

## PROPOSITION DE SUJET DE THÈSE

### Analyse des sauts d'échelles géophysiques pour la caractérisation des structures de la zone non saturée

---

- **Cadre**

Directeur de thèse :

- Mohamed Azaroual (ISTO-BRGM)

Encadrement :

- Céline Mallet (ISTO)
- Joshua Pwavodi, Nicolas Devau et Jacques Deparis (BRGM)

Cadre de la thèse :

- ED Energie Matériaux Sciences de la Terre et de l'Univer
- Co-financement BRGM-ED
- Lieu d'exercice principal : ISTO

- **Résumé du sujet**

L'étude des écoulements d'eau dans le sous-sol se heurte à la difficulté de décrire la distribution des hétérogénéités qui les contrôlent (e.g., pores, cavités, fissures). Un des verrous scientifiques majeurs concerne le saut d'échelle entre les mesures contrôlées du laboratoire et les mesures de terrain plus intégratrice. Ces deux échelles ne sont pas toujours directement reliables avec les paramètres géophysiques mesurés, en particulier dans le cas des roches carbonatés qui présentent des hétérogénéités importantes pouvant présenter plusieurs dimensions. En outre, l'influence de la fracturation et des cavités est difficilement quantifiable à petite échelle. Dans ce travail de thèse, nous proposons de développer une approche intégrée d'imagerie du sous-sol, échelles par échelles sur des données déjà acquise sur plateforme [O-ZNS](#). L'utilisation de cet observatoire nous permet d'étudier l'échelle centimétrique en laboratoire, l'échelle décimétrique des diagraphies de forages, et l'échelle métrique des investigations de surface. Nous chercherons à croiser des données existantes à ces différentes échelles pour en extraire (1) une définition des Volume(s) Elémentaire(s) Représentatif(s) (VER), (2) des modèles permettant de regrouper ces différents niveaux de résolution et (3) des relations croisant structures et chemin d'écoulement.

Ainsi, le travail de thèse proposé commencera par croiser les données géophysiques existantes à différentes échelles pour identifier les Volumes Elémentaires Représentatifs (VER) des différentes mesures. Le VER est le plus petit volume sur lequel une mesure peut être effectuée qui donnera une valeur représentative de l'ensemble en fonction de la physique. Il s'agira ensuite de comprendre leur lien en termes de structures d'hétérogénéité à l'intérieur de la zone étudiée (i.e., de la surface centimétrique dans les mesures de laboratoire à l'investigation cubique pour les mesures de terrain). Et enfin, de discuter de la possibilité, en fonction de la mise à l'échelle des faciès et de l'extrapolation, de développer des théories sur la mise à l'échelle des mesures géophysiques en terme de longueur d'onde (i.e. pour les méthodes propagatives) et de volume de diffusion (i.e. pour les méthodes de diffusion). Pour ce faire, nous travaillerons sur quatre paramètres : i) l'imagerie des structures par des méthodes photogrammétriques et microtomographiques, ii) l'acoustique à l'échelle du laboratoire jusqu'aux vitesses d'ondes sismiques mesurées sur le terrain, iii) la polarisation spectrale induite (SIP) jusqu'à la mesure de résistivité complexe, et iv) enfin la réflectométrie dans le domaine fréquentiel jusqu'à la permittivité diélectrique mesurée par radar à pénétration de sol. L'utilisation de ces méthodes combinées, qui ont des résolutions différentes et des sensibilités différentes aux caractéristiques pétrophysiques, mécaniques et hydrogéologiques des roches, permet d'imager les corps géologiques à différentes échelles. Ces méthodes seront envisagées sur des données du site [O-ZNS](#) incluant des échantillons centimétriques (Mallet et al., 2022a ; Yacouba et al., en cours de révision), des blocs décimétriques à

métriques (projet EC2CO de C .Mallet), des mesures en forage (analyses de carottes et diagraphies, Abbas et al., 2022), des mesures sur site (Mallet et al., 2022b). La fusion des données de ces méthodes et les intersections d'échelles permettront de mieux imager l'environnement en terme de géométrie et de propriétés pétrophysiques permettant une meilleure compréhension des questions ciblées (i.e., répartition des fluides et leur circulation dans la zone vadose). Pour améliorer l'efficacité de la mise à l'échelle, cette thèse explorera l'application de l'intelligence artificielle et des méthodes d'apprentissage profond, y compris les réseaux neuronaux convolutifs (CNN), les réseaux neuronaux artificiels (ANN), les réseaux de croyance profonde et d'autres algorithmes d'apprentissage automatique. Une approche de type deep-learning peut être envisagée.

En résumé, le travail de thèse cherchera à répondre à la question principale : « Comment améliorer l'imagerie de la répartition de l'eau, de sa circulation et des processus de transfert dans les environnements carbonatés fracturés en utilisant des méthodes géophysiques indirectes ? »

En considérant les questions scientifiques sous-jacentes suivantes :

- Le couplage de trois paramètres géophysiques permet-il d'améliorer l'imagerie non destructive des calcaires hétérogènes ?
- Quel est l'apport des perturbations fréquentielles et comment intégrer le changement d'échelle dans la caractérisation géophysique du milieu ?
- Le développement d'un modèle pétrophysique raffiné peut-il fournir une interprétation détaillée des mesures de terrain géophysiques, en relevant les défis des variations d'échelle et de leur encastrement ?
- Quel est l'apport de cette méthodologie croisée pour améliorer la compréhension des transferts dans la zone vadose en termes d'hydrogéologie ?

- **Mots clé**

Pétrophysique, diagraphie, géophysique, imagerie de structure, teneur en eau, carbonates.

- **Candidature**

Les candidatures (CV + lettre de motivation) sont à envoyer à l'ensemble de l'équipe encadrante (emails ci-dessous) au plus tard pour le 04/04/2025 pour un premier entretien autour des semaines du 14 ou 21 avril selon les plannings de l'ED (deuxième entretien avec l'ED prévu mi-mai). Des lettres de recommandation ainsi que des relevés de notes seront un plus pour candidater.

La candidature sera également à déposer sur le site web d'[adum](https://adum.brgm.fr) en cas de sélection aux entretiens.

Un profil d'ingénieur ou d'étudiant en master 2 avec une solide formation en géophysique et/ou géotechnique est recherché ainsi qu'un fort intérêt pour l'expérimentation en laboratoire, les simulations et la programmation (Python).

- **Contacts**

- Mohamed Azaroual : [m.azaroual@brgm.fr](mailto:m.azaroual@brgm.fr)

- Céline Mallet : [celine.mallet@univ-orleans.fr](mailto:celine.mallet@univ-orleans.fr)

- Joshua Pwavodi : [j.pwavodi@brgm.fr](mailto:j.pwavodi@brgm.fr)

- Jacques Deparis : [j.deparis@brgm.fr](mailto:j.deparis@brgm.fr)

- Nicolas Devau : [n.devau@brgm.fr](mailto:n.devau@brgm.fr)