

Formulaire de candidature

Titre de la thèse	Dynamique biogéochimique à l'interface terre-mer : exploration des estuaires souterrains
Ecole Doctorale	ED548 Mer et Sciences
Laboratoire	MIO
Discipline	Ecologie microbienne, biogéochimie marine
Directeur(s) de Thèse & Encadrant(s)	Benjamin Misson (MCF HDR, misson@univ-tln.fr), Virginie Sanial (MCF, sanial@univ-tln.fr)

Description du sujet de recherche

Contexte, originalité et pertinence par rapport à l'état de l'art :

La zone de mélange des estuaires souterrains (« Subterranean Mixing and Reaction Field, SMRF) est un terme qui a récemment été introduit comme un consensus entre les communautés d'océanographes et d'hydrologues pour définir les processus peu profonds qui se produisent aux interfaces terre-océan¹. La SMRF présente un grand intérêt car elle est particulièrement dynamique d'un point de vue hydrobiogéochimique. Les mécanismes qui relient les eaux souterraines à l'océan sont englobés dans le terme général de rejet d'eaux souterraines sous-marines (SGD ; SGD a été défini au sens large comme « any flow of water on continental margins from the seabed to the coastal ocean, regardless of fluid composition or driving forces »²). Par conséquent, SGD inclut à la fois le rejet d'eau douce directement dans l'océan côtier entraîné par les gradients hydrauliques terrestres et la circulation de l'eau de mer à travers les sédiments perméables en raison de diverses forces telles que les vagues, la densité, ou le pompage par les marées³.

Les SGD sont des voies bien connues pour les solutés vers l'océan côtier, aussi bien pour les nutriments et les métaux⁴⁻⁶, que pour les polluants agricoles⁷. Des études ont montré que les flux de nutriments apportés par les SGD peuvent déclencher une eutrophisation côtière^{8,9}, conduire au développement d'une prolifération d'algues toxiques¹⁰, ou renforcer l'hypoxie côtière en stimulant la production de matière organique et en créant une demande d'oxygène due à l'apport de substances réduites^{11,12}. Les SGD peuvent également perturber le biote marin, notamment le phytoplancton, les bactéries, les macrophytes, et les animaux¹³. Par conséquent, les SGD sont un mécanisme important à prendre en compte dans la gestion globale des zones côtières¹⁴. La SMRF est également une zone très active pour le cycle des nutriments. Par exemple, la distribution de l'azote inorganique dissous (DIN) et ses transformations (nitrification, dénitrification, DNRA, reminéralisation et annamoxe) dans la SMRF sont plus complexes que dans la colonne d'eau stratifiée et les sédiments¹⁵, en partie à cause des états rédox qui sont les principaux moteurs de transformation de l'azote⁹. Cependant, le rôle joué par les processus microbiologiques dans les cycles des nutriments dans l'estuaire souterrain reste peu contraint. Les aquifères contiennent une grande partie de la diversité microbienne mondiale¹⁶. Les aquifères côtiers sont particulièrement intéressants d'un point de vue microbiologique en raison des forts gradients de conditions physico-chimiques. Par conséquent, en plus des processus géophysiques (désorption, dissolution, précipitation) et des conditions redox, l'étude des activités microbiennes dans la SMRF est essentielle pour comprendre la biogéochimie des eaux souterraines^{15,17}. Pour autant, peu d'études ont été conduites sur les fonctions métaboliques des micro-organismes dans les aquifères côtiers¹⁸.

Les traceurs géochimiques environnementaux tels que les isotopes du radium (Ra) sont des outils pour investiguer les processus complexes inhérents au système hydrologique. Les isotopes du Ra (²²³Ra, T_{1/2}=11,4 d; ²²⁴Ra, T_{1/2}=3,66 d; ²²⁶Ra, T_{1/2}=1600 y ; ²²⁸Ra, T_{1/2}=5,75 y) sont des produits naturels des chaînes de décroissance radioactive de l'uranium et du thorium issus des sédiments résultant en de plus fortes concentrations dans les eaux souterraines par rapport aux rivières et à l'eau de mer. Grâce à leurs temps de demi-vies différents, ils peuvent tracer des processus se produisant à échelles spatiales et temporelles variées. Les isotopes du Ra sont conservatifs pouvant être ainsi utilisés comme des traceurs de l'origine et du temps de résidence des eaux au sein de la SMRF^{19,20}. Les apports en sels nutritifs des SGD sont communément estimés grâce aux isotopes du Ra.

Le lien entre le métabolisme cellulaire et la biogéochimie des océans est une perspective de recherche émergente possible grâce aux progrès dans l'utilisation de nouvelles méthodes biologiques en omique. Les radiotraceurs sont des chronomètres et fournissent donc des informations essentielles sur l'échelle de temps des processus se produisant avec la SMRF. La combinaison de la composition chimique de la

SMRF et des groupes fonctionnels microbiens actifs offrira une nouvelle perspective sur le fonctionnement biogéochimique de cette zone complexe et dynamique.

Objectifs :

L'objectif principal de cette étude est de relier la dynamique de circulation et l'activité des communautés microbiennes aux gradients physicochimiques dans les SMRF. A travers l'étude d'une zone d'étude modèle, cette thèse permettra de préciser à la fois le bilan biogéochimique au sein des SMRF et l'impact des SGD sur les eaux côtières.

Les principales questions scientifiques sous-jacentes sont les suivantes :

- Q1 : Quelle est la variabilité de circulation dans une SMRF modèle ? (Circulation hydrologique, temps de résidence, influence des marées, vents, etc)
- Q2 : Quelles sont les variabilités de fonctionnement biogéochimique associées ? (Distribution spatiales de la composition chimique et des microorganismes actifs dans la SMRF)
- Q3 : Quelle est l'influence des SGD dans le fonctionnement biogéochimiques des zones côtières ? (Flux de C, N, P, et réponses microbiennes)

Méthodes :

La méthodologie de la thèse suivra deux axes principaux : (i) la description du système SMRF par une approche d'observation et (ii) l'évaluation des processus biogéochimiques par une approche expérimentale.

- i. **Descriptions du système SMRF** : Les variations de circulation dans les SMRF répondront à priori aux variations de niveau de la mer (marées, pression atmosphérique) et aux apports d'eau douce (précipitation). Par conséquent des échantillons seront collectés en saisons sèche et humide, ainsi qu'à plus petite échelle temporelle en fonction du cycle des marées ou de l'alternance dépression/anticyclone. La collecte des eaux souterraines se fera le long des gradients de salinité. Les isotopes du Ra (^{223}Ra , ^{224}Ra) seront déterminés pour comprendre la dynamique dans la SMRF (Q1) ainsi que l'export en mer (Q3). Les nutriments (DIN, DIP, DON, DOP, DOC, DIC) seront quantifiés et la qualité de la matière organique sera évaluée (FDOM, CDOM). La communauté procaryote sera quantifiée par qPCR, la diversité taxonomique des taxons présents et actifs sera évaluée par métabarcoding (Q2). Selon les prédictions fonctionnelles taxonomiques, un sous-ensemble d'échantillons sera choisi pour une évaluation approfondie des voies métaboliques utilisées par la communauté par le biais de la métagénomique et de la métatranscriptomique.
- ii. **Incubations en laboratoire** : Des expériences d'incubation seront menées, tout d'abord pour mieux évaluer comment les vitesses de transformation de C,N,P, le long du gradient de salinité dans la SMRF (Q2). Pour cela, des incubations d'échantillons eau+sable prélevés le long du gradient de salinité seront mises en place afin de déterminer le potentiel de transformation en s'affranchissant de tout mélange. La quantification des différentes formes de C, N, et P au cours du temps permettra de réaliser le bilan géochimique. Pour évaluer l'influence des SGD dans le fonctionnement biogéochimiques des zones côtières, de l'eau interstitielle issue des SMRF sera mélangée à de l'eau de mer dans des proportions différentes pour mieux cadrer le seuil de perturbation de la communauté marine (Q3). Les réponses microbiennes (dynamique d'abondance par cytométrie en flux, procaryotes hétérotrophes et phytoplancton) et les transformations géochimiques seront suivies.

Mots clés : Décharge d'eau souterraine, radium, écologie microbienne, cycle des nutriments

Références :

1. Duque, C., Michael, H. A. & Wilson, A. M. The Subterranean Estuary: Technical Term, Simple Analogy, or Source of Confusion? *Water Resources Research* vol. 56 e2019WR026554 (2020).
2. Burnett, W. C., Bokuniewicz, H., Huettel, M., Moore, W. S. & Taniguchi, M. Groundwater and pore water inputs to the coastal zone. *Biogeochemistry* **66**, 3–33 (2003).

3. Santos, I. R., Eyre, B. D. & Huettel, M. The driving forces of porewater and groundwater flow in permeable coastal sediments: A review. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* **98**, 1–15 (2012).
4. Charette, M. A., Sholkovitz, E. R. & Hansel, C. M. Trace element cycling in a subterranean estuary: Part 1. Geochemistry of the permeable sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta* vol. 69 2095–2109 (2005).
5. Paytan, A. *et al.* Submarine groundwater discharge: An important source of new inorganic nitrogen to coral reef ecosystems. *Limnol. Oceanogr.* **51**, 343–348 (2006).
6. Rodellas, V., Garcia-Orellana, J., Masqué, P., Feldman, M. & Weinstein, Y. Submarine groundwater discharge as a major source of nutrients to the Mediterranean Sea. *Proc. Natl. Acad. Sci.* **112**, 3926–3930 (2015).
7. Bishop, J. M., Glenn, C. R., Amato, D. W. & Dulai, H. Effect of land use and groundwater flow path on submarine groundwater discharge nutrient flux. *J. Hydrol. Reg. Stud.* (2015) doi:10.1016/j.ejrh.2015.10.008.
8. Paerl, H. W. Coastal eutrophication and harmful algal blooms: Importance of atmospheric deposition and groundwater as “new” nitrogen and other nutrient sources. *Limnol. Oceanogr.* **42**, 1154–1165 (1997).
9. Slomp, C. P. & Van Cappellen, P. Nutrient inputs to the coastal ocean through submarine groundwater discharge: controls and potential impact. *J. Hydrol.* **295**, 64–86 (2004).
10. Hu, C., Muller-Karger, F. E. & Swarzenski, P. W. Hurricanes, submarine groundwater discharge, and Florida’s red tides. *Geophys. Res. Lett.* **33**, L11601 (2006).
11. Peterson, R. N. *et al.* A new perspective on coastal hypoxia: The role of saline groundwater. *Mar. Chem.* **179**, 1–11 (2016).
12. Sanial, V., Moore, W. S. & Shiller, A. M. Does a bottom-up mechanism promote hypoxia in the Mississippi Bight? *Mar. Chem.* **235**, 104007 (2021).
13. Lecher, A. Groundwater Discharge in the Arctic: A Review of Studies and Implications for Biogeochemistry. *Hydrology* vol. 4 41 (2017).
14. IOC, SCOR, & IAEA. *Submarine groundwater discharge: management implications, measurements and effects*. vol. 5 (UNESCO/IOC, 2004).
15. Santoro, A. Microbial nitrogen cycling at the saltwater–freshwater interface. *Hydrogeol. J.* **18**, 187–202 (2010).
16. Magnabosco, C. *et al.* The biomass and biodiversity of the continental subsurface. *Nat. Geosci.* **11**, 707–717 (2018).
17. Seibert, S. L. *et al.* Investigating the Land-Sea Transition Zone. in *YOUMARES 9 - The Oceans: Our Research, Our Future: Proceedings of the 2018 conference for YOUng MARine RESEARCHer in Oldenburg, Germany* (eds Jungblut, S., Liebich, V. & Bode-Dalby, M.) 225–242 (Springer International Publishing, 2020). doi:10.1007/978-3-030-20389-4_12.
18. Ruiz-González, C., Rodellas, V. & Garcia-Orellana, J. The microbial dimension of submarine groundwater discharge: current challenges and future directions. *FEMS Microbiology Reviews* (2021) doi:10.1093/femsre/fuab010.
19. Swarzenski, P. W., Porcelli, D., Andersson, P. S. & Smoak, J. M. The Behavior of U- and Th-series Nuclides in the Estuarine Environment. *Rev. Mineral. Geochem.* **52**, 577–606 (2003).
20. Tamborski, J. J. Investigation of pore water residence times and drainage velocities in salt marshes using short-lived radium isotopes. *Mar. Chem.* **9** (2017).

Calendrier prévisionnel

	Année 1				Année 2				Année 3			
Activités	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Caractérisation hydrologique												
Mise au point expérimentale												
Campagne d'échantillonnage												
Incubations												
Analyses												
Congrès internationaux												
Rédaction d'articles												
Rédaction du manuscrit												

Encadrement et conditions matérielles pour le doctorant

→ La question scientifique de cette thèse fait actuellement l'objet d'étude d'un stage de M2. Les données préliminaires ont déjà permis i) d'identifier deux sites d'études locaux (plages de l'Argentière et du Pellegrin), ii) de tester la méthode d'estimation du temps de résidence des eaux au moyen des isotopes du Ra et iii) de collecter des échantillons. Les analyses des concentrations en nutriments et une caractérisation biologique (abondance par cytométrie en flux) seront financées par le projet BISQUE (ECCOREV 2021-2022, 10 k€). Un projet EC2CO-HYBIGE a été classé sur liste complémentaire (BRONZETTE PIs : Sanial & Misson, 2023-2025, 50 k€ demandés).

Compétences attendues et personnes à contacter

Compétences attendues :

→ Considérant que la thématique de recherche est à l'interface entre la biologie et la géochimie, le(la) candidat(e) devra démontrer une curiosité scientifique et un goût pour les approches pluridisciplinaires. L'étudiant devra posséder des connaissances en écologie microbienne et en géochimie de l'environnement. Une expérience de terrain ainsi qu'une bonne maîtrise des outils statistiques et de représentation graphique (matlab, R) seront nécessaires.

Personne(s) à contacter :

→ Compte tenu du caractère pluridisciplinaire de ce sujet, cette thèse sera encadrée par deux enseignants chercheurs affiliés à deux équipes différentes du MIO : **Benjamin Misson** (MCF HDR, écologue microbien, **équipe MEB**, misson@univ-tln.fr) et **Virginie Sanial** (MCF, géochimiste de l'environnement marin, **équipe CEM**, virginie.sanial@univ-tln.fr).