

# Sorbonne Université

ED 398 – Géosciences Ressources Naturelles et Environnement

*UMR 7619 METIS*

## **Greenhouse gas emissions and nutrient retentions in reservoirs of the Seine Basin: budget and modelling**

Par Xingcheng Yan

Thèse de doctorat de Biogéochimie

Dirigée par Josette Garnier et encadrée par Vincent Thieu

Prévue pour être présentée et soutenue publiquement le 23.06.2022

Devant un jury composé de :

Didier Jézéquel	MC Institut de Physique du Globe de Paris	Rapporteur
Marie-Paule Bonnet	DR Montpellier UMR Espace-DEV	Rapporteuse
Qiuwen Chen	Pr. Nanjing Hydraulic Research Institute	Examinateur
Pierre Anschutz	Pr. Université de Bordeaux	Examinateur
Sophie Guillon	MC MINES Paris Tech	Examinatrice
Josette Garnier	DR CNRS (Paris)	Directrice de thèse
Vincent Thieu	MC Sorbonne Université (Paris)	Encadrant de thèse

## Émissions de gaz à effet de serre et rétentions des nutriments dans les réservoirs du bassin de la

### Seine: bilan et modélisation

L'impact des barrages-réservoirs sur les émissions de GES (gaz à effet de serre, CH<sub>4</sub>: méthane, CO<sub>2</sub>: dioxyde de carbone, et N<sub>2</sub>O: protoxyde d'azote) et sur les cycles biogéochimiques du C (carbone) et des nutriments (N: azote, P: phosphore, et Si: silice) a fait l'objet d'une attention croissante depuis plusieurs années. Après un premier travail d'estimation des émissions de GES par les réservoirs mondiaux, et l'examen de leur évolution à long terme, les travaux se concentrent sur les trois principaux réservoirs du bassin de la Seine, afin de déterminer leur contribution aux émissions de GES et leur impact sur les concentrations de CO<sub>2</sub> et de nutriments, dans la Seine à leur aval. Enfin, une version actualisée du modèle biogéochimique BarMan est appliquée aux réservoirs du bassin de la Seine afin d'identifier et quantifier les principaux processus affectant le devenir des nutriments et la dynamique du CO<sub>2</sub>.

À l'échelle mondiale, les flux moyens de CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> et N<sub>2</sub>O s'élèvent respectivement à  $125,7 \pm 21,2$  mg C m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>,  $415,7 \pm 36,0$  mg C m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> et  $0,28 \pm 0,11$  mg N m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>. En s'appuyant sur un recensement mondial des barrages et réservoirs (base de données GranD v. 1.3), nous avons estimé que les émissions annuelles de GES des réservoirs mondiaux s'élèvent à 12,9 Tg CH<sub>4</sub>-C an<sup>-1</sup>, 50,8 Tg CO<sub>2</sub>-C an<sup>-1</sup>, et 0,04 Tg N<sub>2</sub>O-N an<sup>-1</sup>. L'accroissement de ces émissions entre 1950 et 1980, a suivi l'augmentation rapide du nombre et de la superficie des réservoirs mondiaux.

Dans le bassin de la Seine, deux ans de campagnes de mesures ont permis de mettre en évidence des tendances saisonnières marquées pour le CH<sub>4</sub> et le CO<sub>2</sub> dans les trois principaux réservoirs. Les concentrations de CH<sub>4</sub> dans ces réservoirs sont élevées en été-automne, faibles en hiver-printemps, et apparaissent significativement et positivement corrélées avec la température de l'eau et la saturation en oxygène dissous. Des tendances inverses ont été mises en évidence pour le CO<sub>2</sub> avec des concentrations les plus basses en été, au maximum de l'activité photosynthétique. Au final, les trois réservoirs apparaissent comme des sources relativement faibles de GES, avec des valeurs moyennes de 6,6 mg CH<sub>4</sub>-C m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>, 132,7 mg CO<sub>2</sub>-C m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> et 0,03 mg N<sub>2</sub>O-N m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>, assez largement inférieures aux valeurs moyennes des réservoirs mondiaux.

Des chroniques longues d'observations des Grands Lacs de Seine (1998–2018) sur la qualité de l'eau ont été complétées par nos mesures sur le terrain (2019–2020). Le calcul des bilans entrées-sorties montre une rétention importante dans les réservoirs (16–53% pour le DIN: azote inorganique dissous, 26–48% pour les PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>: orthophosphates, 22–40% pour la DSi: silice dissoute et 36–76% des MES: matières en suspension). Les réservoirs modifient ainsi considérablement la qualité des eaux réceptrices en aval. Tout en diminuant les concentrations de DIN, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> et DSi, ils augmentent les concentrations en COD (carbone organique dissous) et CODB (COD biodégradable), ainsi que celles du CO<sub>2</sub> pendant leurs périodes de vidange, en fin d'été et en automne. Une analyse quantitative montre que les évolutions saisonnières de la qualité de l'eau des réservoirs sont déterminées tant par la dilution de l'eau entrante (quantité et qualité) que par les processus biogéochimiques dans ces réservoirs.

Le modèle BarMan a permis de simuler de manière satisfaisante les variations saisonnières de la qualité de l'eau des trois réservoirs, pour les concentrations en nutriments et pour le CO<sub>2</sub>, et a par ailleurs permis de mieux caractériser le devenir du C et des nutriments (N, P et Si) dans les réservoirs de la Seine. L'assimilation des NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>, et DSi par le phytoplancton et la dénitrification benthique (pour NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) apparaissent comme les principaux processus gouvernant l'élimination des nutriments. La précipitation de CaCO<sub>3</sub> (Carbonate de calcium) et l'émission de CO<sub>2</sub> sont responsables de l'élimination du DIC dans les trois réservoirs. Des explorations par le modèle montrent également que les états trophiques des réservoirs (via les apports en P) et les caractéristiques morphologiques (modification de la profondeur moyenne) affectent de manière significative l'efficacité de la rétention des NO<sub>3</sub><sup>-</sup> et DSi, et donc la qualité de l'eau en aval.

**Mots clés:** Réservoirs, émissions de GES, rétentions des nutriments, processus biogéochimiques, modèle Barman, bassin de la Seine.

# Abstract

---

## Greenhouse gas emissions and nutrient retentions in reservoirs of the Seine Basin: budget and modelling

The impacts of reservoirs on GHG (greenhouse gas, including CH<sub>4</sub>: methane, CO<sub>2</sub>: carbon dioxide, and N<sub>2</sub>O: nitrous oxide) emissions and the biogeochemical cycling of C (carbon) nutrients (including N: nitrogen, P: phosphorus, and Si: silica) have received widespread attention. This work first estimates GHG emissions from global reservoirs and examines their long-term evolution, and then focuses on the main reservoirs in the Seine Basin to elucidate their contribution to GHG emissions and their impact on riverine downstream nutrient and CO<sub>2</sub> concentrations. Finally, the updated process-based BarMan model was applied to these reservoirs to unravel the nutrient fates and CO<sub>2</sub> dynamics in these reservoirs.

At the global scale, the average fluxes of CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, and N<sub>2</sub>O were  $125.7 \pm 21.2 \text{ mg C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ,  $415.7 \pm 36.0 \text{ mg C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ , and  $0.28 \pm 0.11 \text{ mg N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ , respectively. Combining with the Grand database (global reservoir and dam database, v. 1.3), we estimated that the annual GHG emissions from global reservoirs amounted to 12.9 Tg CH<sub>4</sub>-C yr<sup>-1</sup>, 50.8 Tg CO<sub>2</sub>-C yr<sup>-1</sup>, and 0.04 Tg N<sub>2</sub>O-N yr<sup>-1</sup>. A high increase rate of GHG emissions occurred from 1950 to 1980, due to the rapid increases in the numbers and surface areas of global reservoirs during the same period.

Focusing on the three main reservoirs of the Seine Basin, expected seasonal patterns of CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> were observed, CH<sub>4</sub> concentrations in these reservoirs were high in summer and autumn and low in winter and spring, and were significantly and positively correlated with water temperature and S<sub>DO</sub> (saturation of dissolved oxygen), different from CO<sub>2</sub>, with lowest concentrations in summer when photosynthesis was the highest. The three reservoirs were slight sources of GHG, with average values of 6.6 mg CH<sub>4</sub>-C m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>, 132.7 mg CO<sub>2</sub>-C m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>, and 0.03 mg N<sub>2</sub>O-N m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>, which were lower than average values of global reservoirs.

Based on the long-term (1998–2018) water quality data (from the Grands Lacs de Seine) and our field measurements (2019–2020), we found, using a mass-balance calculation, that the reservoirs retained 16–53%, 26–48%, 22–40%, and 36–76% of the inputs of DIN (dissolved inorganic nitrogen), PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> (orthophosphates), DSi (dissolved silica), and SM (suspended matter), respectively. Hence, these reservoirs significantly change the riverine downstream water quality. They increase DOC (dissolved organic matter) and BDOC (biodegradable DOC) concentrations, while decrease the concentrations of DIN, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>, DSi, as well as the CO<sub>2</sub> ones, during their emptying periods in late summer and autumn. A quantitative analysis suggested that the mixing effect of entering water (quantity and quality) and biogeochemical processes in these reservoirs are the two dominant factors affecting seasonally reservoir water quality changes, and thus impacting downstream water quality.

The application of the BarMan model satisfactorily simulates the changes in water quality variables (nutrients and CO<sub>2</sub>) and explicitly unravels C and nutrient (N, P, and Si) fates in these reservoirs. Results revealed that phytoplankton assimilation (for NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>, and DSi) and benthic denitrification (for NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) are the dominant processes in removing nutrients. The precipitation of CaCO<sub>3</sub> and CO<sub>2</sub> emission are responsible for the DIC removal in these reservoirs. The results of scenario analysis suggested that reservoir trophic states (as P concentrations) and morphological characteristics (as mean depth) would significantly affect the retention efficiencies of NO<sub>3</sub><sup>-</sup> and DSi, and thus affect their downstream water quality.

**Keywords:** Reservoirs, GHG emissions, nutrient retentions, biogeochemical processes, BarMan model, Seine Basin

## 塞纳河流域典型水库的温室气体排放和营养盐截留：衡算和模型

水库对温室气体（CH<sub>4</sub>：甲烷，CO<sub>2</sub>：二氧化碳，N<sub>2</sub>O：氧化亚氮）排放以及生源要素（包括：碳、氮、磷和硅）生物地球化学循环的影响备受关注。本文首先回顾并估算了全球水库的温室气体排放及其长期演变（1950-2017）；随后重点围绕法国塞纳河流域典型水库，阐明其对温室气体排放的贡献以及对下游河流营养盐和 CO<sub>2</sub> 浓度的影响；最后，应用 BarMan 模型模拟并解析了水库的碳、氮、磷、硅的生物地球化学循环过程。

结果表明，全球范围内水库的 CH<sub>4</sub>，CO<sub>2</sub> 和 N<sub>2</sub>O 的平均排放通量分别为  $125.7 \pm 21.2 \text{ mg C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ， $415.7 \pm 36.0 \text{ mg C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ， $0.28 \pm 0.11 \text{ mg N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 。结合 Grand（全球水库和大坝数据库，v. 1.3）数据库，我们估算全球水库的温室气体年际排放量为  $12.9 \text{ Tg CH}_4\text{-C y}^{-1}$ ， $50.8 \text{ Tg CO}_2\text{-C y}^{-1}$ ， $0.04 \text{ Tg N}_2\text{O-N y}^{-1}$ 。基于温室气体平均通量，我们首次估算了全球水库在 1950 年到 2017 年间对温室气体排放的贡献，发现由于全球水库的数量和表面积在 1950–1980 年迅速增加，其对温室气体排放的贡献也随之增加。

以法国塞纳河流域典型水库（Marne, Aube 和 Seine 水库）为研究对象，结果表明，水库的 CH<sub>4</sub> 和 CO<sub>2</sub> 浓度存在明显的季节性变化，CH<sub>4</sub> 浓度在夏季和秋季较高，在冬季和春季较低，并且与水温 and 溶解氧饱和度显著正相关，而 CO<sub>2</sub> 则与之相反。水库的温室气体排放通量的估算结果表明，三个水库是温室气体较为微弱的排放源，其平均排放通量分别为  $6.6 \text{ mg CH}_4\text{-C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ， $132.7 \text{ mg CO}_2\text{-C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ，and  $0.03 \text{ mg N}_2\text{O-N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ，低于全球水库温室气体排放通量的平均值。

结合水库及其上、下游河流长期水质数据（1998–2018）和野外观测数据（2019–2020），通过质量平衡计算，结果表明，水库分别截留了 DIN、PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>、DSi 和悬浮物输入量的 16–53%、26–48%、22–40% 和 36–76%。同时，发现 Marne、Aube 和 Seine 水库在排水期间显著改变了下游河流水质：显著增加下游河流 DOC（溶解性有机碳）和 BDOC（生物可降解的 DOC）的浓度，但是显著降低 DIN（溶解性无机氮）、PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>（磷酸盐）、DSi（溶解性硅酸盐）和 CO<sub>2</sub> 的浓度。进一步的定性分析结果表明，水库进水的混合效应以及生物地球化学过程是水库水质变化的两个主要因素，并由此影响下游水质。

BarMan 模型较好地模拟了水库水质和 CO<sub>2</sub> 的动态变化，并明确地揭示了水库碳、氮、磷和硅的生物地球化学循环过程。结果表明，浮游植物的同化（NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>、DSi）以及沉积物的反硝化作用（NO<sub>3</sub><sup>-</sup>）是水库营养盐去除的主要过程，CaCO<sub>3</sub>（碳酸钙）沉淀和 CO<sub>2</sub> 排放是水库 DIC（溶解性无机碳）浓度降低的主要原因。此外，分析了三种可能情景（磷浓度、水文特征以及水库形态特征）对水库生物地球化学过程的影响，结果表明，水库磷浓度和形态特征（平均深度）显著影响 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 和 DSi 的截留效率，从而影响水库对下游河流的生物地球化学功能，而水文特征（提前和延后排水期一个月）的改变对水库生物地球化学过程及营养盐截留的影响较小。

**关键词：** 水库，温室气体排放，营养盐截留，生物地球化学过程，BarMan 模型，塞纳河流域