

Guilherme Calabro Souza

a le plaisir de plaisir de vous inviter à sa soutenance de thèse de doctorat en sciences environnementaux, sous réserve de l'avis favorable des rapporteurs, intitulé

Mesure de la dynamique des flux de nutriments et de contaminants à l'interface eau-sédiments dans les milieux aquatiques

réalisée sous l'encadrement de Régis Moilleron, Bruno Lemaire, Magali Jodeau et Brigitte Vinçon-Leite.

Elle aura lieu le mardi 7 juin à 10h à l'amphi Navier à l'Ecole des Ponts ParisTech sur l'avenue Blaise Pascal à Champs-sur-Marne, et également en ligne.

Devant un jury composé de :

Sophie GUILLON, Assistante de recherche, Mines ParisTech (Rapporteuse)

Yves BRUNET, Directeur de recherche, UMR ISPA – INRAe (Rapporteur)

Christophe RABOUILLE, Directeur de Recherche, UMR LSCE – CNRS (Examinateur)

Thierry LABASQUE, Ingénieur de Recherche, Géosciences Rennes (Examinateur)

Régis MOILLERON, Professeur, LEESU – UPEC (Directeur de thèse)

Bruno LEMAIRE, IPEF, HYCAR – AgroParisTech (Co-Encadrant de thèse)

Magali JODEAU, Ingénieur-Chercheur, LHSV – EDF R&D (Co-Encadrante de thèse)

Brigitte VINÇON-LEITE, Directrice de Recherche, LEESU – ENPC (Co-Encadrante de thèse)

Mot clés : Hydrodynamique ; Interface eau-sédiment ; Flux benthiques ; Relaxed eddy accumulation

Résumé :

La qualité des eaux douces dans les milieux naturels est une préoccupation majeure pour les secteurs agricole, industriel et domestique. Malgré des décennies d'efforts pour réduire les apports de polluants, la récupération de la qualité de l'eau peut être lente, en raison du stock de polluants dans les sédiments des écosystèmes aquatiques. Par exemple, la charge dite interne présente une contribution notable à la dynamique de l'eutrophisation. Ces flux benthiques (c'est-à-dire à l'interface entre les sédiments et la colonne d'eau) résultent de l'activité microbiologique et chimique dans les sédiments. Ils ont différents facteurs, dont l'hydrodynamique. La turbulence affecte la couche limite benthique, plus précisément l'épaisseur de sa sous-couche diffusive qui souvent limitante pour les flux. Différentes techniques sont largement utilisées pour quantifier les flux benthiques (par exemple, les chambres benthiques, les chambres à dialyse ou les profileurs de concentration). Seule la covariance turbulente permet de mesurer les flux benthiques turbulents sur une grande surface de sédiments sans perturber l'écoulement, mais pour une gamme limitée de flux (chaleur, oxygène dissous, nitrates, particules et alcalinité). L'adaptation au milieu aquatique de la relaxed eddy accumulation (REA), une technique de micrométéorologie, s'est avérée théoriquement faisable. La REA consiste en un échantillonnage asservi à la direction de la fluctuation turbulente de la vitesse verticale : on collecte des échantillons

séparés pour les courants ascendants et descendants ; le flux benthique est proportionnel à la différence de concentration entre les deux échantillons résultants. L'objectif de ce travail était de développer un prototype, de valider la technique avec une méthode de référence, et d'acquérir les premières séries temporelles à un pas de temps horaire des flux benthiques turbulents de nutriments et d'ions métalliques.

Au cours du développement d'un prototype, différents tests, expériences et simulations ont permis de transférer les principes de la REA à l'environnement aquatique. Ceux-ci ont été réalisés en collaboration avec l'Institut d'études environnementales de l'Université de Coblence-Landau, en Allemagne.

La validation technique de la REA aquatique a consisté à comparer les flux d'oxygène mesurés simultanément par REA et par covariance turbulente. Des campagnes ont été menées en 2020 sur quatre sites différents présentant des conditions hydrodynamiques et écologiques différentes, allant d'un canal de laboratoire à un lac peu profond très eutrophe. La REA a été validée et les mesures ont permis de mieux comprendre ses conditions d'utilisation.

Les flux benthiques mesurés par quatre techniques différentes ont été comparés en collaboration avec l'Infrastructure de recherche sur le sol et l'eau (SoWa) de l'Université de Bohême du Sud, en République tchèque. La première loi de Fick a été appliquée à la fois (i) aux flux diffusifs dans des carottes de sédiments ex-situ en mesurant les microprofils de concentration avec des chambres à dialyse et un microprofileur d'oxygène et (ii) aux flux turbulents en mesurant in situ l'écart de concentration entre les sous-couches diffusives et turbulentes de la couche limite benthique et en calculant un coefficient de transfert de masse proportionnel à la vitesse de friction (MTC pour *mass transfer coefficient*, une autre technique innovante). Le prototype a mis en œuvre (iii) la covariance turbulente et (iv) la REA. Les flux d'oxygène dissous, de phosphate, d'ammonium, de sulfate, de fer et de manganèse ont été mesurés en juin 2021 dans un petit lac eutrophe peu profond, le lac de Champs-sur-Marne. Les flux turbulents de nutriments et d'ions métalliques mesurés par REA et par MTC se sont avérés comparables, ce qui donne confiance dans les deux nouvelles techniques. De plus, les mesures ont montré une forte dynamique de l'oxygène au cours de la journée et que le flux d'oxygène vers le sédiment ne couvrait pas sa demande en oxygène, favorisant l'hypoxie au fond du lac.

Cette thèse décrit le développement, la validation et l'application de la REA aquatique dans ce travail. Il donne le cahier des charges et les spécifications du prototype, ainsi que sa gamme d'utilisation. Même si le développement de la REA n'est pas achevé, des flux de nutriments et d'ions métalliques ont été mesurés avec cette nouvelle technique et ont montré une dynamique rapide. Tous ces éléments nous permettent de présenter la REA comme une technique fiable pour suivre la dynamique rapide des flux benthiques, et donc leur contribution aux processus biogéochimiques des écosystèmes aquatiques.

Guilherme Calabro Souza

has the pleasure of inviting you to her doctoral defense in environmental science, subject to the approval of manuscript by the jury, titled

Mesure de la dynamique des flux de nutriments et de contaminants à l'interface eau-sédiments dans les milieux aquatiques

under the supervision of Régis Moilleron, Bruno Lemaire, Magali Jodeau et Brigitte Vinçon-Leite.

It will take place on Tuesday, June 7th at 10am at amphitheater Navier at the Ecole des Ponts ParisTech, and also online.

In front of a jury composed of:

Sophie GUILLON, Assistante de recherche, Mines ParisTech (Rapporteuse)

Yves BRUNET, Directeur de recherche, UMR ISPA – INRAe (Rapporteur)

Christophe RABOUILLE, Directeur de Recherche, UMR LSCE – CNRS (Examineur)

Thierry LABASQUE, Ingénieur de Recherche, Géosciences Rennes (Examineur)

Régis MOILLERON, Professeur, LEESU – UPEC (Directeur de thèse)

Bruno LEMAIRE, IPEF, HYCAR – AgroParisTech (Co-Encadrant de thèse)

Magali JODEAU, Ingénieur-Chercheur, LHSV – EDF R&D (Co-Encadrante de thèse)

Brigitte VINÇON-LEITE, Directrice de Recherche, LEESU – ENPC (Co-Encadrante de thèse)

Key words: Hydrodynamics; Water-sediment interface; Benthic fluxes; Relaxed eddy accumulation.

Abstract:

Freshwater quality in natural environments is of major concern for the agricultural, industrial, and domestic sectors. Despite decades of efforts to reduce the pollutant inputs, water quality recovery can be slow, due to the pollutant stock in the sediment of aquatic ecosystems. For example, the so-called internal load presents a notable contribution to the dynamics of eutrophication. Such benthic fluxes (i.e. at the interface between the sediment and the water column) result from microbiological and chemical activity in the sediment. They have different drivers including hydrodynamics. Turbulence affects the benthic boundary layer, more specifically fluxes through the thickness of the diffusive sublayer (DBL). Different techniques are widely used to quantify benthic fluxes (e.g., benthic chambers, dialysis chambers or concentration profilers). Only aquatic eddy covariance (EC) makes it possible to measure turbulent benthic fluxes over a large sediment area without perturbing the flow, but for a limited range of fluxes (heat, dissolved oxygen, nitrates, particles and alkalinity). The adaptation to the aquatic environment of relaxed eddy accumulation (REA), a micrometeorology technique, was shown to be theoretically feasible. REA consists of a sampling conditioned by the direction of the turbulent fluctuation of the vertical velocity: different samples are accumulated for updrafts and downdrafts and the benthic flux is proportional to the concentration difference between sample pairs. The objective of this work was to develop a prototype, to validate the technique with a reference method, and to acquire first time series at an hourly time step of turbulent benthic fluxes of nutrients.

During the development of a prototype, the principles of REA were transferred to aquatic environments through various tests, experiments and simulations. These were carried out in collaboration with the Institute for Environmental Studies of the University of Koblenz-Landau, Germany.

A technical validation of the aquatic REA was carried out by comparing oxygen fluxes measured simultaneously by REA and by eddy covariance. Campaigns were conducted in 2020 at four different sites with different hydrodynamic and ecological conditions, ranging from a laboratory flume to a highly eutrophic shallow lake. REA was validated and the measurements gave insights on its operating conditions.

Benthic fluxes measured by four different techniques were compared in collaboration with the Soil and Water Research Infrastructure (SoWa) of the University of South Bohemia, Czech Republic. The first Fick's law was applied both (i) to diffusive fluxes in ex-situ sediment cores by measuring concentration microprofiles with diffusive thin films and (ii) to turbulent fluxes by measuring in situ the concentration gap between the diffusive and the turbulent sublayers of the benthic boundary layer and computing a mass transfer coefficient proportional to the friction velocity (MTC, another innovative technique); the prototype equipped for (iii) eddy covariance and (iv) REA was also deployed. Fluxes of dissolved oxygen and of phosphate, ammonium, sulphate, iron and manganese ions were measured in a eutrophic, small and shallow lake, the Lake Champs-sur-Marne in June 2021. The turbulent fluxes of nutrients and metallic ions measured by REA and by MTC were comparable, increasing the confidence in both new techniques. In addition, the measurements showed a strong oxygen dynamic over the day and that the oxygen influx towards the sediment did not cover the sediment demand, helping in hypoxia.

The development, validation and application of the aquatic REA are described and discussed in this work. The measurement requirements and the range of use are also illustrated. Even if REA still requires further development, fluxes of nutrients and metallic ions were measured by the new technique and exhibited fast dynamics. All these elements allow us to present REA as a reliable technique for monitoring the fast dynamics of benthic fluxes, and thus their contribution to the biogeochemical processes of aquatic ecosystems.