

# Avis de Soutenance

## Monsieur Walid OKAYBI

Sciences de l'Univers

Soutiendra publiquement ses travaux de thèse intitulés

Colmatage colloïdal dans les milieux poreux : une étude microfluidique des dynamiques, des mécanismes et du contrôle.

Travaux dirigés par Monsieur Cyprien SOULAINÉ et Madame Sophie ROMAN

Ecole doctorale : Energie, Matériaux, Sciences de la Terre et de l'Univers - EMSTU

Unité de recherche : ISTO - Institut des Sciences de la Terre d'Orléans

### Soutenance prévue le jeudi 09 juillet 2026 à 14h00

Lieu : Observatoire des Sciences de l'Univers en région Centre, Campus Géosciences 1A rue de la Férollerie,  
45071 Orléans cedex 2

Salle : E018

#### Composition du jury proposé

M. Cyprien SOULAINÉ	Chargé de recherche	CNRS-ISTO	Directeur de thèse
M. Hugues BODIGUEL	Professeur des universités	Grenoble INP	Rapporteur
M. Manouk ABKARIAN	Directeur de recherche	CNRS - Centre de Biologie Structurale in Montpellier	Rapporteur
M. Lionel MERCURY	Professeur des universités	Université d'Orléans	Examinateur
M. Alban SAURET	Associate Professor	University of Maryland Baltimore	Examinateur
Mme Eleonora SECCHI	Chargée de recherche	ETH Zurich	Examinatrice
Mme Masa PRODANOVIC	Professeure des universités	The University of Texas at Austin	Examinatrice

**Mots-clés :** milieux poreux, microfluidique, dendrites, colmatage des pores, écoulement oscillatoire, perméabilité

#### Résumé :

Le transport colloïdal dans les milieux poreux joue un rôle central dans les systèmes souterrains, notamment pour les ressources en eau souterraine, l'énergie géothermique et le stockage souterrain d'énergie thermique. Les particules en suspension peuvent provenir de la formation poreuse ou être introduites par les fluides injectés. Leur transport et leur rétention dans l'espace poreux peuvent entraîner un colmatage, réduisant ainsi la perméabilité et l'injectivité. Dans les applications par injection, ces processus peuvent être accentués par les différences physico-chimiques et hydrodynamiques entre les conditions initiales et celles du milieu injecté. Cependant, les mécanismes de colmatage à l'échelle des pores restent mal compris dans les milieux poreux hétérogènes représentatifs des systèmes naturels, en raison de leur opacité qui limite l'observation directe des processus clés. Pour pallier cette limitation, ce travail combine des expériences microfluidiques en milieux poreux hétérogènes avec l'analyse d'images et des simulations d'écoulement à l'échelle des pores afin d'étudier et d'identifier les mécanismes régissant le dépôt de particules, le colmatage, la modification de l'écoulement et l'évolution de la perméabilité selon différents régimes de dépôt et sous diverses conditions physico-chimiques et hydrodynamiques. Les résultats montrent que le colmatage est un processus dépendant du régime et régi par des mécanismes distincts. En conditions adhésives, une nouvelle forme de colmatage progressif a été identifiée : des structures dendritiques se développent à partir d'un site de dépôt préférentiel unique et obstruent progressivement l'espace poreux. Ce mécanisme est contrôlé par les conditions d'écoulement locales, notamment par la taille des zones de stagnation par rapport au diamètre des particules. En conditions répulsives, le colmatage est principalement dû à la formation de ponts hydrodynamiques, où les particules forment des arches stables au niveau des rétrécissements des pores, entraînant une réduction progressive de la perméabilité, principalement contrôlée par la taille et la concentration des particules. L'écoulement oscillatoire n'atténue pas

systématiquement le colmatage, mais induit une réponse dépendante du régime : il peut le retarder en conditions d'agrégation dominante, mais l'accélérer aux hautes fréquences en régime hydrodynamique. Globalement, ce travail apporte un nouvel éclairage sur les mécanismes contrôlant le colmatage colloïdal et souligne la nécessité d'une approche adaptée au régime pour prédire et gérer la réduction de la perméabilité dans les systèmes souterrains réalistes.

### **Summary:**

Colloidal transport in porous media plays a central role in subsurface systems, including groundwater resources, geothermal energy, and underground thermal energy storage. Suspended particles may originate from the porous formation or be introduced with injected fluids. Their transport and retention within the pore space can lead to clogging, thereby reducing permeability and injectivity. In injection-based applications, these processes may be further enhanced by physicochemical and hydrodynamic differences between injected and native conditions. However, pore-scale clogging mechanisms remain poorly understood in heterogeneous porous media representative of natural systems due to their opacity, which limits direct observation of key processes. To address this limitation, this work combines microfluidic experiments in heterogeneous porous media with image analysis and pore-scale flow simulations to investigate and identify the mechanisms governing particle deposition, clogging, flow alteration, and permeability evolution across distinct deposition regimes and under varying physicochemical and hydrodynamic conditions. The results show that clogging is a regime-dependent process governed by distinct mechanisms. Under adhesive conditions, a novel form of progressive clogging is identified, in which dendritic structures grow from a single preferential deposition site and progressively block the pore space. This mechanism is controlled by local flow conditions, particularly the size of stagnation regions relative to particle diameter. Under repulsive conditions, clogging is dominated by hydrodynamic bridging, where particles form stable arches at pore constrictions, leading to stepwise permeability reduction controlled mainly by particle size and concentration. Oscillatory flow does not systematically mitigate clogging, but instead produces a regime-dependent response: it can delay clogging in aggregation-dominated conditions, yet accelerate it at higher frequencies in hydrodynamic regimes. Overall, this work provides new insight into the mechanisms controlling colloidal clogging and highlights the need for a regime-dependent approach to predict and manage permeability reduction in realistic subsurface systems.