

ÉTUDE DE MICRO-AGRÉGATS DE SOLS FORESTIERS PAR MICROSCOPIES PHOTONIQUES

Mots clefs : sols forestiers ; matière organique naturelle ; micro-agrégats ; interfaces organo-minérales ; organisation tri-dimensionnelle ; microscopie confocale de fluorescence ; Génération de seconde harmonique (SHG) ; microscopie d'imagerie en temps de vie de fluorescence (FLIM) ; auto-fluorescence ; granulométrie laser ; fluorescence d'excitation-émission.

CONTEXTE

Les sols sont communément considérés comme des milieux poreux, composés d'êtres vivants, de constituants organiques et minéraux. Ce sont des objets structurés, organisés en agrégats à différentes échelles (e.g. [Rabot et al 2018](#)). Catégorisés selon leur taille, on distingue les micro-agrégats (<250 µm) et les macro-agrégats (> 250 µm) (e.g. [Yudina et al 2023](#)). Le processus d'agrégation au sein d'un sol est fortement influencé par l'activité biologique, par la quantité et la composition de la matière organique mais aussi par la nature, la taille et les propriétés de surface des minéraux ([Le Bissonnais et Arrouays 1997](#)). Différents constituants - biologiques, organiques et inorganiques - facilitent l'agrégation, comme les hyphes fongiques, les polysaccharides, les protéines, les carbonates, les oxy-hydroxydes, ou certains ions multivalents (Ca).

Par leur érosion, les sols alimentent les milieux aquatiques en particules minérales et organiques ainsi qu'en éléments et molécules dissouts. Via ce processus, les sols jouent un rôle crucial sur la qualité des cours d'eau et les cycles biogéochimiques des éléments comme le carbone. L'érosion des sols est directement influencée par leur architecture et leur stabilité structurale ([Barthès et Roose 2002](#), [Hu et al. 2023](#)). La déstabilisation des micro-agrégats libère différentes entités (phases minérales, molécules organiques, matière organique particulaire, nutriments) vers les phases colloïdales et compartiments aquatiques des écosystèmes. À l'échelle microscopique, cette déstabilisation des micro-agrégats est souvent associée à une modification des complexes organo-minéraux et/ou un changement de la conformation macromoléculaire de la matière organique (MO) des sols ([Cincotta et al. 2019](#)).

Les sols forestiers sont souvent plus riches en matière organique que les sols de plaine et les sols agricoles. Il apparaît alors légitime de connecter la stabilité des micro-agrégats dans les sols forestiers avec leur forte teneur en matière organique et les caractéristiques moléculaires de celle-ci. Cependant, les mécanismes par lesquels la matière organique structure les micro-agrégats de sols forestiers sont peu connus.

APPROCHE ET OBJECTIFS GÉNÉRAUX

Au LIEC, nous étudions les facteurs qui impactent la stabilité des micro-agrégats de sols forestiers afin de mieux comprendre les processus qui entraînent leur décomposition et la libération de matière organique. A cette fin, nous souhaitons examiner comment des facteurs externes, tels que la gestion des sols forestiers, et des facteurs internes, comme la composition moléculaire de la matière organique et l'organisation tridimensionnelle de ses composants, influencent ces processus. Afin de relier déstabilisation des agrégats et transfert de matière vers le compartiment aquatique, il est crucial de mettre en évidence, à la micro-échelle de l'agrégat, les interactions entre ses différents constituants organiques et inorganiques.

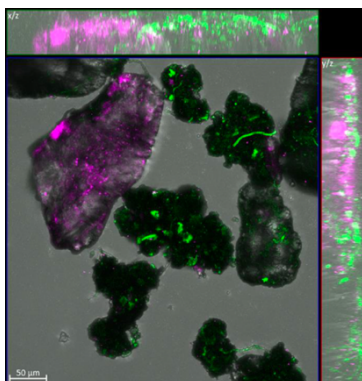


Figure 1 : Auto-fluorescence de micro-agrégats de sol (Excitation 405 nm ; Émission 410 –570 nm ; Vert) et SHG des minéraux silicatés (Excitation 1050 nm; Émission 517 –534; Rose); Objectif 20x.

La microscopie confocale de fluorescence, la microscopie d'imagerie en temps de vie de fluorescence (FLIM) ainsi que la microscopie par génération de seconde harmonique (SHG), couramment employées en biologie cellulaire, ont été jusqu'à maintenant relativement peu utilisées dans le cadre d'étude des agrégats organo-minéraux ([Amelung et al 2024](#)). En exploitant le signal d'auto-fluorescence émis par de nombreuses molécules issues et/ou composant la matière organique naturelle, et en utilisant le signal SHG produit par certains composés minéraux, e.g. quartz (Figure 1), nous souhaitons tester le potentiel de ces techniques de

microscopies photoniques pour analyser la structure 3D de ces assemblages hétérogènes que sont les micro-agrégats de sols forestiers (Lee et al. 2022).

OBJECTIFS DU STAGE ET PLAN D'ÉTUDE

L'objectif principal du stage est de tester le potentiel des microscopies photoniques précitées (microscopie confocale de fluorescence, FLIM et SHG) pour l'étude de l'organisation 3D de micro-agrégats extraits de sols forestiers, préalablement sélectionnés dans le cadre de travaux de thèse actuellement en cours. Les compositions minéralogiques et organiques de ces micro-agrégats seront caractérisées. Les micro-agrégats seront ensuite étudiés par microscopie confocale, SHG et FLIM, avant et après déstabilisation.

1- Étude bibliographique

Afin de s'approprier les techniques ciblées dans l'étude, il sera demandé une synthèse bibliographique portant sur les microscopies de fluorescence (confocale classique et FLIM) et SHG, ainsi que la spectroscopie d'excitation-émission de fluorescence, et leur utilisation pour l'étude d'échantillons de sols.

2 - Microscopies photoniques

Il s'agira de tester la faisabilité et la pertinence d'expérimentations en microscopie confocale de fluorescence, FLIM et SHG pour mettre en évidence les assemblages organo-minéraux qui constituent les micro-agrégats des sols forestiers. La minéralogie de ces sols, principalement constituée de quartz, se prête particulièrement bien à l'utilisation de la microscopie SHG. La technique FLIM, basée sur la cartographie des temps de vie de fluorescence, permettra également de qualifier et/ou hiérarchiser les micro-environnements auto-fluorescents dans ces agrégats.

3 - Caractérisation des micro-agrégats

Parallèlement aux travaux en microscopies photoniques, les micro-agrégats seront caractérisés à la macro-échelle, par évaluation de leur :

- distribution en taille des particules constitutives des micro-agrégats,
- composition minéralogique,
- composition organique.

4 - Expérimentations de déstabilisation

Des expérimentations de déstabilisation des micro-agrégats seront menées afin :

- de suivre l'évolution en taille des différentes populations de particules avant/après déstabilisation,
- de mettre en évidence les modifications correspondantes de l'organisation tridimensionnelle des micro-agrégats par microscopie photonique (fluorescence et SHG),
- de suivre la libération de matière organique dissoute vers le compartiment aquatique par spectroscopie d'excitation-émission de fluorescence.

Ces résultats serviront à différencier les sols forestiers et contribueront à la compréhension des facteurs internes qui contrôlent la stabilité des micro-agrégats. L'étudiant(e), en fin de stage, aura acquis une formation solide en spectroscopie photonique, des connaissances sur des méthodes analytiques géochimiques et physico-chimiques et leur utilisation adaptée pour l'étude des sols.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Amelung, W. et al. (2024). Architecture of soil microaggregates: Advanced methodologies to explore properties and functions. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 187, 17–50. <https://doi.org/10.1002/jpln.202300149>
- Barthès, B. et al. (2002). Aggregate stability as an indicator of soil susceptibility to runoff and erosion; validation at several levels. *Catena* 47, 133–149. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(01\)00180-1](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(01)00180-1)
- Cincotta, M.M. et al. (2019). Soil aggregates as a source of dissolved organic carbon: an experimental study on the effect of solution chemistry on water extractable carbon. *Frontiers in Environmental Science*, vol 7, art 172. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2019.00172>
- Hu, W. et al. (2023). Soil structural vulnerability: Critical review and conceptual development. *Geoderma*, 430, 116346. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116346>
- Le Bissonnais, Y. et al. (1997). Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: II. Application to humic loamy soils with various organic carbon contents. *Eur. J. Soil Sci.* 48, 39–48. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1997.tb00183.x>
- Lee, J. et al. (2022). Label-Free Multiphoton Imaging of Microbes in Root, Mineral, and Soil Matrices with Time-Gated Coherent Raman and Fluorescence Lifetime Imaging. *Environ. Sci. Technol.* 2022, 56, 1994–2008. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c05818>

Rabot, E. et al. (2018). Soil structure as an indicator of soil functions: A review. *Geoderma* 314, 122–137. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.11.009>

Yudina, A.V. et al. (2023). Dual nature of soil structure: The unity of aggregates and pores. *Geoderma*, 434, 116478. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116478>

COMPÉTENCES ATTENDUES ET MODALITÉS DE CANDIDATURE

Profil souhaité du candidat / Compétences attendues : titulaire d'un master 1, vous avez des bases de mesures physiques et/ou physico-chimiques, ainsi que des connaissances sur les interactions rayonnement/matière et la fluorescence. Vous avez des qualifications et de l'appétence pour la recherche scientifique, l'acquisition de nouvelles connaissances et pour les traitements de données et d'images. Vous savez faire une synthèse bibliographique, communiquer à l'oral et structurer vos idées par écrit. Vous êtes rigoureux.se, organisé.e, capable de vous intégrer dans une dynamique collective.

Nous vous invitons à adresser une lettre de motivation, votre CV, votre relevé de notes de M1 ainsi que les coordonnées de personnes référentes à J. Duval (jerome.duval@univ-lorraine.fr), E. Montargès-Pelletier (emmanuelle.montarges@univ-lorraine.fr) et G. Grosjean (guillaume.grosjean@univ-lorraine.fr).

Date de clôture des candidatures : 14 Novembre 2025

CONDITIONS DE DÉROULEMENT DU STAGE

Date de début du stage : à partir de mi-janvier 2026, durée de 6 mois.

Équipe d'encadrement :

- Jérôme Duval (DR, CNRS) : jerome.duval@univ-lorraine.fr
- Guillaume Grosjean (IE, CNRS) : guillaume.grosjean@univ-lorraine.fr
- Emmanuelle Montargès-Pelletier (DR, CNRS) : emmanuelle.montarges@univ-lorraine.fr

Le stage étant associé à une thèse de doctorat en cours, vous serez amené à interagir avec le doctorant, Jean-Baptiste Colon, et son encadrante principale Anne Poszwa (Professeure des universités). Vous serez également amené à interagir avec des collègues en appui à la recherche scientifique (pour des analyses ou expérimentations secondaires), et à participer aux réunions d'équipe et aux événements scientifiques organisés par le laboratoire, comme la journée des doctorants.

Présentation du laboratoire d'accueil :

Le LIEC (Laboratoire Interdisciplinaire des Environnements Continentaux) est une Unité Mixte de Recherche (UMR) Université de Lorraine – CNRS répartie sur trois sites (Campus Bridoux à Metz, site de la Faculté des Sciences et Techniques et site du Charmois à Vandœuvre-lès-Nancy). Il regroupe une part importante des forces lorraines en sciences de l'environnement et s'organise en cinq équipes de recherche et quatre pôles de compétences ([Accueil | LIEC](#)). Vous travaillerez principalement au sein de la plateforme de microscopie DIESE -Dispositifs d'Imagerie pour l'Étude des Systèmes Environnementaux ([DIESE | LIEC](#)) - sur le site du Charmois à Vandœuvre et serez cointégré dans deux de nos équipes de recherche : PhySI et CYBLES.

- L'équipe PhySI est spécialisée dans l'étude des propriétés physico-chimiques des colloïdes naturels et de leurs interactions avec l'environnement, à travers des approches expérimentales et théoriques multi-échelles. Les recherches portent notamment sur la dynamique des particules et des interfaces biologiques, la spéciation et la biodisponibilité des contaminants, ainsi que sur le développement de méthodes de modélisation et d'analyse de données appliquées aux enjeux environnementaux et de santé ([Physico-chimie et réactivité des Surfaces et Interfaces - PhySI | LIEC](#)).
- L'équipe CYBLE est spécialisée sur le fonctionnement des écosystèmes continentaux perturbés par les activités humaines. Les thématiques de recherches portent sur la dynamique des contaminants et des nutriments, leurs effets sur les organismes, ainsi que les trajectoires de résilience des milieux. Les travaux combinent observations de terrain sur sites ateliers et expérimentations en conditions contrôlées, et s'articulent autour de trois axes : trajectoires des écosystèmes, transferts et processus, évolution physico-chimique des contaminants ([CYcles Biogéochimiques dans Les EcosystèmeS perturbés - CYBLES | LIEC](#)).