

OFFRE DE STAGE M2 (de 3 à 6 mois) + THÈSE DE DOCTORAT financée

Transport et statistique des extrêmes pour l'écologie bactérienne, un système contrôlé: les bactéries magnétotactiques en milieux poreux

Nicolas Waisbord, Jean-François Rupprecht, Marseille (France)

Pitch: Les bactéries magnétotactiques (MTB) se propulsent le long du champ magnétique terrestre. Notre hypothèse est que le champ magnétique module la dispersion au sein des sédiments et, ce faisant, favorise la biodiversité des MTB dans des environnements hétérogènes. Nous formulerons la colonisation microbienne des sédiments dans le cadre de la physique statistique des extrêmes : l'enjeu n'est pas la moyenne mais l'arrivée de la première bactérie qui initie une colonie. L'analyse reliera la statistique de ces événements rares à l'hétérogénéité des pores, des écoulements et des bactéries.

Mots-clés : matière active, transport en milieux poreux, bactéries magnétotactiques, microfluidique, sédiments naturels, temps de premier passage, écologie microbienne, partition de niches.

Contexte : Les bactéries magnétotactiques (MTB) sont des micro-organismes capables de s'orienter le long des lignes du champ magnétique terrestre grâce à des chaînes de nanocristaux magnétiques au sein de leurs membranes. Ces bactéries sont étudiées depuis 60 ans en milieu soluble alors qu'elles vivent pour l'essentiel de manière très localisée, confinées dans les premiers millimètres des sédiments aquatiques. Ce qui a limité l'étude de ces bactéries en conditions réelles, c'est que les sédiments sont des milieux poreux, opaques et denses, difficiles d'accès. Or nous avons récemment développé plusieurs systèmes microfluidiques qui permettent de **simuler** la physique des écoulements dans un sédiment artificiel transparent permettant de suivre les bactéries en microscopie optique. Notre système révèle une physique riche, non-linéaire, avec des phénomènes de piégeage tourbillonnaire, des distributions de temps de passage à queues lourdes, et des régimes de type "diode bactérienne" où le flux peut être complètement bloqué dans certaines conditions – où le champ magnétique appliqué joue le rôle d'un paramètre de contrôle de ces non-linéarités.

Ambition du projet de thèse: Ce travail visera à répondre à une grande question: **quel est l'avantage évolutif de la magnétotaxie?** Des travaux récents suggèrent qu'à l'échelle individuelle, le champ magnétique aide les bactéries à bien naviguer. Nous testerons une hypothèse complémentaire et compétitive, selon laquelle le champ magnétique contrôle également la dispersion des bactéries au sein des sédiments, et accroît donc la biodiversité des MTB dans ces milieux hétérogènes.

Méthode: Nous voyons la question de cinétique **colonisation microbiologique des sédiments comme un problème de physique statistique des extrêmes**. Jusqu'à présent, les approches se focalisent sur les propriétés *moyennes* des poreux. Cependant, dans le contexte d'écologie microbienne, ce qui est critique, c'est la question de la première bactérie, celle qui va permettre de générer une nouvelle colonie. C'est donc ce transport complexe et cette statistique des extrêmes qui vont nous intéresser pour les MTB dans les sédiments. Cette statistique sera fortement corrélée à la statistique d'hétérogénéités des pores et de l'écoulement, mais aussi de la sensibilité des bactéries au champ magnétique.

Projet de recherche du stage M2: Dans ce stage, nous utiliserons notre système microfluidique pour détecter, à l'échelle de la bactérie unique, les premières traversées au travers d'un poreux (étape 1) synthétique et transparent puis (étape 2) issu d'un prélèvement de sédiment, mais opaque. Nous comparerons notre étude à des simulations numériques développées avec le co-encadrant de thèse théoricien, JF. Rupprecht, et du formalisme des temps de premier passage (First Passage Time, FPT). Notre méthodologie repose sur 3 étapes:

- (i) **concevoir** de dispositifs microfluidiques avec géométries contrôlées permettant d'établir des mesures de référence des distributions de FPT en fonction du champ magnétique et des conditions d'écoulement
- (ii) **intégrer** des sédiments réels provenant de sites riches en MTB dans ces dispositifs pour réaliser des mesures directes à travers la structure poreuse naturelle;
- (iii) **modéliser** la statistique détaillée de ces distributions, avec une attention particulière aux queues lourdes et comportements non-ergodiques.

La comparaison entre géométries modèles transparentes (où les trajectoires peuvent être reconstruites) et sédiments réels opaques (où seuls les FPT sont accessibles) permettra d'identifier quelles propriétés structurelles de ces sédiments contrôlent effectivement leur exploration par les MTB.

Compétences développées : Microfluidique, microscopie, traitement d'images et analyse de trajectoires, modélisation stochastique (CTRW, Langevin), manipulation d'échantillons environnementaux.

Compétences souhaitées : Le/la candidat·e idéal·e est un·e physicien·ne qui aime comprendre les mécanismes fondamentaux (ici : le transport en milieu poreux) mais est prêt·e à s'ouvrir progressivement à des questions biologiques et écologiques plus larges, typiquement en cours de M2 Physique (physique statistique, matière molle, matière active) ou Mécanique des fluides, avec un intérêt marqué pour les interfaces avec la biologie/écologie. Goût prononcé pour l'expérimentation (du bricolage à la manipulation fine). Bases en physique statistique et processus stochastiques. Capacités en traitement de données et analyse d'images (Python, Matlab, ou équivalent). Autonomie, curiosité scientifique et ouverture à la physique fondamentale et aux questions d'écologie microbienne.



Environnement Encadrement : **Waisbord Nicolas et Jean-François Rupprecht**, respectivement Maître de conférences AMU et Chercheur CNRS. **Laboratoire** : Laboratoire de Chimie Bactérienne (à proximité du campus de Luminy) et Laboratoire Adhésion et Inflammation, Marseille (campus de Luminy). **Équipements** : Plateforme microfluidique complète, microscopie. **Collaborations** : Écologistes microbiens pour échantillonnage et études de terrain. **Financement thèse** : Thèse financée déjà obtenue (3 ans garantis après le stage).

Calendrier et candidature

- **Durée du stage** : de 3 à 6 mois (dates flexibles, idéalement février-juillet ou mars-août 2026)
- **Gratification** : Selon réglementation en vigueur (~600€/mois)
- **Début de thèse envisagé** : toute date jusqu'à décembre 2026
- **Début de stage envisagé** : toute date dès janvier 2026.

Pour candidater : n'hésitez pas à nous contacter avec vos questions ; merci de nous envoyer un CV, relevés de notes de M1 et M2, lettre de motivation (1 page max expliquant votre intérêt pour ce projet à l'interface physique/biologie/écologie) et contacts de 1-2 références à : nwaisbord@imm.cnrs.fr et jean-francois.RUPPRECHT@univ-amu.fr.

Références:

- Waisbord et al., *Nature Communications* (2021), Fluidic bacterial diodes rectify magnetotactic cell motility in porous environments.
- Petroff et al., *eLife* (2025), Optimal navigation in pore networks
- Codutti et al., *eLife* (2025), Physiological magnetic fields and navigation in simulated sediments.

MASTER INTERNSHIP OFFER (6 months) + FUNDED PhD THESIS

Transport and extreme statistics for bacterial ecology, a controlled system: magnetotactic bacteria in porous media

Supervisors: Nicolas Waisbord & Jean-François Rupprecht, Marseille Luminy (France)

Pitch: Magnetotactic bacteria (MTB) propel themselves along Earth's magnetic field. Our hypothesis is that the magnetic field modulates dispersion within sediments and thereby promotes MTB biodiversity in heterogeneous environments. We will reframe this question of microbial colonization of sediments within the framework of extreme-value statistical physics: the key is not the average but the arrival of the first bacterium that seeds a colony. The analysis will link the statistics of these rare events to the heterogeneity of pores, flows, and bacterial properties.

Keywords: active matter, transport in porous media, magnetotactic bacteria, microfluidics, natural sediments, first-passage time, microbial ecology, niche partitioning.

Context: Magnetotactic bacteria (MTB) are microorganisms capable of orienting themselves along Earth's magnetic field lines thanks to chains of magnetic nanocrystals within their membranes. These bacteria have been studied for 60 years in soluble media, while they essentially live in a highly localized manner, confined to the first millimeters of aquatic sediments. What has limited the study of these bacteria under real conditions is that sediments are porous, opaque, and dense media that are difficult to access. We have developed several microfluidic systems that allow mimicking the physics of flows in artificial sediment under a microscope. Our recent work on MTBs in model porous media reveals rich, non-linear physics, with vortical trapping phenomena, heavy-tailed passage time distributions, and "bacterial diode" regimes where flow can be completely blocked under certain conditions – where the applied magnetic field plays the role of a control parameter for these non-linearities.

PhD project ambition: This work aims to answer a major question in the field: [what is the evolutionary advantage of magnetotaxis in these disordered confined environments?](#) Recent work suggests that at the individual scale, the magnetic field helps bacteria navigate well. In this thesis, we will test a complementary and competitive hypothesis, according to which the magnetic field also controls niche selection within sediments and thus increases MTB biodiversity in these heterogeneous environments.

Method: We propose to model the microbiological [colonization of sediments as a problem of extreme statistical physics](#), where the magnetic field controls the finer scales of niche partitioning. Until now, approaches have focused on averaged properties of porous media. However, in the context of microbial ecology, what is critical is the question of the first bacterium, the one that will generate a new colony. It is therefore this complex transport and extreme statistics that will interest us for MTBs in sediments. This statistic will be strongly correlated with the statistics of pore and flow heterogeneities, but also with bacterial sensitivity to the magnetic field.

M2 internship research project: In this internship, we will focus on transport and seek to quantify and model bacterial flux through, first (step 1) a transparent model porous medium, then (step 2) through a real sediment. We will center our study on first passage time (FPT) statistics. We will compare the sensitivity of FPT statistics to the magnetic field through a real, opaque sediment, and a transparent micromodel where trajectories can be reconstructed to allow us to establish a realistic test model system for porous media from the transport perspective. The methodology is structured around:

- (i) **designing** microfluidic devices with controlled geometries to establish reference measurements of FPT distributions as a function of magnetic field and flow conditions;
- (ii) **integrating** real sediment samples from MTB-rich sites into these devices to perform direct measurements through natural porous structures;

(iii) **modelling** the detailed statistical analysis of these distributions, with particular attention to heavy tails and non-ergodic behaviors.

The comparison between transparent model geometries (where trajectories can be reconstructed) and opaque real sediments (where only FPTs are accessible) will identify which structural properties of these sediments effectively control their exploration by MTBs.

Skills to be developed: Microfluidics, microscopy, image processing and trajectory analysis, stochastic modeling (CTRW, Langevin), environmental sample handling.

Desired skills: The ideal candidate is a physicist who enjoys understanding fundamental mechanisms (here: transport in porous media) but is ready to gradually open up to broader biological and ecological questions. Taste for experimentation (from tinkering to fine manipulation). Solid background in statistical physics and stochastic processes. Capabilities in data processing and image analysis (Python, Matlab, or equivalent). Autonomy, scientific curiosity and open-mindedness: the project will evolve from fundamental transport physics toward broader microbial ecology questions.



Work environment

Supervision: [Waisbord Nicolas](#) and [Jean-François Rupprecht](#), respectively Associate Professor AMU and CNRS Researcher and the Laboratoire de Chimie Bactérienne & Laboratoire Adhésion Inflammation, Marseille, respectively.

Equipment: Complete microfluidic platform (micro-fabrication and microscopy).

Collaborations: Microbial ecologists for sampling and field studies.

PhD funding: PhD thesis already funded (3 years guaranteed after internship). **PhD start:** anytime in 2026.

Internship duration: 6 months (flexible dates, ideally February-July or March-August 2026).

To apply: Informal inquiries are welcome. Please send us a CV, M1 and M2 transcripts, motivation letter (1 page max explaining your interest in this project at the physics/biology/ecology interface) and contacts of 1-2 references to: nwaisbord@imm.cnrs.fr and rupprecht.jf@gmail.com.

References

- Waisbord et al., *Nature Communications* (2021) - Fluidic bacterial diodes rectify magnetotactic cell motility in porous environments
- Petroff et al., *eLife* (2025) - Optimal navigation in pore networks
- Codutti et al., *eLife* (2025) - Physiological magnetic fields and navigation in simulated sediments