

Influence des flux de sédimentation-érosion sur les flux de carbone dans la Seine

Shuaitao Wang^{1,2*}, Nicolas Flipo¹

¹ Centre de Géosciences, Mines ParisTech, Université PSL

² UMR METIS, CNRS, Sorbonne Université, EPHE

* shuaitao.wang@sorbonne-universite.fr, nicolas.flipo@mines-paristech.fr

Résumé

Dans le cadre du développement du programme ProSe-PA, le processus sédimentation-érosion implémenté dans le modèle biogéochimique C-RIVE a été révisé et réécrit. Une calibration des paramètres liés à la mise en resuspension des particules est nécessaire pour bien simuler les matières en suspension dans la Seine. Ces modifications des processus sédimentaires influencent également le calcul des flux de carbone, et notamment le devenir des rejets anthropiques, dans le système fluvial.

A cet effet, une recalibration des deux paramètres d'érosion sur les données mesurées de 2007 à 2011 est d'abord réalisée. Des paramètres variables contrôlant l'évolution du carbone en fonction du temps sont ensuite identifiés par assimilation de données puis synthétisés sous forme de valeur médiane pour lancer les simulations directes et estimer les flux de carbone dans la Seine. Les résultats montrent que les paramètres calibrés améliorent significativement la simulation des matières en suspension en étiage. Une influence importante des flux de sédimentation-érosion sur les flux de carbone dans le sédiment est soulignée. En revanche, une forte désoxygénation dans la colonne d'eau est simulée, qui est probablement liée à une surestimation de la croissance des microorganismes hétérotrophes et nitrifiants dans les sédiments. Une fonction de limitation de la croissance des microorganismes a ainsi été introduite dans le code et permet d'ores et déjà de bien représenter les concentrations en oxygène dans le milieu en période d'étiage important où des blooms algaux ont été identifiés.

Points clefs

- ✓ *Amélioration des simulations des matières en suspension en étiage grâce à une recalibration des paramètres d'érosion*
- ✓ *Influence importante du processus de sédimentation-érosion sur les flux de carbone dans la Seine et hétérotrophie de la Seine pour l'année 2011*
- ✓ *La physiologie des microorganismes hétérotrophes évolue dans les sédiments par rapport à la colonne d'eau*

Abstract

As part of the development of the ProSe-PA program, the sedimentation-erosion process implemented in the biogeochemical model, C-RIVE, has been revised and rewritten. A calibration of the parameters linked to the resuspension of particles is necessary to simulate the total suspended matters in the Seine River properly. Carbon fluxes within an aquatic system like the Seine River system are of interest to understand the carbon fate and the biogeochemical functioning of the system. This also makes it possible to assess the anthropogenic impact such as discharges from wastewater treatment plants on the system. The sedimentation-erosion process definitely impacts carbon fate, especially in the sediment. It is therefore also interesting to identify the influences of sedimentation-erosion fluxes on carbon fluxes in the Seine River system.

To this end, a re-calibration of the two erosion parameters on the data measured from 2007 to 2011 is first carried out. Variable parameters controlling the evolution of carbon as a function of time are then identified by data assimilation and then synthesized in the form of a median value to launch direct simulations and estimate carbon flows in the Seine. The results show that the calibrated parameters significantly improve the simulation of suspended solids at low flow. An important influence of sedimentation-erosion fluxes on carbon fluxes in the sediment is underlined. In contrast, strong deoxygenation in the water column is simulated, which is probably related to an overestimation of the growth of heterotrophic and nitrifying microorganisms in the sediments. A function of limitation of the microorganisms' growth has thus been introduced into the code and already makes it possible to represent the oxygen concentrations in the medium in a period of intense low flow when algal blooms have been identified.

Key points

- ✓ Improved simulations of the total suspended matters during low flow thanks to a calibration of erosion parameters
- ✓ Significant influence of the sedimentation-erosion process on carbon fluxes in the Seine River system and heterotrophy of the Seine River system for the year 2011
- ✓ A function of limitation of the growth of heterotrophic microorganisms is necessary in the sediments

Introduction

Quantifier le devenir du carbone dans un système aquatique est essentiel pour comprendre le fonctionnement biogéochimique du système et évaluer l'impact des activités anthropiques sur le système (ex : rejets des stations d'épuration). Les sédiments jouent souvent un rôle important dans la dégradation de la matière organique (Vilmin et al., 2016). Dans le cadre du développement du logiciel ProSe-PA (Wang, 2019), les processus de sédimentation-érosion implémentés dans le module biogéochimique, C-RIVE, ont été révisés et réécrits. Une calibration des paramètres contrôlant le processus de sédimentation-érosion est ainsi nécessaire pour bien simuler les matières en suspension (MES). Suite à la calibration des paramètres d'érosion, l'estimation des flux de carbone au sein du système Seine pourraient évoluer par rapport aux versions antérieures de ProSe (Vilmin et al. 2016). Il est donc intéressant de comprendre l'influence des flux de sédimentation-érosion sur les flux de carbone dans la Seine.

L'implémentation du filtre particulaire (une technique d'assimilation de données) dans ProSe-PA a permis d'améliorer significativement les simulations des concentrations en oxygène dissous et de caractériser les propriétés physiologiques des communautés vivantes dans la Seine (Wang et al., 2019). Il est également

désormais possible de réaliser des simulations directes avec les paramètres temporellement variables obtenus par assimilation de données, ainsi que l'estimation des flux de carbone avec ces paramètres variables temporellement. Ces simulations directes améliorent les simulations des concentrations en oxygène dissous et devraient permettre d'obtenir des flux de carbone plus robustes.

Les objectifs de ce rapport sont donc de :

- I. Présenter les formalismes de sédimentation-érosion utilisés dans ProSe-PA
- II. Calibrer les paramètres d'érosion afin de bien simuler les matières en suspension
- III. Estimer les flux de carbone dans la Seine avec les paramètres calibrés à l'aide de l'assimilation de données
- IV. Ajuster le modèle sédimentaire en introduisant une fonction de limitation de la croissance des micro-organismes présents dans les sédiments

1. Formalisation de sédimentation-érosion utilisée dans ProSe-PA (C-RIVE)

Une approche *simultanée* est implémentée dans la librairie C-RIVE, le cœur biogéochimique du programme ProSe-PA. On suppose que la sédimentation et l'érosion ont lieu en même temps. Pour chaque espèce, une quantité de masse échangée entre l'eau et le sédiment est calculée pour chacun de ces processus. La somme des quantités constitue l'échange net. Le calcul se fait en poids sec. Un ratio de 2.5 [M/MC] est appliqué pour convertir le poids en carbone (MC) en poids sec (M). Avant d'entrer dans le processus sédimentation-érosion, les concentrations des espèces particulières dans la couche sédiment sont converties en masse (M) dans le code. Les espèces dissoutes dans les pores restent en concentration ($M.L^{-3}$).

1.1. Sédimentation

Le modèle de sédimentation est tiré de Hairsine and Rose (1992). Les particules sédimentent sous l'influence de la gravité. Une résolution implicite est utilisée pour la concentration dans la colonne d'eau. Le flux de sédimentation de l'espèce particulière i par une unité de surface vaut :

$$C_{eau,i}^{ap} = C_{eau,i}^{av} - C_{eau,i}^{ap} \times \left(\frac{V_{sed,i} \times dt}{h} \right) \quad (1a)$$

$$C_{eau,i}^{ap} = \frac{C_{eau,i}^{av}}{\left(1 + \frac{V_{sed,i} \times dt}{h} \right)} \quad (1b)$$

$$F_{sed,i} = C_{eau,i}^{ap} \times V_{sed,i} \quad (2)$$

où :

$C_{eau,i}^{av}$: Concentration de l'espèce particulière i dans la colonne d'eau avant sédimentation [ML^{-3}]

$C_{eau,i}^{ap}$: Concentration de l'espèce particulière i dans la colonne d'eau après sédimentation [ML^{-3}]

dt : Pas de temps de calcul [T]

h : Hauteur d'eau [L]

$V_{sed,i}$: Vitesse de sédimentation de l'espèce particulière i [LT^{-1}]

$F_{sed,i}$: Flux de sédimentation par unité de surface de l'espèce particulière i [ML^{-2}/T^{-1}]

La masse de l'espèce i sédimentée pendant dt vaut ainsi :

$$Sed,i = F_{sed,i} \times \frac{V_{eau}}{h} \times dt \quad (3)$$

où :

V_{eau} : Volume d'eau [L^3]

Comme les concentrations des espèces particulières dans le sédiment (ML^{-3}) sont converties en masse (M), les masses des espèces particulières dans le sédiment après le processus de sédimentation sont

directement obtenus par la somme ($M_i + Sed, i$). Les concentrations des espèces dissoutes sont calculées en fonction du changement du volume de la couche sédimentaire, la porosité étant fixée constante à 0,9.

1.2. Erosion

La remise en suspension des particules se fait par la puissance hydraulique de l'écoulement naturel et par la puissance hydraulique liée à la navigation. Le flux d'érosion totale (Φ_{ero}) est exprimé par l'équation suivante (Vilmin et al., 2015) :

$$\Phi_{ero} = \zeta(\eta\rho_{eau}JU + P_{navig}) \quad (4)$$

où :

$\zeta = \frac{1}{\chi_i \frac{\rho_i - \rho_{eau}}{\rho_i}}$, χ_i [-] est la fraction massique de l'espèce particulaire i dans la couche sédimentaire. ρ_i et

ρ_{eau} sont les masses volumiques de l'espèce particulaire i et de l'eau.

J [-] est la pente d'énergie de l'écoulement

U [LT^{-1}] est la vitesse moyenne de l'écoulement

η [-] est la fraction de la puissance hydraulique utilisée pour la remise en suspension des particules

P_{navig} [$ML^{-2}T^{-1}$] représente la fraction de la puissance hydraulique liée à la navigation.

L'équation 4 permet d'estimer le flux d'érosion total Φ_{ero} [$ML^{-2}T^{-1}$]. Ce flux d'érosion total est ensuite transformé en une masse totale érodée (Ero_{tot} , Eq. 5).

$$Ero_{tot} = \min(\Phi_{ero} * \frac{V_{eau}}{h} * dt, M_{tot}) \quad (5)$$

où,

M_{tot} : Masse totale du sédiment [M]

Dans le modèle, il existe différents types de variables particulières. Pour chaque espèce particulaire i , on peut estimer ensuite sa masse érodée à partir de la masse totale érodée (Eq. 6).

$$Ero_i = \frac{Ero_{tot}}{M_{tot}} M_i \quad (6)$$

Dans cette version de ProSe-PA, le relargage des espèces dissoutes dans la colonne d'eau associé au volume de sédiments érodés est pris en compte.

2. Ajustement des paramètres d'érosion η et P_{navig} dans ProSe-PA

Une calibration des paramètres d'érosion η et P_{navig} dans ProSe a été réalisée par Vilmin et al. (2015). Les valeurs de 3,0‰ pour η et 0,003 $g \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ pour P_{navig} ont été retenues comme le jeu de paramètres optimal. On effectue ici une recalibration des deux paramètres dans ProSe-PA avec la stratégie établie par Vilmin et al. (2015) pour bien simuler les matières en suspension.

2.1. Procédure d'ajustement

L'ajustement est divisé en une étape de calibration et une étape de validation. Les données de 2010-2011 (deux ans) sont utilisées pour la calibration et les données de 2007-2008 (deux ans) sont utilisées pour la validation. La calibration et la validation sont réalisées en trois étapes (Vilmin et al., 2015) :

- A partir de la calibration de Vilmin et al. (2015), six valeurs de η ont été sélectionnées (0,5‰, 1,0‰, 1,5‰, 2,0‰, 2,5‰, 3,0‰). Un intervalle de valeurs optimales pour η est ensuite identifié sur la base du ratio des écarts-types des concentrations simulées en MES par ceux des concentrations observées. Le ratio est calculé pour les périodes de hautes eaux seulement. Le choix de ce critère est basé sur l'hypothèse que, en hautes eaux, la remise en suspension liée à la navigation est négligeable. P_{navig} est fixé à zéro pour cette première étape.

- b. La valeur optimale de P_{navig} est sélectionnée grâce à la minimisation de la RMSE (écarts quadratiques moyens) sur les concentrations en MES simulées en basses eaux aux 8 stations de mesure (les stations d’autosurveillance du SIAAP, aujourd’hui intégrées à MeSeine), pour des valeurs de η comprises dans l’intervalle déterminé en étape a.
- c. Le jeu de paramètres (η et P_{navig}) optimal est validé en se basant sur la RMSE sur la période simulée.

Les périodes en hautes eaux sont déterminées par le quantile 60 (Q60) du débit journalier à la station de jaugeage d’Austerlitz. Les périodes où les débits sont inférieurs à Q60 sont considérées comme basses eaux.

2.2. Paramètres d’érosion optimaux

D’après la première étape, la valeur optimale pour η est entre 1,0 ‰ et 3,0 ‰ (Fig.1). Les rapports $\sigma_{sim}/\sigma_{obs}$ dans cet intervalle sont assez proches de 1 pour la calibration et la validation (Fig. 1). Deux valeurs de η (1,5 ‰ et 3,0 ‰) ont été choisies pour l’étape b.

Pour la deuxième étape, la RMSE minimale en basses eaux est obtenue pour η de 1,5 ‰ et P_{navig} de 0,0005 $g \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ (Fig. 2) pour les jeux de données de calibration et validation (Fig. 2).

En troisième étape, P_{navig} est fixé à 0,0005 $g \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$. Les six valeurs de η (1,0 ‰, 1,1 ‰, 1,2 ‰, 1,3 ‰, 1,4 ‰, 1,5 ‰) sont utilisées pour la calibration et la validation. Les valeurs de RMSE pour la période de validation sont assez proches les unes des autres (Fig. 3). En revanche, la RMSE minimale est obtenue pour $\eta = 1,3$ ‰ pour la période de calibration (Fig. 3). Le jeu de paramètres optimal (η de 1,3 ‰ et P_{navig} de 0.0005 $g \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$) est ainsi choisi pour simuler les matières en suspension et estimer les flux de carbone à l’aide de l’assimilation de données.

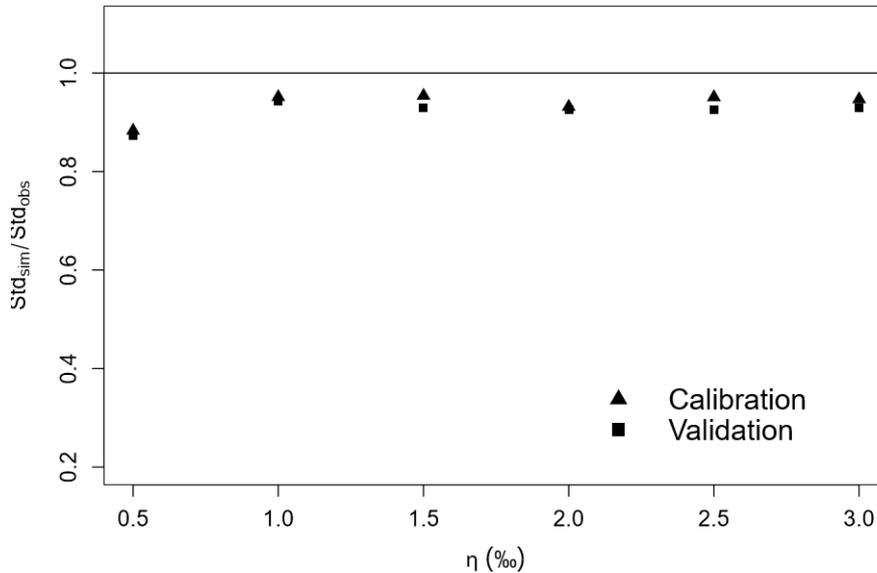


Figure 1. Rapports $\sigma_{sim}/\sigma_{obs}$ en hautes eaux. $P_{navig} = 0 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$

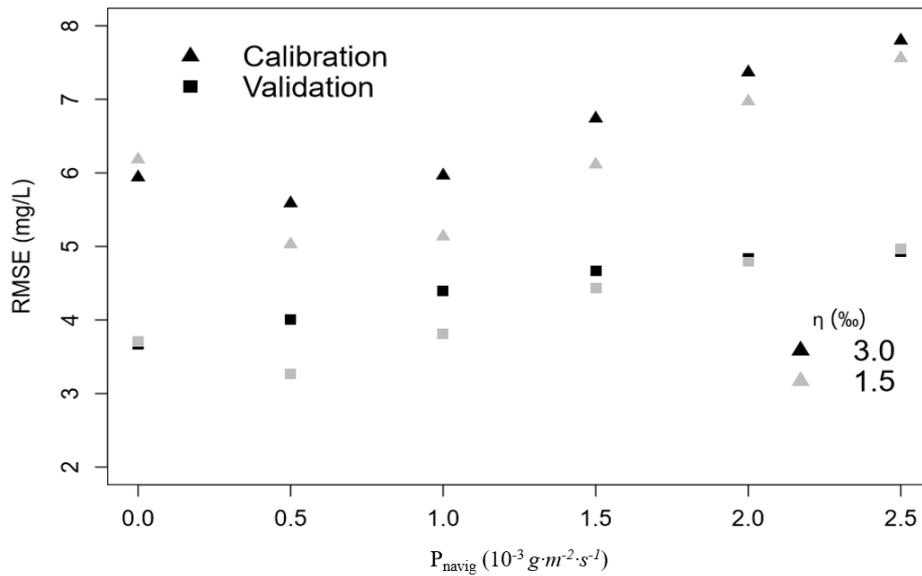


Figure 2. RMSE en basses eaux pour $\eta = 1,5 \text{ ‰}$ et $\eta = 3,0 \text{ ‰}$

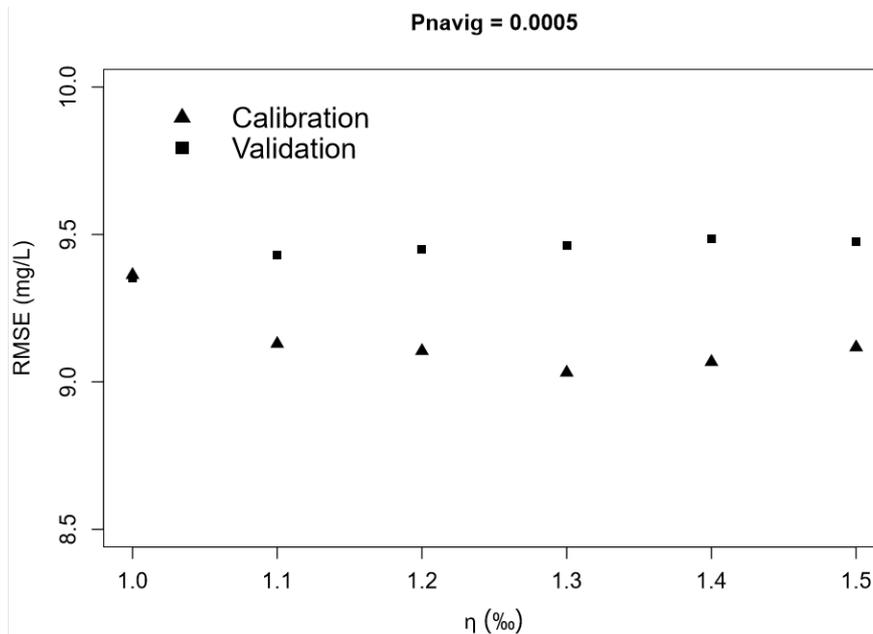


Figure 3. RMSE en basses eaux pour $P_{navig} = 0,0005 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$

3. Influence des paramètres de sédimentation-érosion sur les flux de carbone dans le système aquatique Seine

Afin de mieux simuler les flux de carbone dans le système aquatique Seine pour l'année 2011, on réalise deux simulations en utilisant ProSe-PA avec l'assimilation de données (filtre particulaire, Wang et al., (2019)) pour les jeux de paramètres ($\eta = 3,0 \text{ ‰}$ et $P_{navig} = 0,003 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) (jeu de paramètres optimal selon Vilmin et al. (2015) pour ProSe3.6.9) et ($\eta = 1,3 \text{ ‰}$ et $P_{navig} = 0,0005 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) (jeu de paramètres optimal déterminé après ajustement). L'assimilation de données permet d'améliorer la simulation des concentrations en oxygène dissous et d'estimer les valeurs des paramètres du modèle en fonction du temps (Wang et al., 2019). Les paramètres variables en temps sont ensuite utilisés pour lancer les simulations directes

et estimer les flux de carbone dans la Seine en 2011. Le domaine simulé s'étend sur 220 km du réseau hydrographique de la Seine de l'amont de l'agglomération parisienne à l'estuaire à Poses (Fig. 4).

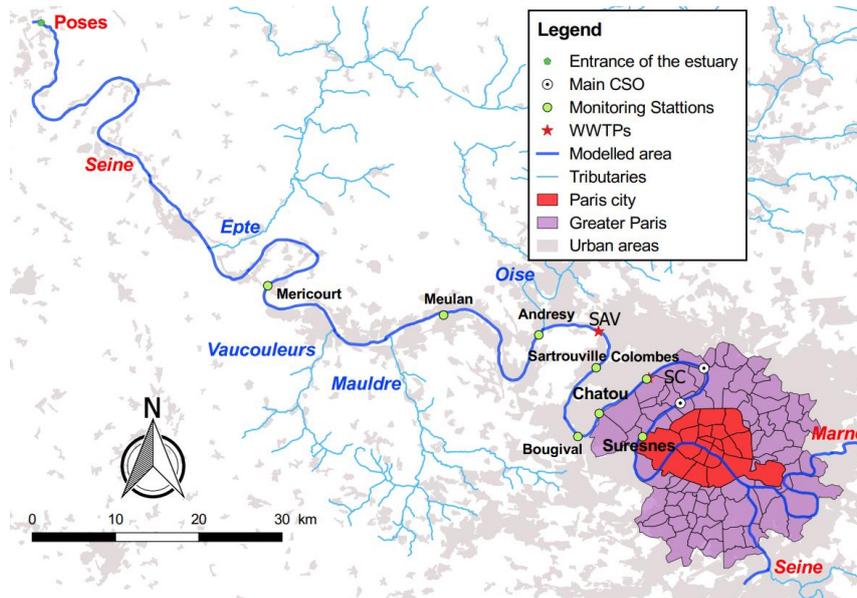


Figure 4. Description du domaine simulé par ProSe-PA et localisation des stations du SIAAP de mesure des concentrations en O_2

3.1. TSM simulé avec les paramètres temporellement variables

Les concentrations en TSM (teneur totale en matières en suspension) simulées avec les jeux de paramètres ($\eta = 3,0 \text{ ‰}$ et $P_{navig} = 0,003 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) et ($\eta = 1,3 \text{ ‰}$ et $P_{navig} = 0,0005 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) sont comparées aux observations aux 9 stations pour l'année 2011 (Fig 5a, 5b et 5c). D'après les résultats, les concentrations en TSM simulées en hautes eaux sont très proches pour les deux jeux de paramètres (Fig 5a, 5b et 5c). Ceci signifie que les concentrations en TSM sont contrôlées par la puissance hydraulique de l'écoulement en période de hautes eaux. En revanche, il existe des différences en basses eaux. Avec le jeu de paramètre ($\eta = 3,0 \text{ ‰}$ et $P_{navig} = 0,003 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), le modèle a tendance à surestimer les concentrations en TSM en étiage aux stations d'Ivry, de Suresnes, d'Argenteuil, de Chatou, de Bougival et de Sartrouville (Fig 5a, 5b et 5c). Avec le jeu de paramètres ($\eta = 1,3 \text{ ‰}$ et $P_{navig} = 0,0005 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), cette surestimation est fortement diminuée, surtout aux stations d'Argenteuil, de Chatou, de Bougival et de Sartrouville. Ceci est lié à une diminution de P_{navig} (d'un facteur 6). Vilmin et al., (2015) ont déjà souligné l'importance de la navigation sur la remise en suspension des particules en étiage. La calibration des paramètres d'érosion permet donc d'améliorer la simulation des concentrations en TSM en étiage.

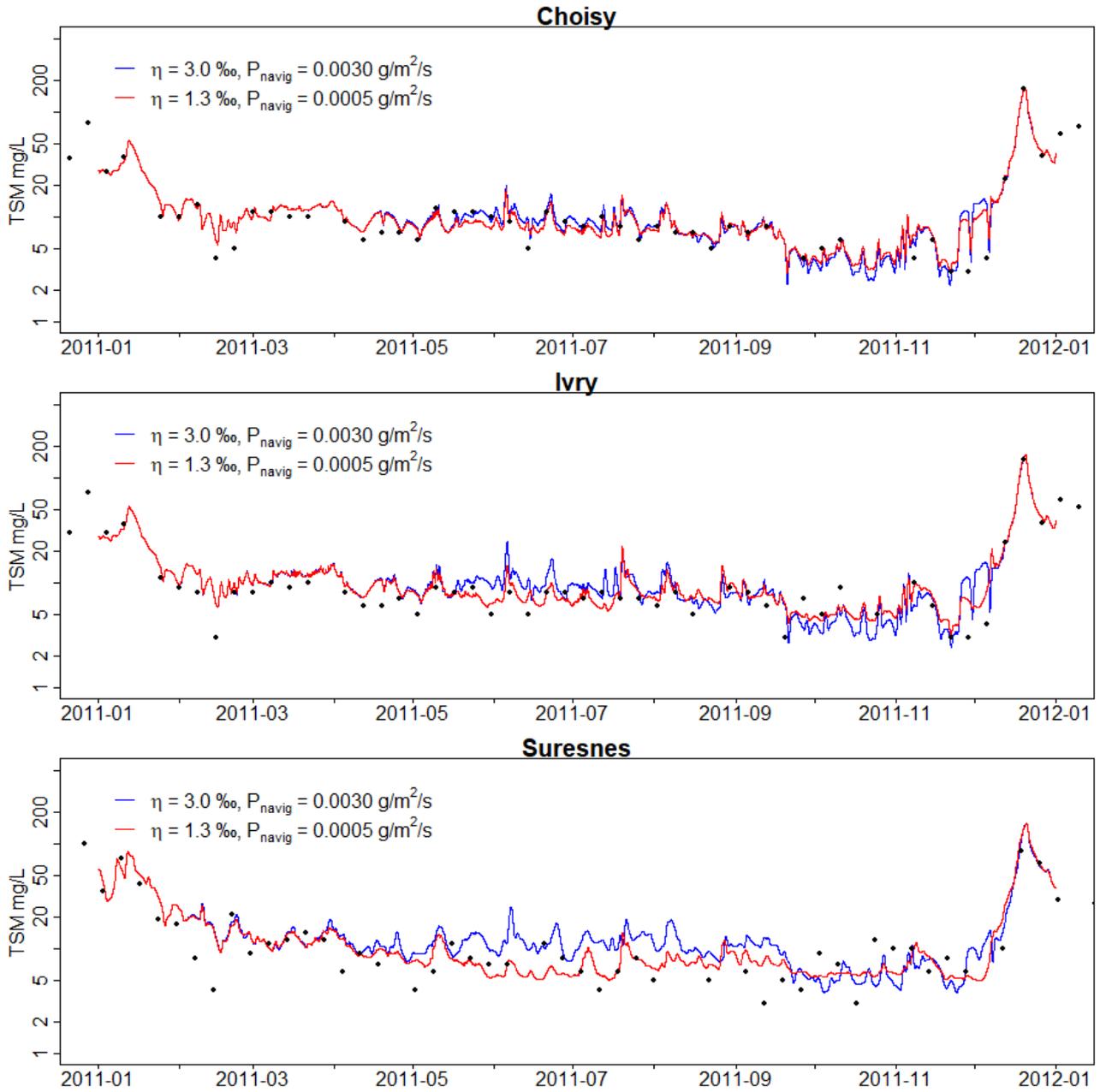


Figure 5a. TSM (Matières en suspension totales) simulé avec $\eta = 3,0 \text{ ‰}$, $P_{\text{navig}} = 0,003 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, $\eta = 1,3 \text{ ‰}$ et $P_{\text{navig}} = 0,0005 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. Les points noirs représentent les observations.

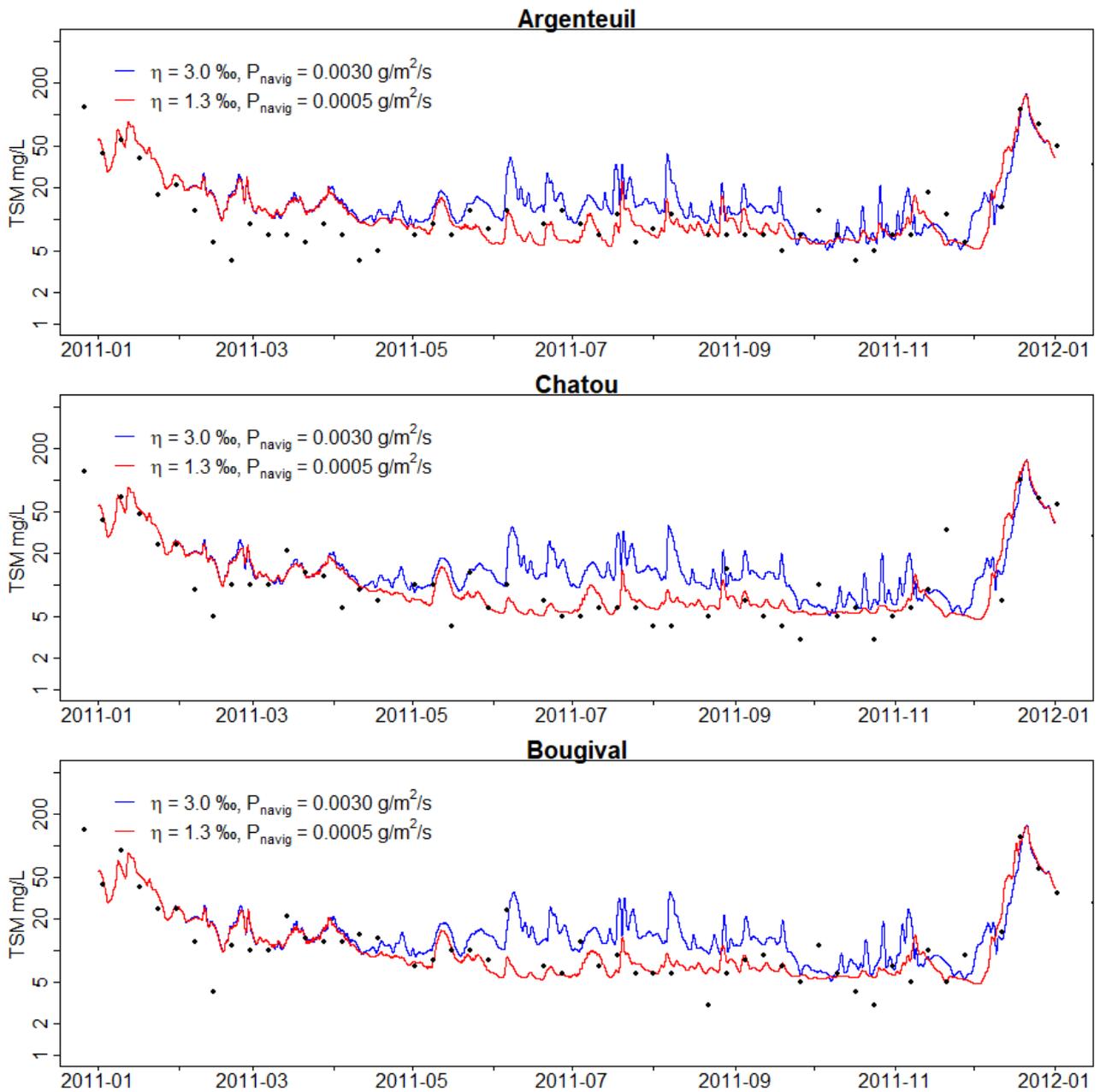


Figure 5b. TSM (Matières en suspension totales) simulé avec $\eta = 3,0 \text{ ‰}$, $P_{\text{navig}} = 0,003 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, $\eta = 1,3 \text{ ‰}$ et $P_{\text{navig}} = 0,0005 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. Les points noirs représentent les observations.

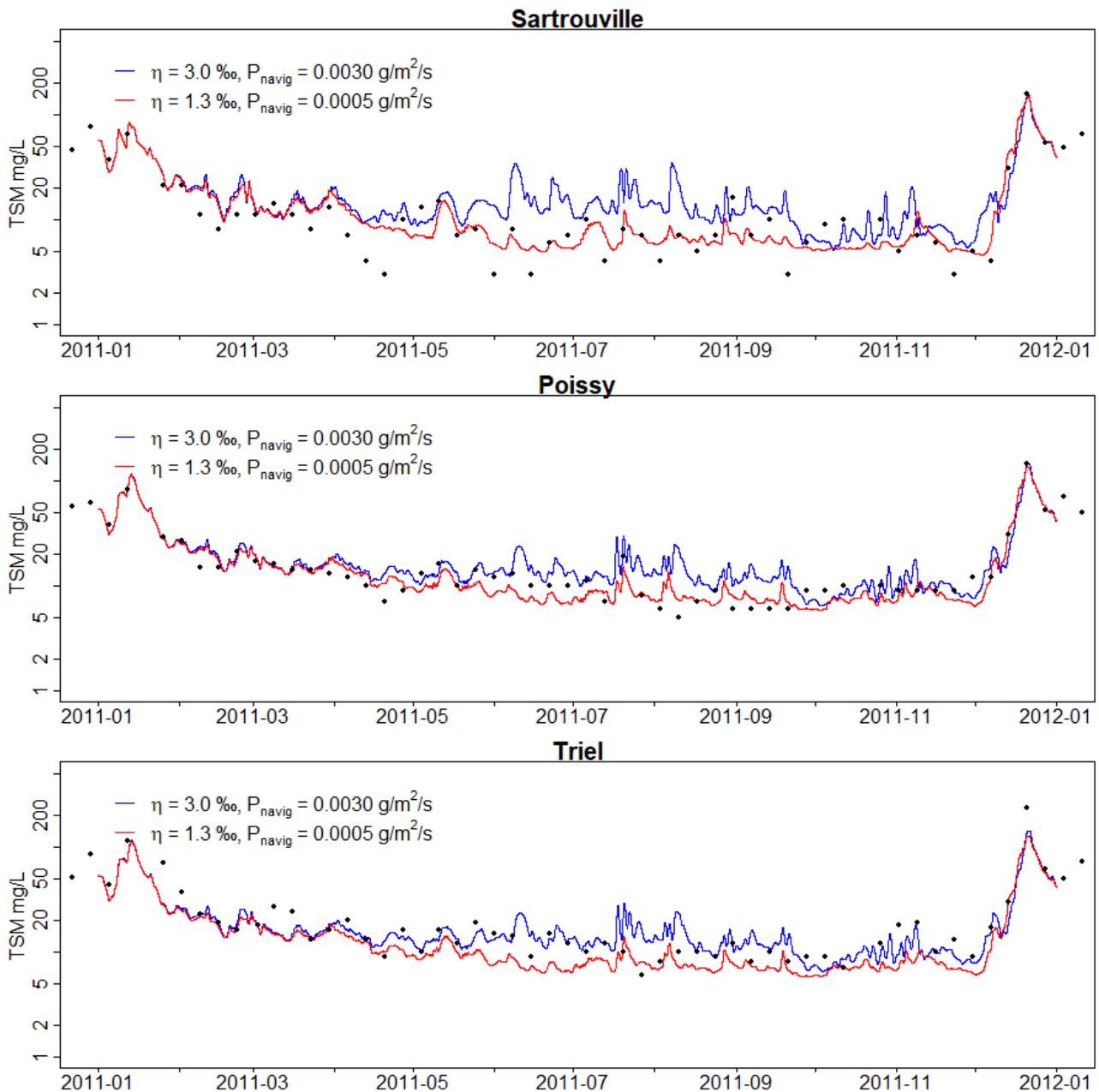


Figure 5c. TSM (Matières en suspension totales) simulé avec $\eta = 3,0 \text{ ‰}$, $P_{\text{navig}} = 0,003 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, $\eta = 1,3 \text{ ‰}$ et $P_{\text{navig}} = 0,0005 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. Les points noirs représentent les observations.

3.2. Les flux de carbone avec les deux jeux de paramètres ($\eta = 3,0 \text{ ‰}$ et $P_{\text{navig}} = 0,003 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) et ($\eta = 1,3 \text{ ‰}$ et $P_{\text{navig}} = 0,0005 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)

Le modèle ProSe-PA permet également de quantifier les flux de carbone dans le système en représentant explicitement le cycle de vie des communautés de micro-organismes en lien avec les apports en matières organiques, l'hydrologie et également la température des eaux. Les formalismes mathématiques de ces processus sont consultables dans (Wang et al., 2018).

Afin d'estimer l'impact des rejets de la station d'épuration Seine Aval sur les flux de carbone, le domaine est découpé en deux sous-domaines, situés respectivement en amont et en aval de la station d'épuration Seine Aval. Les flux de carbone sont exprimés en tC/jour et les masses des espèces biogéochimiques sont exprimées en tC (Fig. 6a et 6b). Les valeurs moyennes annuelles sont calculées.

En comparant les résultats obtenus, on observe que les flux de carbone sont très sensibles aux valeurs des paramètres d'érosion (η et P_{navig}), particulièrement pour la couche de sédiments. Avec le jeu de paramètres $\eta = 3,0 \text{ ‰}$ et $P_{navig} = 0,003 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, il n'y a quasiment plus de sédiments simulés par ProSe-PA (teneur en carbone organique particulaire (POC) = $0,36 \text{ gC/m}^2$). Cela signifie que les valeurs de η et P_{navig} ($3,0 \text{ ‰}$ et $0,003 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) sont trop élevées pour ProSe-PA, ce qui explique aussi la surestimation des concentrations des particules dans la colonne d'eau en été.

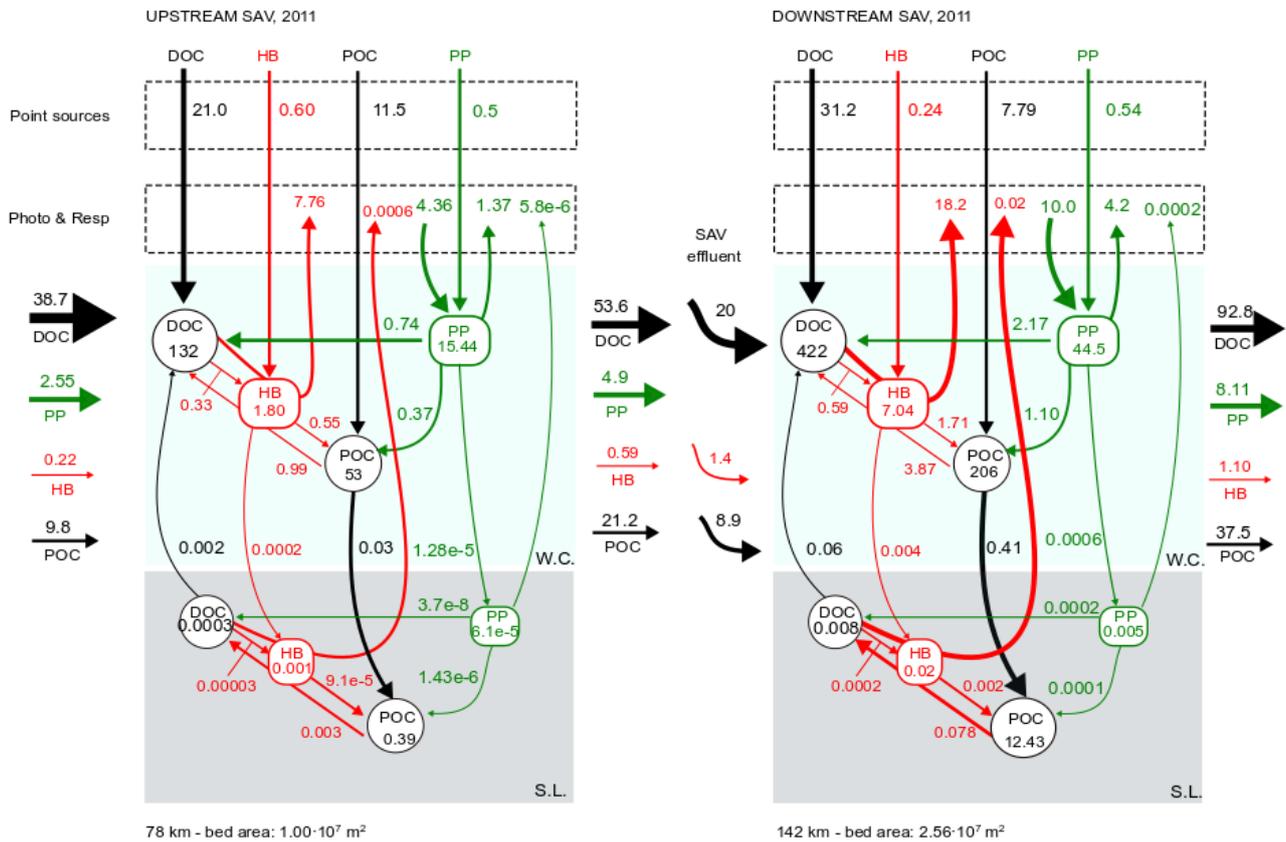


Figure 6a. Flux de carbone calculé pour l'année 2011 avec $\eta = 3,0 \text{ ‰}$ et $P_{navig} = 0,003 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. Les flux sont exprimés en tC/j, les masses en tC. PP : Producteur Primaire ; HB : Bactérie Hétérotrophe ; DOC : Carbone Organique Dissous ; POC : Carbone Organique Particulaire

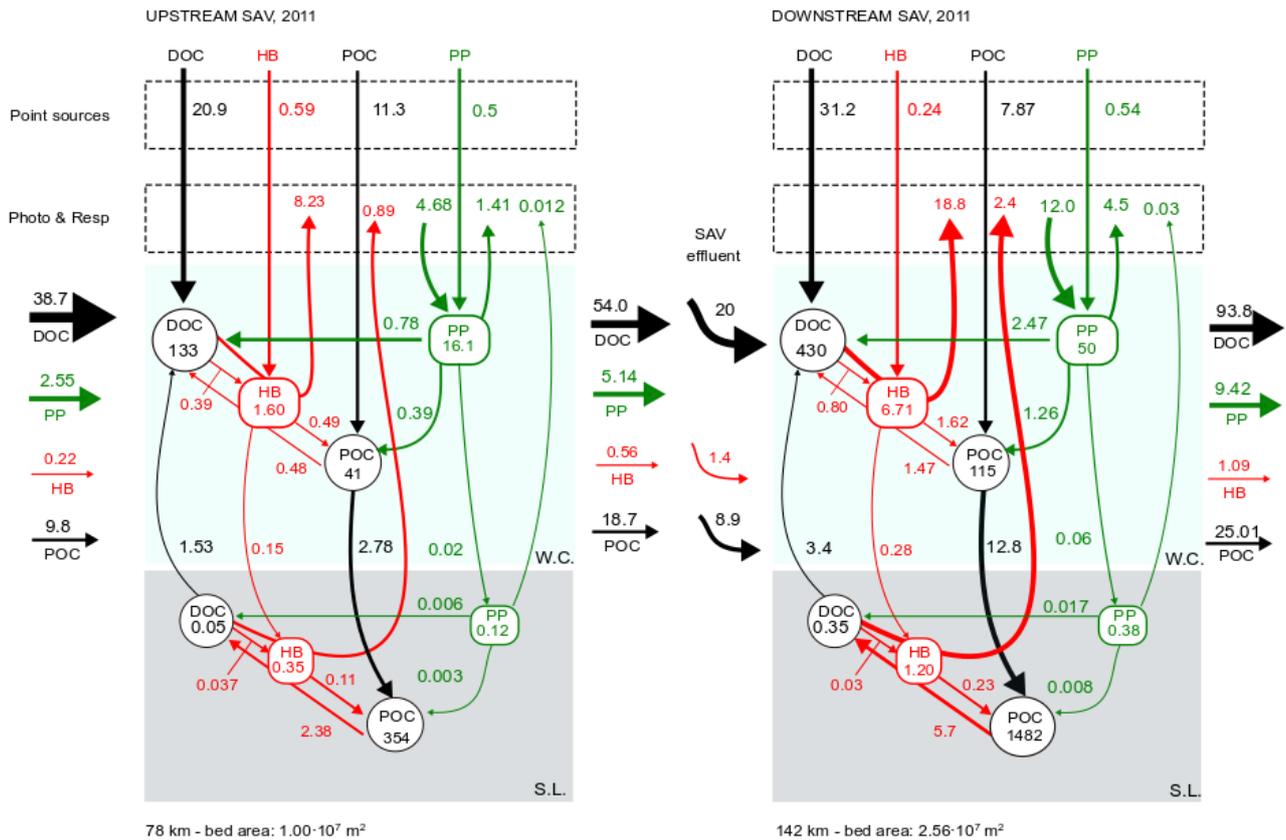


Figure 6b. Flux de carbone calculé pour l'année 2011 avec $\eta = 1,3 \text{ ‰}$ et $P_{\text{navig}} = 0,0005 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. Les flux sont en unité tC/j, les masse sont en tC. PP : Producteur Primaire ; HB : Bactérie Hétérotrophe ; DOC : Carbone Organique Dissous ; POC : Carbone Organique Particulaire

Avec $\eta = 1,3 \text{ ‰}$ et $P_{\text{navig}} = 0,0005 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, des stocks de sédiments sont produits, notamment à l'aval de la station d'épuration Seine Aval ($51,6 \text{ gC/m}^2$). Il y a moins de carbone organique particulaire (POC) exporté vers l'estuaire (25 tC/d vs $37,5 \text{ tC/d}$). Seul le jeu de paramètres $\eta = 1,3 \text{ ‰}$ et $P_{\text{navig}} = 0,0005 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ est donc retenu pour discuter des flux de carbone obtenus (Fig. 6b). Le POC sédimente dans la vase, notamment à l'aval de Seine Aval ($0,5 \text{ gC/m}^2/\text{d}$). Environ la moitié du POC dans la vase est hydrolysé en carbone organique dissous (DOC) ($0,23 \text{ gC/m}^2/\text{d}$). Le DOC est ensuite transféré vers la colonne d'eau par diffusion ($0,14 \text{ gC/m}^2/\text{d}$). Les sédiments jouent donc un rôle de source modérée en DOC vers les eaux du fleuve.

En 2011, des blooms algaux ont eu lieu dans la Seine au printemps et en été. Le taux de production primaire est estimé à $0,47 \text{ gC/m}^2/\text{d}$ alors que le taux de production CO_2 (la respiration) est égal à $0,98 \text{ gC/m}^2/\text{d}$ pour l'année 2011 (Fig. 6b). Le système Seine est ainsi hétérotrophe. D'après les résultats, la respiration benthique ($0,094 \text{ gC/m}^2/\text{d}$) représente 9,6% de la respiration totale du système Seine (Fig. 6b), soit $0,09 \text{ gC/m}^2/\text{d}$ à l'amont de Seine Aval et $0,095 \text{ gC/m}^2/\text{d}$ à l'aval de Seine aval.

4. Désoxygénation forte simulée dans la colonne d'eau à la station Méricourt

Le jeu de paramètres calibrés permet d'améliorer significativement la simulation des concentrations en TSM en étiage. En revanche, un phénomène de désoxygénation dans la colonne d'eau est simulé à toutes les stations en basses eaux pour le jeu de paramètre $\eta = 1,3 \text{ ‰}$ et $P_{\text{navig}} = 0,0005 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, comme illustré dans la figure 7 aux stations Bougival et Méricourt (Fig. 7).

Les résultats montrent ainsi que le dépôt des sédiments dans la Seine influence significativement les concentrations en oxygène dissous dans la colonne d'eau par une forte demande benthique. Cependant, cette

désoxygénation n'est pas observée dans les mesures (Fig. 7). Il est donc nécessaire d'acquérir des données de terrain concernant les dépôts sédimentaires effectifs dans la Seine afin de déterminer si le modèle spatialisé correctement les dépôts de sédiments en Seine (Fig. 8a). Si le modèle surestime le dépôt de sédiment dans la Seine pour ces périodes, il est probable que la valeur $0.0005 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ de P_{navig} soit trop faible pour ces périodes. Dans ce cas, il faudrait augmenter la valeur de P_{navig} pour ces périodes où les fortes désoxygénations sont simulées dans la colonne d'eau.

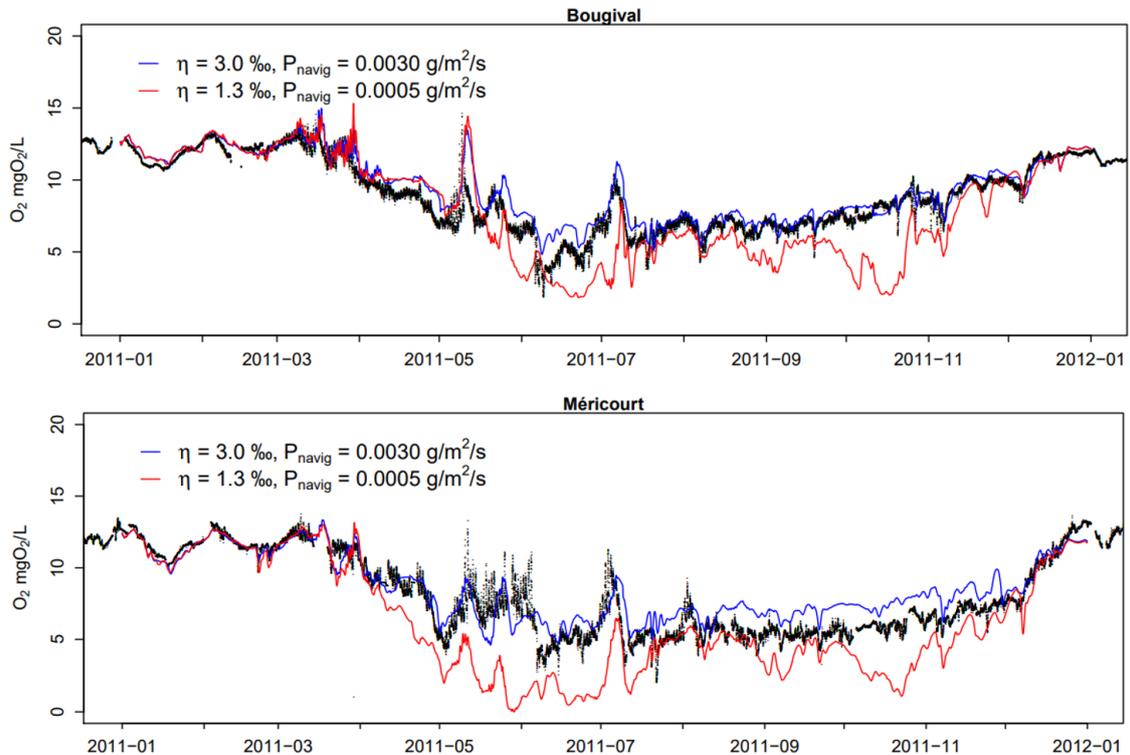


Figure 7. Concentrations en oxygène dissous simulées aux stations Bougival et Méricourt pour les deux jeux de paramètres. Les points noirs représentent les mesures.

Pour montrer l'effet du paramètre P_{navig} sur les dépôts de matières minérales dans la vase, une simulation avec $\eta = 1,3 \text{ ‰}$ et $P_{\text{navig}} = 0,003 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ a été réalisée. La valeur de P_{navig} est ainsi 6 fois supérieure à celle calibrée précédemment ($0,0005 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$). Dans ces conditions plus énergétiques, le profil en long des concentrations en MES minérales dans la vase entre Andrésey (PK 729.5 km) et Méricourt (779 km) indique très peu de dépôts sédimentaires (Fig. 8b). La désoxygénation n'est donc plus simulée avec $P_{\text{navig}} = 0,003 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (Fig. 9). L'effet de η sur la simulation des concentrations en oxygène dissous est faible (Fig. 9). La validation par des données de terrain des dépôts sédimentaires est ainsi un pré-requis à la simulation plus avant des concentrations en oxygène du milieu ; les sédiments étant susceptibles de significativement contribuer à la désoxygénation des eaux dans ce secteur, du moins en maintenant une hypothèse d'unicité des processus entre la colonne d'eau et les sédiments.

C'est justement cette hypothèse que nous remettons par la suite en cause, en nous fondant notamment sur le fait que les sédiments présentent une richesse beaucoup plus importante en bactéries que la colonne d'eau. De plus, les bactéries sont susceptibles de s'organiser dans les sédiments en colonies ou biofilm (Thullner et al., 2002 ; Newcomer et al., 2016), changeant ainsi leur physiologie (Flipo et al., 2004). En supposant que les dépôts sédimentaires sont bien reproduits par le modèle sédimentaire, nous proposons d'introduire une limitation de croissance des bactéries (hétérotrophes et nitrifiantes) sous la forme d'une loi de Monod (Eq. 7) permettant de significativement réduire le pompage benthique en oxygène. Le taux de croissance des bactéries dans les sédiments est ainsi ajusté en fonction de la biomasse bactérienne. Plus la communauté de micro-organismes croît, plus le taux de croissance diminue. Le paramètre K_{BACT} reste en revanche à déterminer. Cette fonction de limitation est appliquée dans la vase aux bactéries hétérotrophes et nitrifiantes.

$$\mu = \mu_{max} \left(\frac{\frac{1}{[BACT]}}{\frac{1}{[BACT]} + \frac{1}{K_{BACT}}} \right) \quad (7)$$

où :

μ_{max} : Taux de croissance maximal pour la bactérie (hétérotrophe ou nitrifiante), [h⁻¹]

$BACT$: Biomasse bactérienne totale dans le sédiment, [mgC/L]

K_{BACT} : Facteur de limitation, [mgC/L]

μ : Taux de croissance ajusté en fonction de la biomasse bactérienne, [h⁻¹]

Pour illustrer cette fonction de limitation, une valeur de K_{bact} de 0,03 mgC/L pour les bactéries hétérotrophes et une valeur de K_{bact} de 0,0003 mgC/L pour les bactéries nitrifiantes ont été testées. Les résultats montrent que cette fonction de limitation permet bien de pallier la désoxygénation dans la colonne d'eau (Fig. 10). Cette approche simule mieux les concentrations en oxygène dissous en période d'étiage, où le modèle a tendance à surestimer les concentrations en oxygène dissous pour $P_{navig} = 0,003 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, car dans ce cas la respiration benthique est faible du fait du peu de dépôts sédimentaires (Fig. 6a).

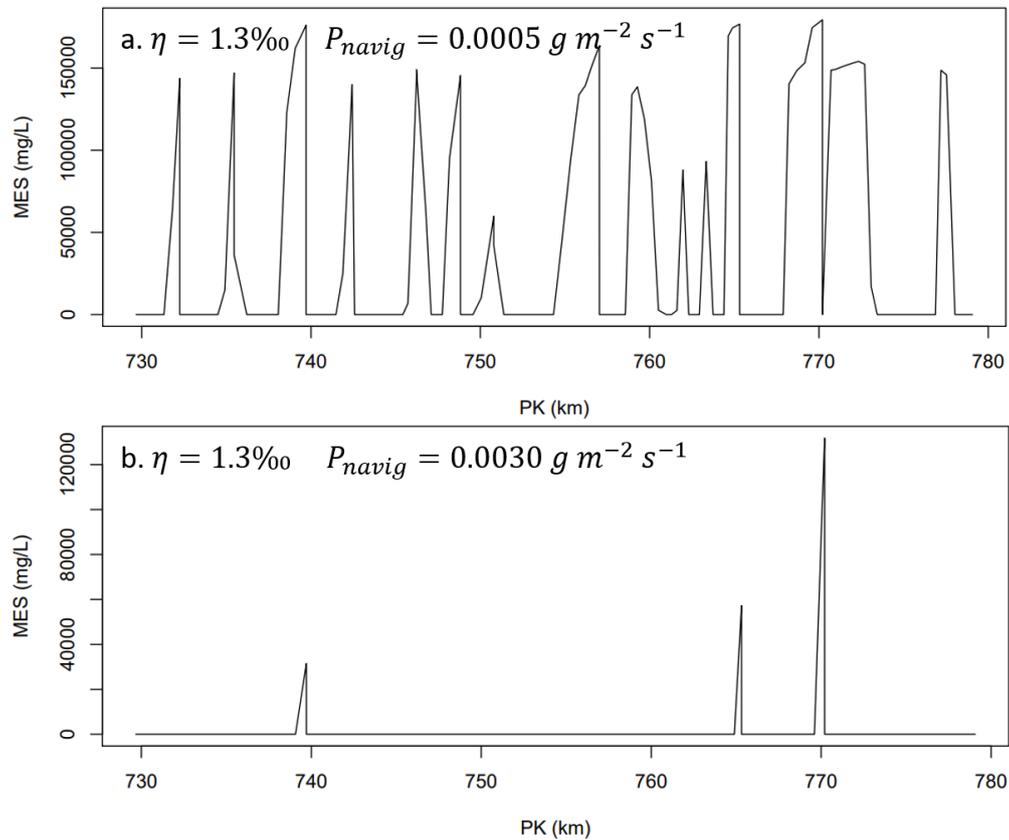


Figure 8. Profil en long des concentrations en MES minérales moyennes pour les mois d'Avril et Mai dans la vase entre Andrésy (PK = 729.5 km) et Méricourt (PK = 779 km) avec $\eta = 1,3 \text{ ‰}$ et $P_{navig} = 0,0005 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$.

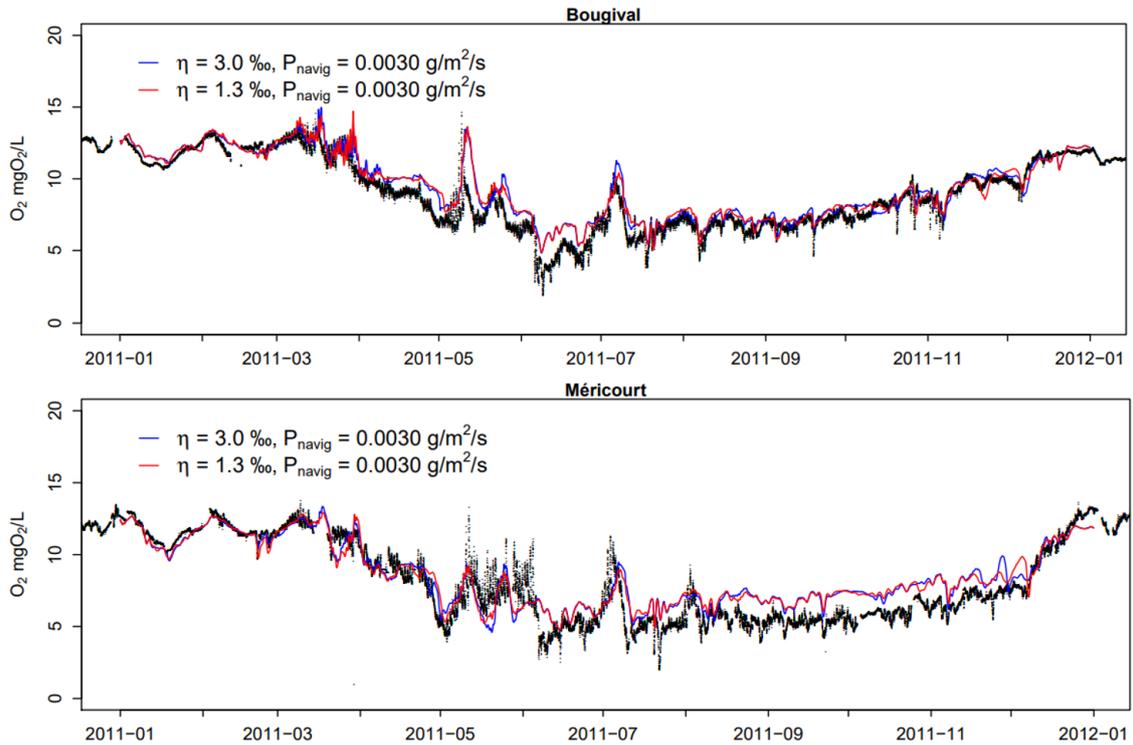


Figure 9. Concentrations en oxygène dissous simulées aux stations Bougival et Méricourt pour les deux jeux de paramètres. Les points noirs représentent les mesures.

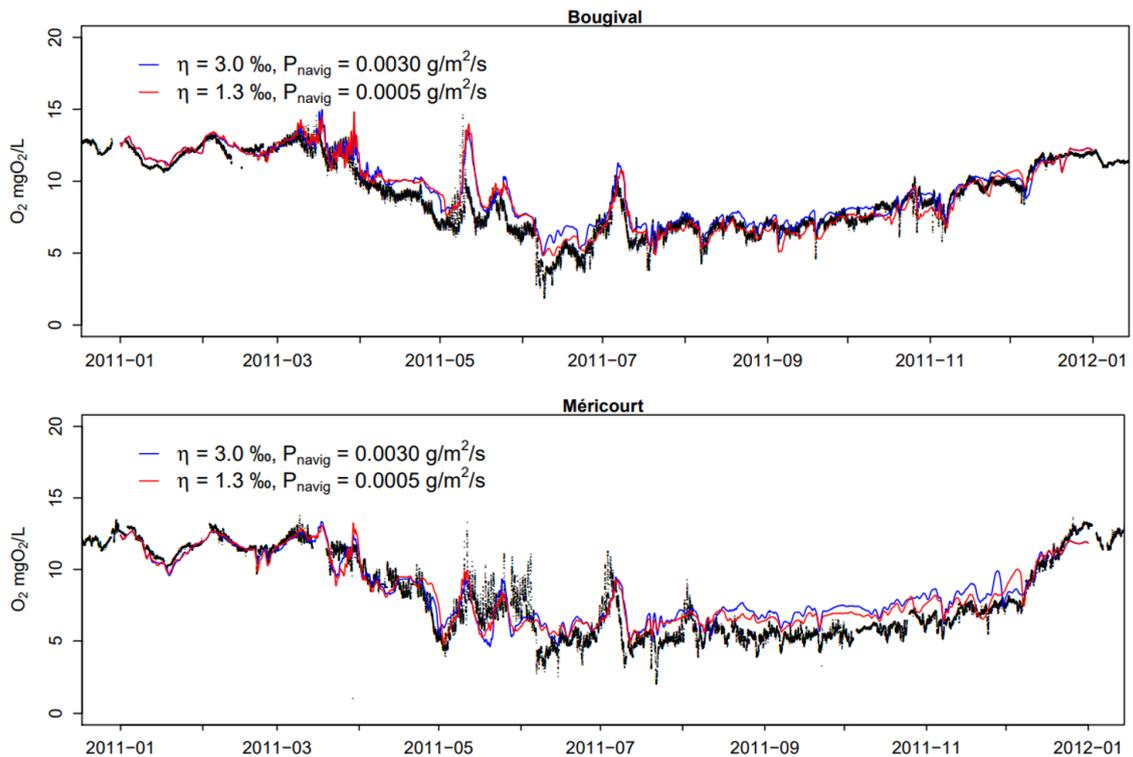


Figure 10. Concentrations en oxygène dissous simulées aux stations Bougival et Méricourt pour les deux jeux de paramètres avec limitation des activités bactériennes dans la vase. Les points noirs représentent les mesures.

Conclusion

Une calibration des paramètres d'érosion de ProSe-PA a été réalisée, qui permet d'améliorer les simulations des concentrations en TSM en étiage dans la Seine en 2011. A l'aide de l'assimilation de données, les flux de carbone sont estimés avec les paramètres temporellement variables pour comprendre le devenir du carbone et le fonctionnement biogéochimique du système Seine.

Les résultats montrent que les flux de carbone sont sensibles aux paramètres d'érosion. Le jeu de paramètres d'érosion calibrés permet de simuler la formation de stocks de sédiments dans la Seine, dont la localisation devra être validée. Pour l'année 2011, le système Seine est hétérotrophe. La production nette de CO₂ est estimée à 0,51 gC/ m²/d. L'analyse des flux de carbone organique montre que les sédiments dans la Seine jouent un rôle de source de carbone organique dissoute. Cela signifie que le carbone organique particulaire est majoritairement hydrolysé en carbone organique dissous dans les sédiments (0,23 gC/ m²/d), puis le carbone organique dissous est transféré dans la colonne d'eau par diffusion turbulente (0,14 gC/ m²/d). Cette étude révèle aussi que la respiration benthique compte pour 10% de la respiration totale du système Seine.

Une forte désoxygénation dans la colonne d'eau est simulée avec le nouveau jeu de paramètres. En période d'étiage, le modèle simule des dépôts sédimentaires dans la Seine avec le nouveau jeu de paramètres $\eta = 1,3 \text{ ‰}$ et $P_{\text{navig}} = 0,0005 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, qui favorisent les activités bactériennes en consommant l'oxygène. Il est donc nécessaire de vérifier les positions réelles des dépôts de sédiments dans le système Seine. Si le modèle surestime le dépôt de sédiments en période d'étiage, une valeur plus élevée de P_{navig} doit être utilisée. Une autre piste de réflexion est la remise en question de l'unicité des processus biologiques entre colonne d'eau et sédiments en introduisant une fonction de limitation de la croissance des bactéries (hétérotrophes et nitrifiantes) dans la vase. Dans ce cas, les propriétés physiologiques des microorganismes évoluent dans le sédiment et diffèrent de celles des microorganismes dans la colonne d'eau. Cette seconde piste donne de meilleurs résultats de simulation et ouvre des perspectives de recherche intéressantes (par exemple, l'évolution des propriétés physiologiques des microorganismes dans le sédiment).

Bibliographie

- Flipo, N., Even, S., Poulin, M., Tusseau-Vuillemin, M-H., Améziane, T., Dauta, A. (2004). Biogeochemical modelling at the river scale: plankton and periphyton dynamics (Grand Morin case study, France). *Ecol. Model.* 176(3-4), 333-347. doi:10.1016/j.ecolmodel.2004.01.012.
- Hairsine, P. and Rose C. (1992). Modeling water erosion due to overland flow using physical principles - 1. Sheet flow. *Water Resources Research* 28 (1), 237-243.
- Newcomer, M.E., Hubbard, S.S., Fleckenstein, J.H., Maier, U., Schmidt, C., Thullner, M., Ulrich, C., Flipo, N., Rubin, Y. (2016). Simulating Bioclogging Effects on Dynamic Riverbed Permeability and Infiltration. *Water Resources Research*, 52, 2883-2900. doi: 10.1002/2015WR018351
- Thullner, M., J. Zeyer, and W. Kinzelbach (2002), Influence of microbial growth on hydraulic properties of pore networks, *Transp. Porous Media*, 49(1), 99–122, doi:10.1023/A:1016030112089.
- Vilmin, L., Flipo, N., De Fouquet, C., N., Poulin, M. (2015). Pluri-annual sediment budget in a navigated river system: The Seine River (France). *Science of the Total Environment* 502, 48-59.
- Vilmin, L., Flipo, N., Escoffier, N., Rocher, V., Groleau, A. (2016). Carbon fate in a large temperate human-impacted river system: focus on benthic dynamics. *Global Biogeochemical Cycles* 30 (7), 1086-1104.
- Wang, S. (2019). Simulation du métabolisme de la Seine par assimilation de données en continu. Ph.D. thesis, Mines ParisTech, Université PSL.
- Wang, S., Flipo, N., and Romary, T. (2019). Oxygen data assimilation for estimating micro-organism communities' parameters in river systems. *Water Research* 165, 115021.
- Wang, S., Flipo, N., and Romary, T. (2018). Time-dependent global sensitivity analysis of the C-RIVE biogeochemical model in contrasted hydrological and trophic contexts. *Water Research* 144, 341-355.