

réseau hydro d'ordre 7

4 lacs-réservoirs

Totalisant 808 M m3

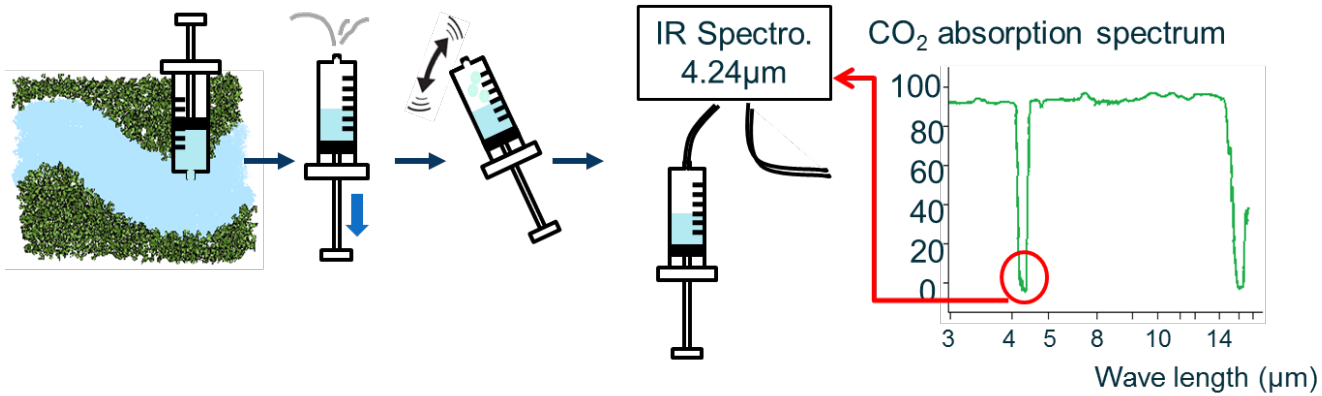
12.4 M habitants

pour l'agglo Paris

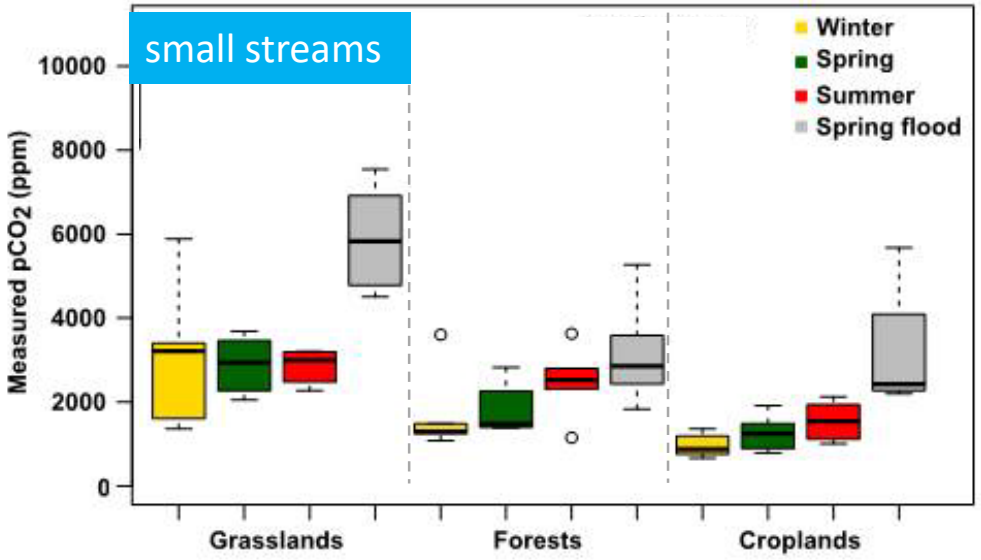
1.5 M m3/jour traités

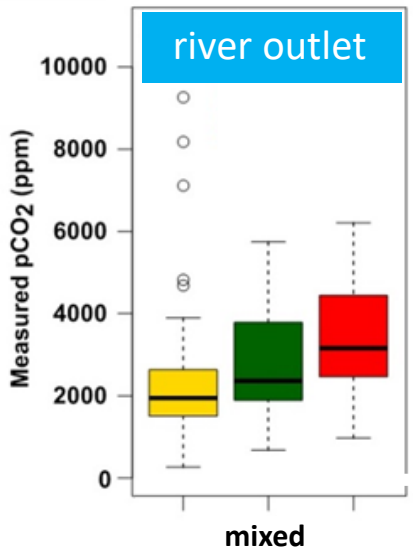
dans la plus grande STEP d'Europe

- Mesures directes des concentrations de CO_2 aquatiques



- Facteurs de contrôle des variations spatiales et temporelles de pCO_2





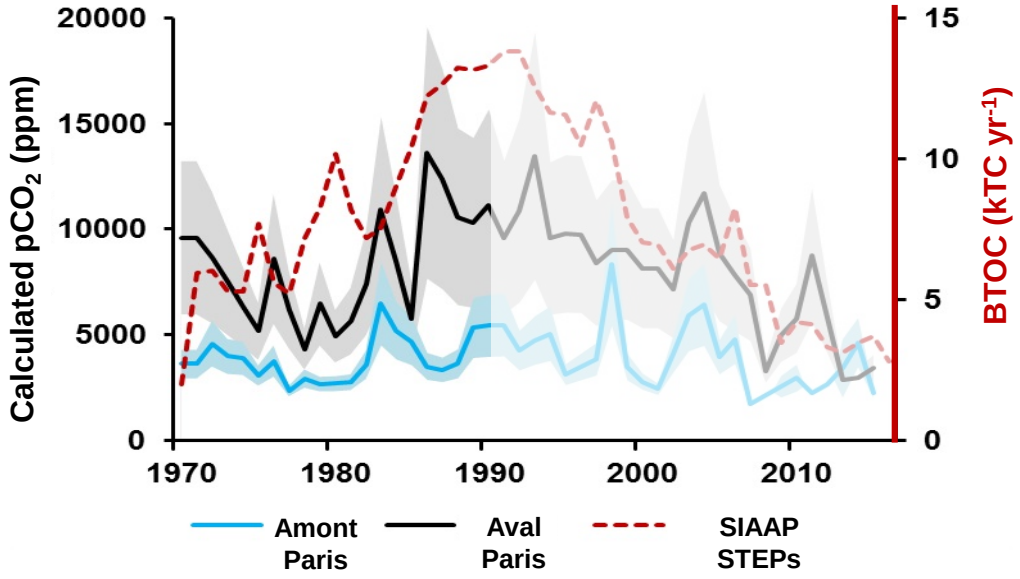
- 4 campagnes de terrain (2015-17)
- 30 sites / 2 saisons / 4 occupations du sol

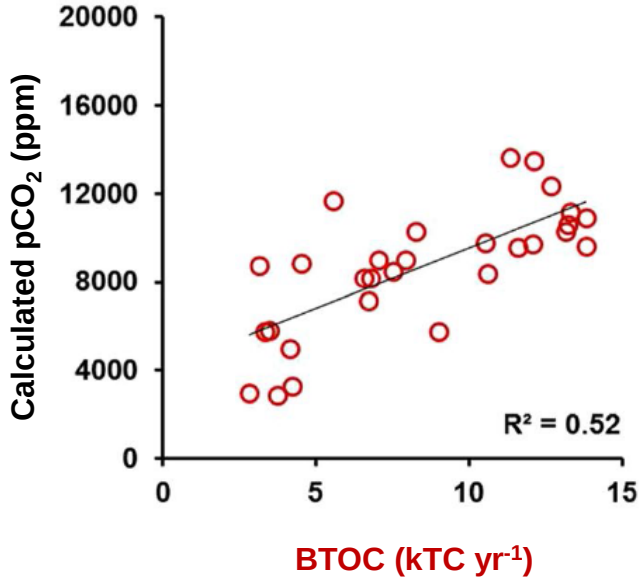
- Contrôle par :
  - les apports de DOC, fct [landuse]
  - la minéralisation, fct [température]
  - l'hydrologie, fct [contrib. GDW]

(Marescaux et al 2018, Scientific Reports)

- Reconstitution des pCO2 et des rejets d'épuration entre 1970 - 2015

  - Calcul de la pCO2 à partir de T°C, pH et alcalinité : 41,208 mesures indirectes (1971-2015)
  - pCO2 >> l'aval de l'agglomération parisienne
  - pCO2 corrélée aux rejets de Carbone total biodégradable (BTOC)
  - Augmentation synchrone avec le développement des réseaux de collecte (… ➔ 1990)



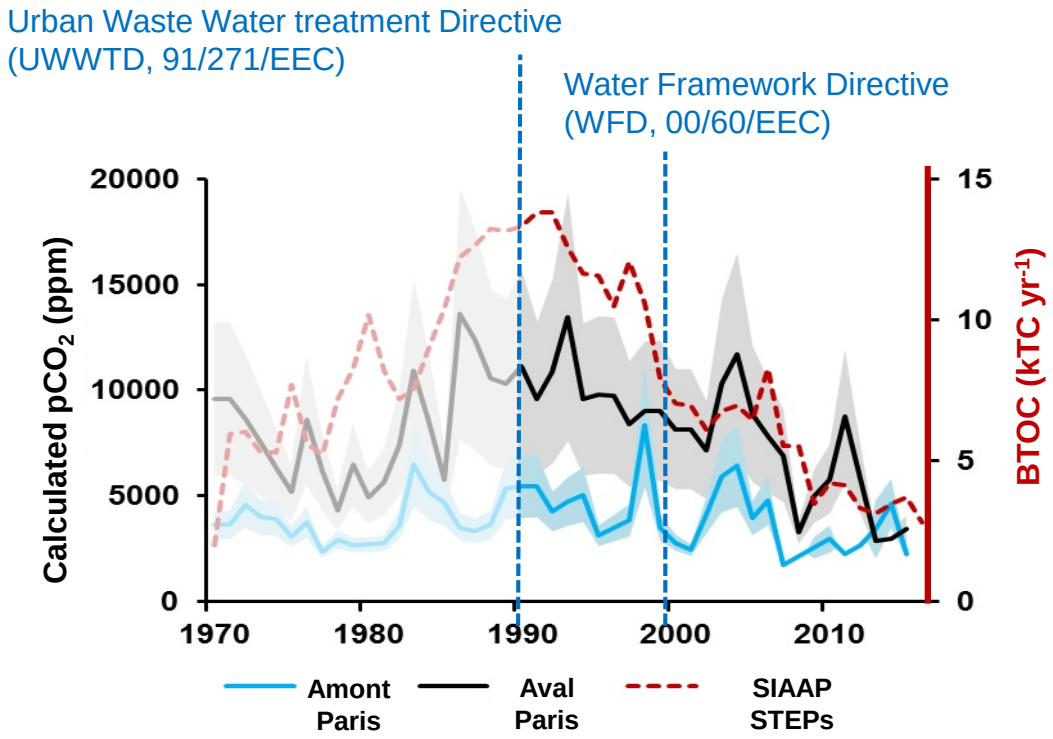


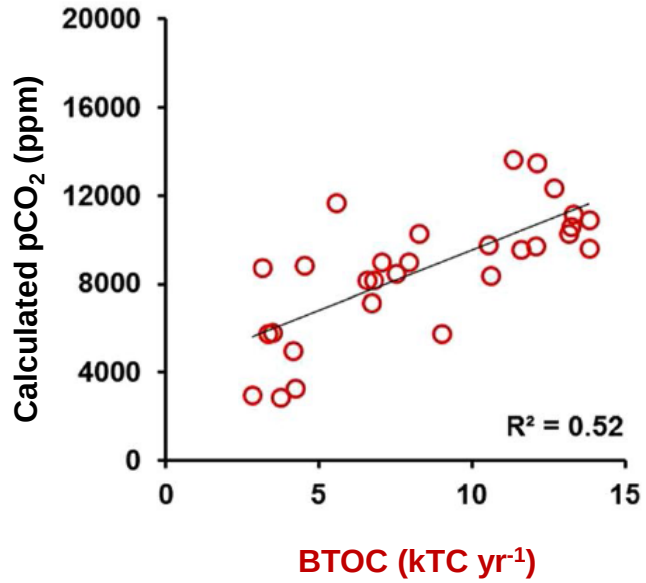
*SIAAP = Syndicat interdépartemental pour l'assainissement de l'agglomération parisienne

(Marescaux et al 2018, Scientific Reports)

- Reconstitution des pCO2 et des rejets d'épuration entre 1970 - 2015

  - Calcul de le pCO2 à partir de T°C, pH et alcalinité : 41,208 mesures indirectes (1971-2015)
  - pCO2 >> l'aval de l'agglomération parisienne
  - pCO2 corrélée aux rejets de Carbone total biodégradable (BTOC)
  - Augmentation synchrone avec le développement des réseaux de collecte (… ➔ 1990)
  - Diminution synchrone avec l'amélioration des traitements en station (1990 ➔ 2000 ➔ …)

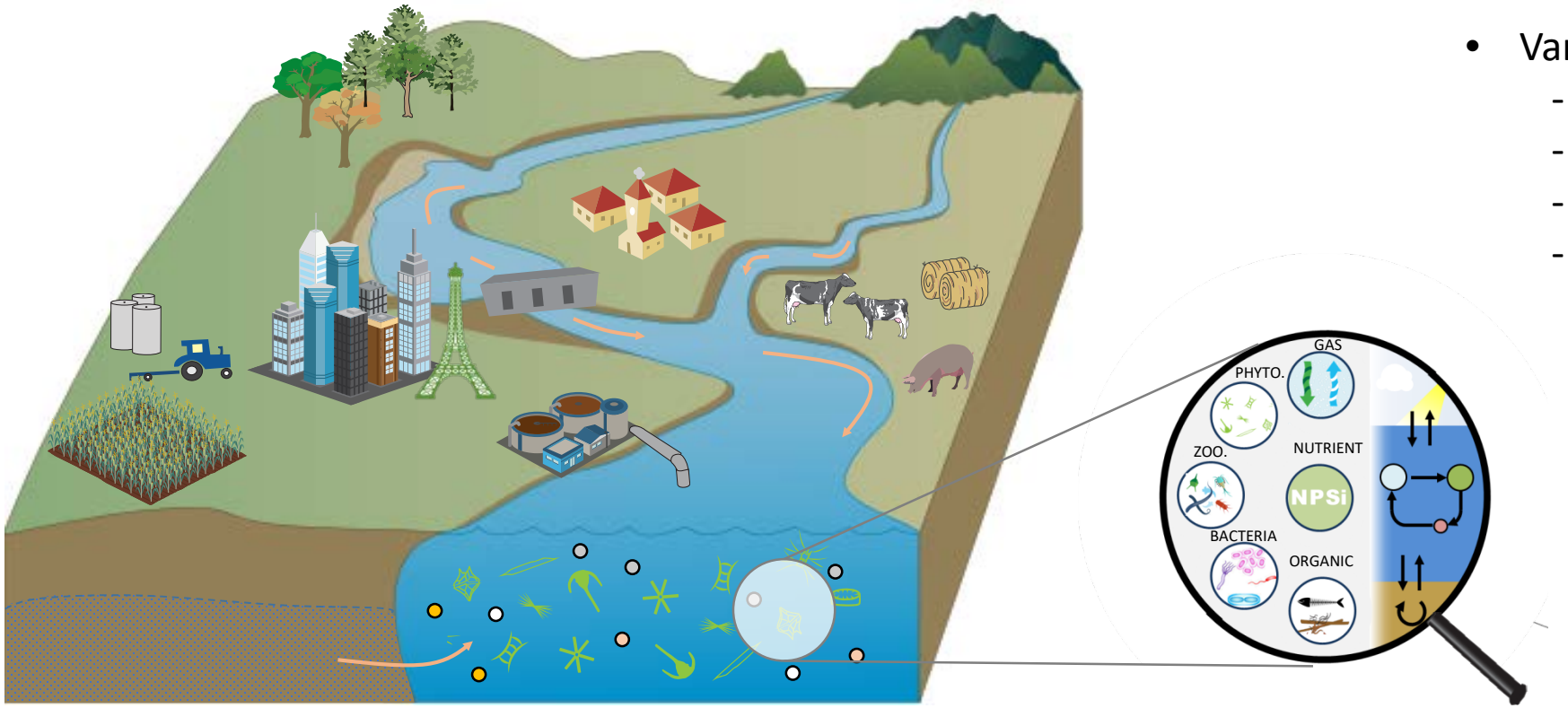




*SIAAP = Syndicat interdépartemental pour l'assainissement de l'agglomération parisienne

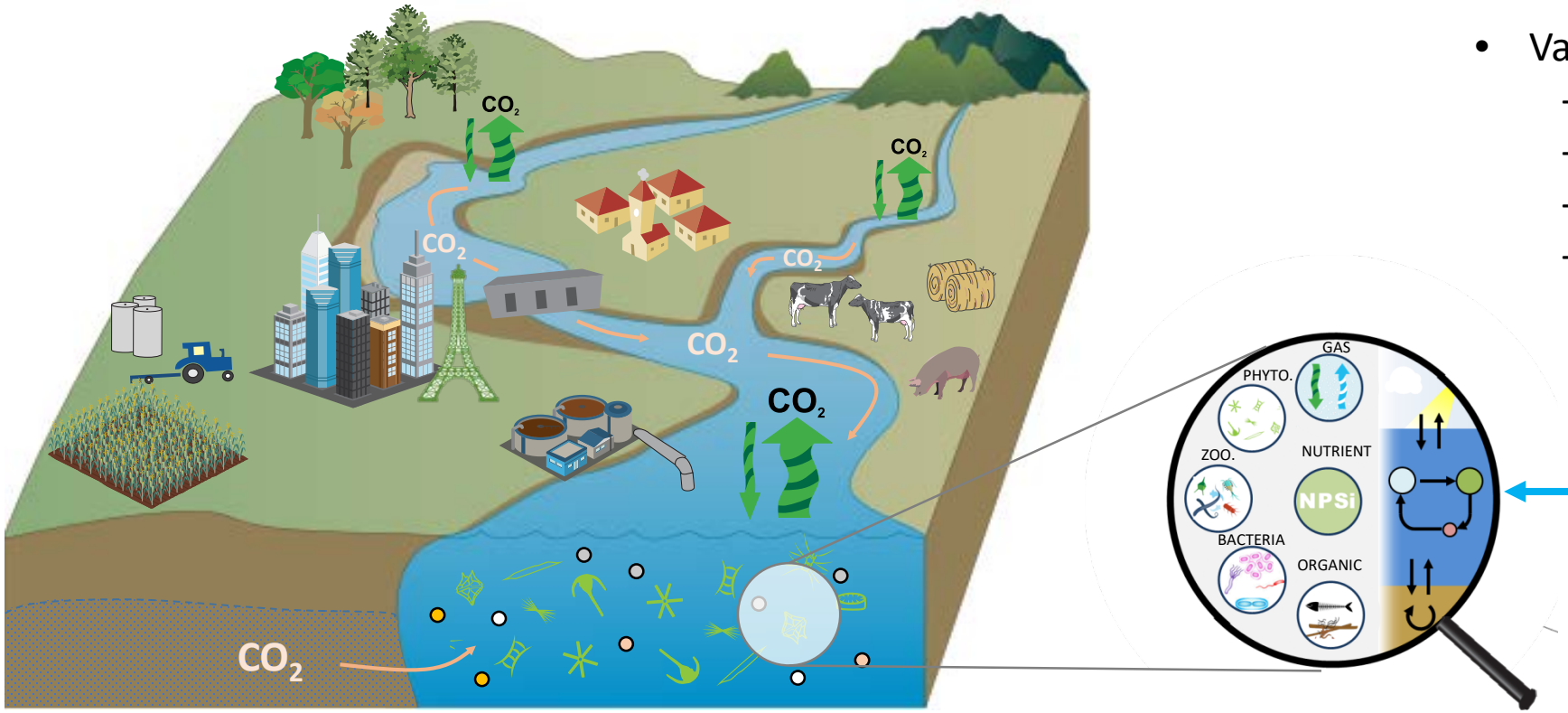
(Marescaux et al 2018, Scientific Reports)

- Appréhender les flux terrestres pour mieux contraindre la modélisation de l'hydrosystème Seine
- Le modèle RIVERSTRAHLER *(Billen & Garnier 1994)*
  - Fonctionnement microscopique des écosystèmes aquatiques (METIS - FIRE)
  - Approche déterministe | Semi-distribuée | saisonalisée



- Variables simulées:
  - nutriments N P Si (multi-formes)
  - phyto- et zoo- planctons
  - bactéries
  - carbone organique (3 classes)

- Appréhender les flux terrestres pour mieux contraindre la modélisation de l'hydrosystème Seine
- Le modèle RIVERSTRAHLER *(Billen & Garnier 1994)*
  - Fonctionnement microscopique des écosystèmes aquatiques (METIS - FIRE)
  - Approche déterministe | Semi-distribuée | saisonalisée



- Variables simulées:
  - nutriments N P Si (multi-formes)
  - phyto- et zoo- planctons
  - bactéries
  - carbone organique (3 classes)

IC — module C inorganique (CO_2, DIC, TA)

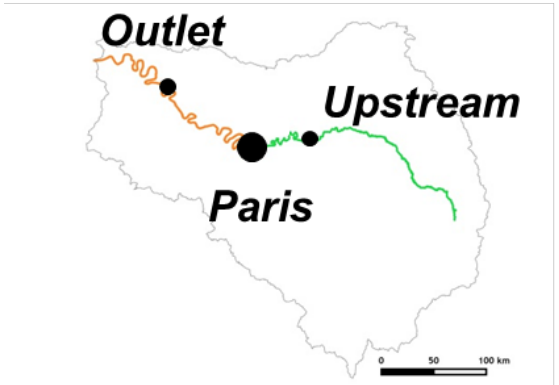
- Evolution saisonnière des concentrations de CO_2

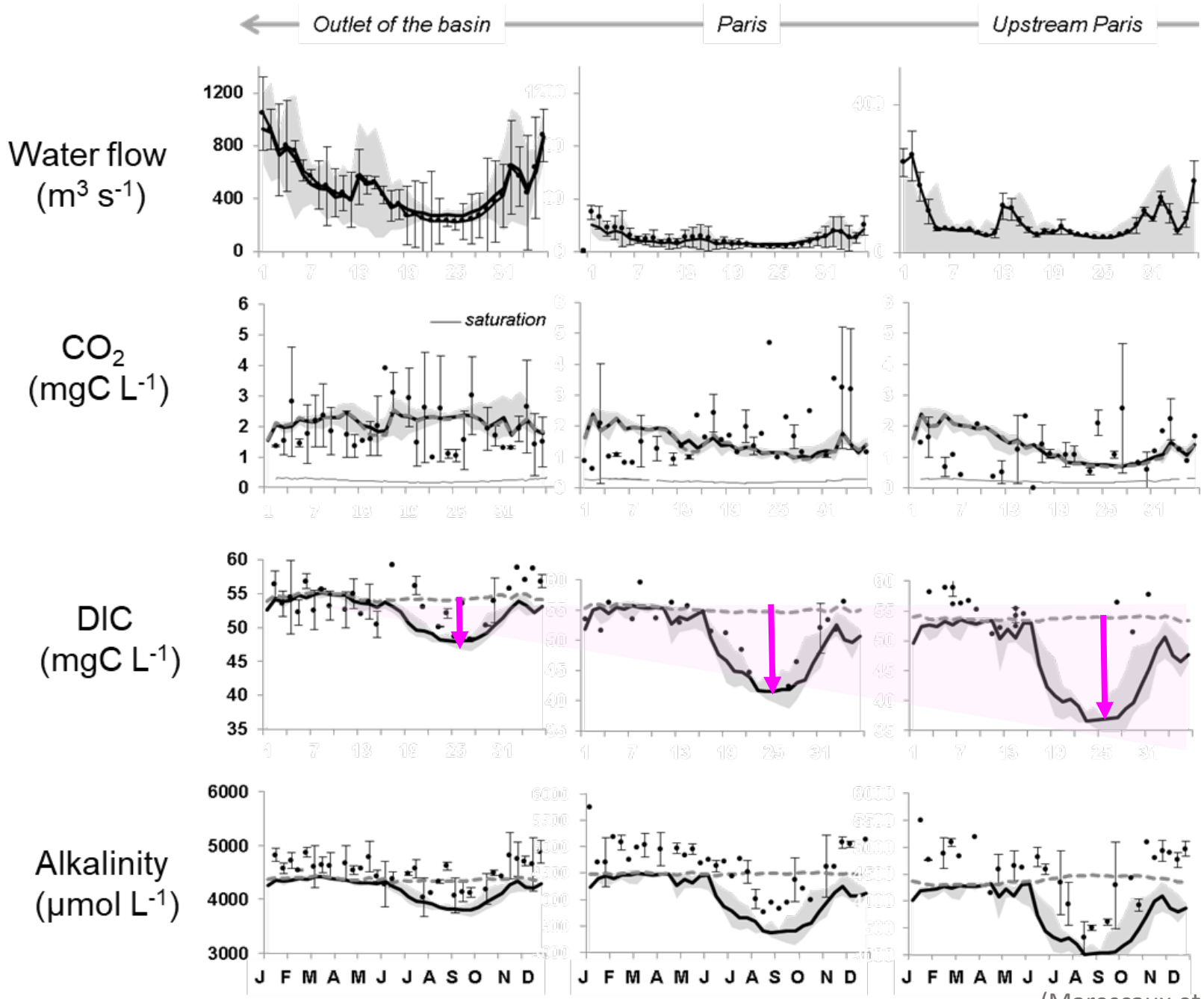
- Période 2010 - 2013
- Grande variabilité des Obs de CO_2
- Représentation des variations saisonnières

- Impact des eaux restituées par les réservoirs (DIC et TA)

Sans réservoir

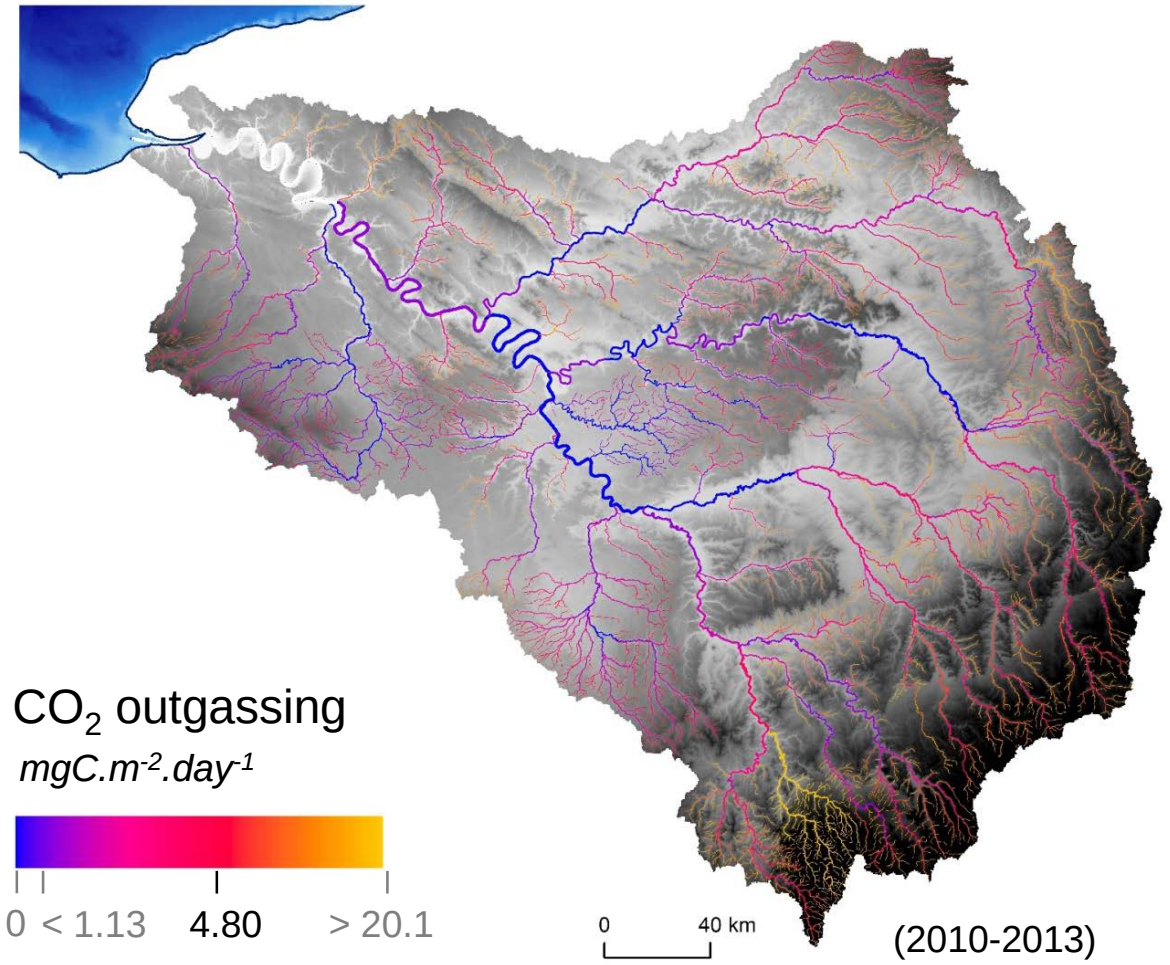
Avec réservoirs





(Marescaux et al 2019)

- Cartographie des processus aquatiques contrôlant le C_{inorg} dans l'hydrosystème Seine (2010-2013)



- Production primaire (**NPP**) : ↗ à partir des ordres 4
- **Respiration** hétéro. :
  - Resp. planctonique ↗ avec la NPP et les rejets STEP aval
  - Activité benthique domine dans les 1er ordres
- NPP et Respiration < 1 % dans le bilan des transferts de C
- **Emissions de CO2** par l'hydrostème (> 30 %)

364 ± 99 Gg C yr^{-1}

- A l'amont :
  - importance du *k* conduit au dégazage le plus élevé
  - évasion contrôlée par les apports de DIC
- A l'aval :
  - FCO2 augmente à l'aval des rejets de l'agglomération

(Marescaux et al 2019, in revision)

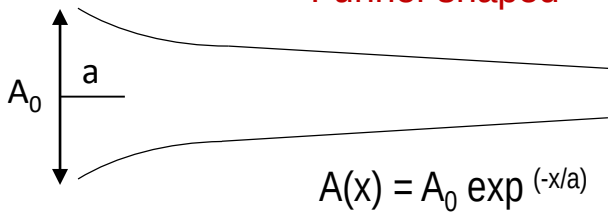
- Pourquoi *(est-ce si compliqué de)* prendre en compte les milieux aquatiques dans les bilans de Carbone ?

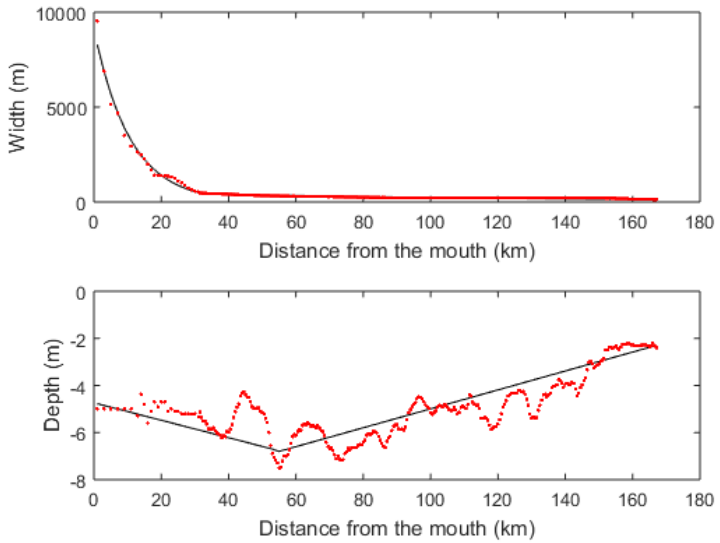
- Que nous apprend l'étude d'un système *tempéré* et *ultra-anthropisé* comme la Seine ?

- Les processus physiques et biogéochimiques impliqués dans la cascade du C sont-ils les mêmes le long du *continuum rivière-estuaire* ?

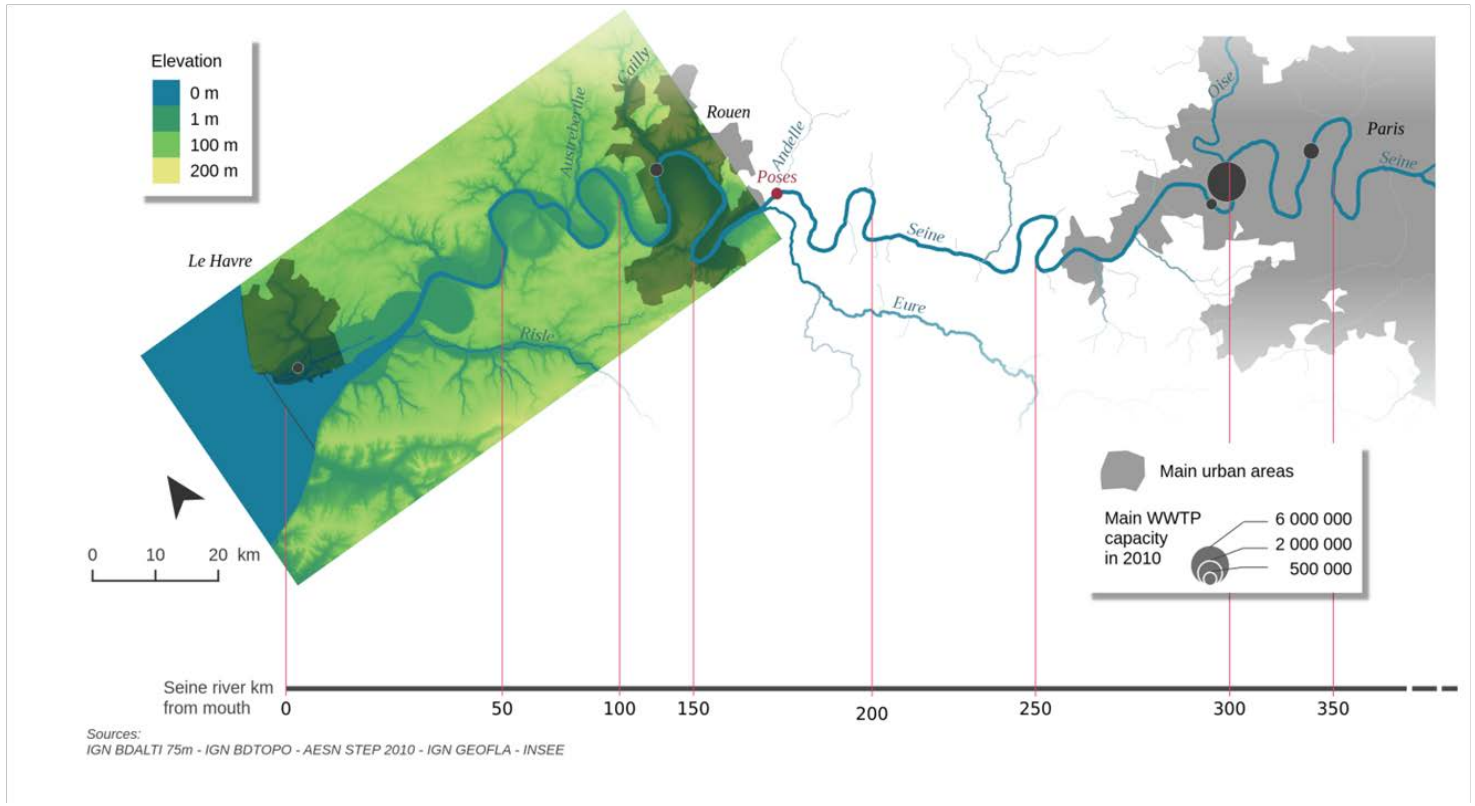
- Approche intégrée du continuum rivière-estuaire

Funnel-shaped





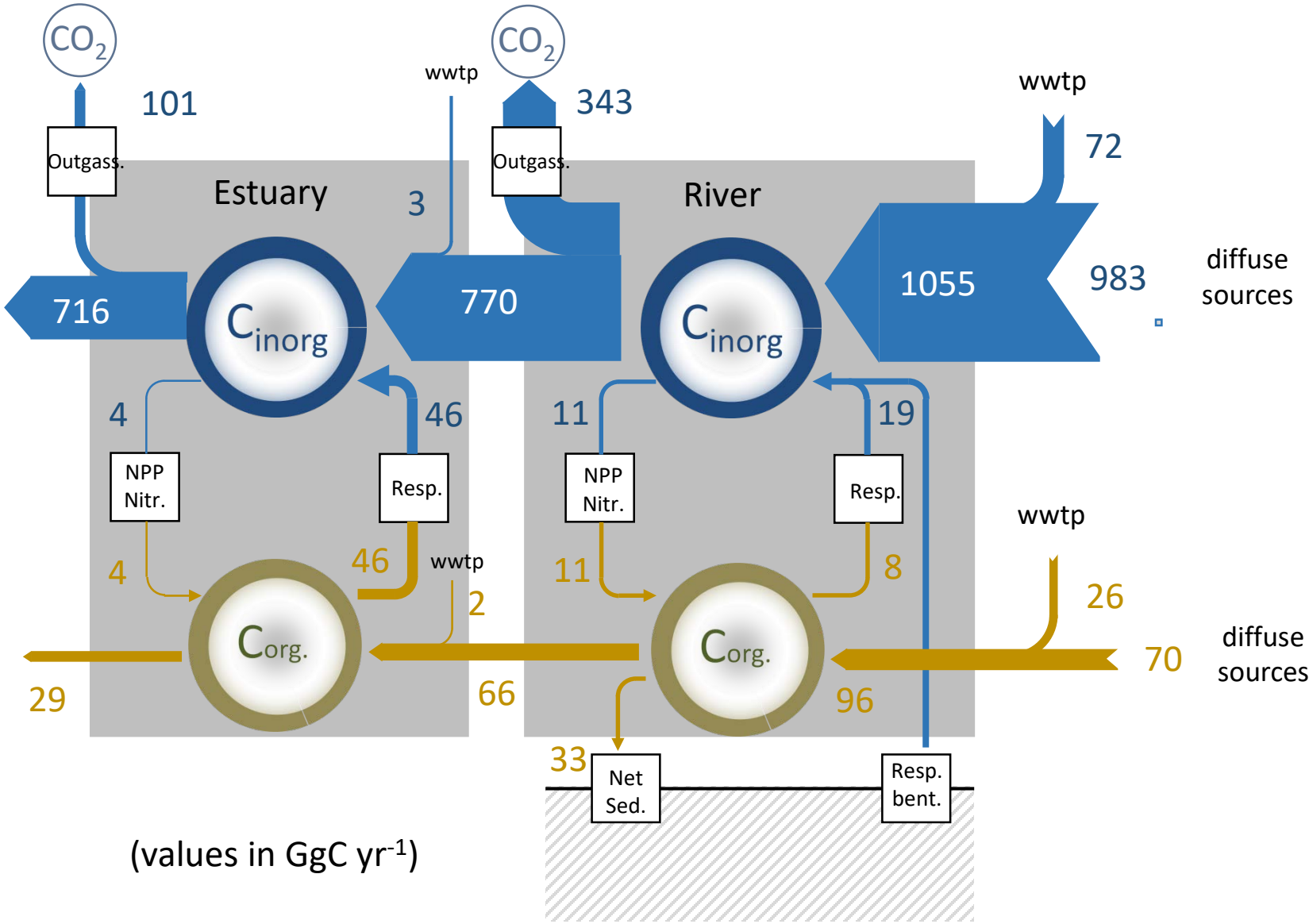
C-GEM (Volta et al., 2014) | Riverstrahler



Modèle 1D longitudinal | hydrodynamisme simplifiée | biogéochimie ~ Riverstrahler

(Laruelle et al 2019, Frontiers in marine sciences)

- Bilan des transferts de carbone (IC et OC) dans l'intégralité de l'hydrosystème Seine (2011)



(values in GgC yr^{-1})

Wastewater treatment plants (wwtp)

(Laruelle et al 2019, Frontiers in marine sciences)

Perspectives

- Mesures :
  - relier le DOC aquatique au contenu en carbone des sols
  - estimer les coefficients *k* sur les grands axes fluviaux
- Modélisation :
  - intégrer les émissions aquatiques de CH4 et le N2O
  - inclure la modélisation des GHGs dans les réservoirs *(thèse en cours)*
  - approche intégrée rivière – estuaire étendue à la façade atlantique (NEA)

(projet PRESt'EAU en cours)

Travaux présentés

- 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, 119–137. doi:10.1007/BF00007414

- Laruelle, G.G., Marescaux, A., Gendre, R. Le, Garnier, J., Rabouille, C., Thieu, V., 2019. Carbon dynamics along the Seine River network: Insight from a coupled estuarine/river modeling approach. Front. Mar. Sci. https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00216

- Marescaux, A., Thieu, V., Borges, A.V., Garnier, J., 2018. Seasonal and spatial variability of the partial pressure of carbon dioxide in the human-impacted Seine River (France). Sci. Rep. 17, 1–14. doi:10.1038/s41598-018-32332-2

- Marescaux, A., Thieu, V., Gypens, N., Silvestre, M., Garnier, J., (in revision). Modeling inorganic carbon dynamics in the Seine River continuum in France