

UMR ECOSYS

Effet de la texture du sol sur l'organisation spatiale de la porosité et des matières organiques par segmentation IA d'images 3D

Contexte

La structure du sol, qui peut être définie comme l'organisation spatiale de la phase minérale, de la porosité et des matières organiques du sol (MOS), est une propriété fondamentale qui régule l'ensemble des phénomènes liés à la circulation et au stockage d'eau et de nutriments, la circulation des gaz et des organismes du sol (Bronick et Lal, 2005). Parmi les fonctions liées à la structure du sol, le stockage de carbone est au cœur des enjeux agronomiques et climatiques car il impacte positivement la fertilité, la rétention en eau et en nutriments, l'activité biologique et la stabilité structurale (Pellerin et al., 2019).

La morphologie du réseau poral et la répartition des MOS dépendent de la texture du sol (Balesdent et al., 1999 ; Gobat et al., 2011). Une texture fine (sol argileux) favorise la rétention du carbone par les mécanismes de protection physique et chimique dans les agrégats, tandis qu'un sol de texture grossière (sol sableux) présente habituellement un réseau poral de grande taille et connecté qui favorise le drainage de l'eau, mais dans lequel l'agrégation est plus faible.

La répartition des MOS n'est pas homogène dans le sol. En fonction de la proportion d'argiles, de limons et de sables, la quantité ainsi que la distribution spatiale des MOS dans les agrégats ne seront pas les mêmes, entraînant des capacités de stockage et de protection différentes d'une texture à une autre. L'hétérogénéité de la protection des MOS dans des sols de différentes textures est encore méconnue. En fonction de leur localisation dans les agrégats et de leur connectivité à des pores de différentes tailles, elles vont être plus ou moins vulnérables à la décomposition.

Les techniques d'imageries 3D, telle que la tomographie à rayons X (RX) permettent de visualiser, de façon non-invasive, l'organisation spatiale des constituants d'un sol en 3D sur la base de leurs densités relatives, notamment la porosité et les MOS (Kravchenko et al., 2015). Cette technique permet de caractériser la vulnérabilité des différentes MOS à la décomposition à travers leur degré de connexion à la porosité.

L'interprétation des images tomographiques en sciences du sol est complexe, car le sol est un milieu hétérogène et composé d'un mélange d'éléments très fins et peu contrastés entre eux. Les MOS, en particulier, ont une densité intermédiaire entre celle de la matrice solide et celle de la porosité, et cette densité varie en fonction de leur nature (graine, racine, feuille...) ainsi que de leur niveau de décomposition.

Pour ce faire, l'intelligence artificielle (IA) est de plus en plus utilisée pour segmenter et caractériser cette phase complexe (Leuther et al, 2022 ; Wu et al., 2025). Celle-ci permet notamment une meilleure segmentation de zones hétérogènes (interface solide-MOS ou porosité-MOS) grâce à un apprentissage automatique. L'IA pourrait être particulièrement utile pour développer un modèle de segmentation

utilisable sur plusieurs textures, en apprenant les variabilités de structure issues de différentes textures. Il s'agit d'une méthodologie nouvelle, et peu d'études comparent les avantages et limites des différents outils disponibles (Wadoux, 2025).

Objectifs du stage et travail attendu

Ce stage a pour objectif d'évaluer, par des techniques d'imageries 3D, l'effet de la texture du sol sur l'abondance des POM et leur vulnérabilité à la décomposition, estimée par leur connectivité au réseau poral. Un objectif méthodologique est de comparer différentes méthodes de segmentation basées sur l'IA pour estimer leurs potentialités.

Plus précisément, l'étude se focalisera sur 3 textures de sol différentes (argileuse, limoneuse, sableuse) issus de sites expérimentaux longue durée et sous agriculture conventionnelle depuis plus de 20 ans. Il s'agira d'exploiter des données de tomographie à rayon X de colonnes de sol de 2,5 cm de hauteur et de 3 cm de diamètre (de 22 et 7 μm). Vous testerez des méthodes de segmentation d'images 3D basées sur l'intelligence artificielle comme le Machine Learning et le Deep Learning. Vous effectuerez des comparaisons avec des méthodes classiques de segmentation élaborées dans le laboratoire ECOSYS.

Un travail d'interprétation des images 3D et des liens avec la littérature sont attendus. Il s'agira notamment de faire des liens MOS-porosité et d'évaluer leur pertinence comme indicateur de la vulnérabilité des matières organiques dans les sols.

Compétences recherchées

Formation : Master 2 ou École d'ingénieurs en science du sol, science de l'environnement, hydrologie ou sciences des matériaux

Intérêt pour l'analyse d'images 3D ainsi que pour l'IA. Des connaissances en code (Fiji, Python ou autres) seraient un plus mais non obligatoires.

Modalités d'accueil et de candidature

Laboratoire d'accueil : UMR ECOSYS, équipe Sol&Tox - INRAE, AgroParisTech, Université Paris-Saclay - 22 place de l'Agronomie - 91 120 Palaiseau

Indemnité : ~ 570 € / mois

Responsables du stage : Paul Legain (paul.legain@inrae.fr) et Clémentine Chirol (clementine.chirol@inrae.fr)

Modalités de candidature :

Envoyer un CV et une lettre de motivation à Paul Legain (paul.legain@inrae.fr) avant le 15 décembre.

Références bibliographiques :

Bronick, C.J., Lal, R. 2005. Soil structure and management : a review. Geoderma 124, 3-22.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.03.005>

Gobat, J-M., Aragno, M., Matthey, W. 2010. Le sol vivant – Bases de pédologie – Biologie des sols. Pu Polytechnique, 3^{ème} édition, 848 p.

Wadoux, A. 2025. Artificial intelligence in soil science. European Journal of Soil Science. 1-22. <https://doi.org/10.1111/ejss.70080>

Wu, M., Phalempin, M., Reitz, T., Blagodatskaya, E., Schlüter, S. 2025. Links between soil microstructure dynamics and carbon cycling in response to land use and climate change. Soil Biology and Biochemistry 211, 109982. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2025.109982>

Leuther, F., Wolff, M., Kaiser, K., Schumann, L., Merbach, I., Mikutta, R., Schlüter, S. 2022. Response of subsoil organic matter contents and physical properties to long-term, high-rate farmyard manure application. European Journal of Soil Science, 73. <https://doi.org/10.1111/ejss.13233>

Kravchenko, A.N., Negassa, W.C., Guber, A.K., Rivers, M.L. 2015. Protection of soil carbon within macro-aggregates depends on intra-aggregate pore characteristics. Scientific Reports, 5. <https://www.nature.com/articles/srep16261>

Balesdent, J., Chenu, C., Balabane, M. 2000. Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage. Soil and Tillage Research, 53, 215-230. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(99\)00107-5](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(99)00107-5)

Pellerin S. et al. 2019. *Stocker du carbone dans les sols français, Quel potentiel au regard de l'objectif 4 pour 1000 et à quel coût ?* Synthèse du rapport d'étude, INRA (France), 114 p.