

# PROPOSITION D'UN PROJET DE THÈSE

## A L'ÉCOLE DOCTORALE

### « Écologie, Géosciences, Agronomie, ALimentation »

#### INFORMATIONS GÉNÉRALES

<b>Titre de la thèse :</b> Piégeages structural et capillaire du CO <sub>2</sub> dans les réservoirs fracturés
<b>Acronyme :</b> CO2stockRes
<b>Champ disciplinaire 1 :</b> Géosciences <b>Champ disciplinaire 2 :</b> Choisissez un élément.
<b>Trois mots-clés :</b> Séquestration souterraine du CO <sub>2</sub> , piégeages structurel et capillaire, milieux fracturés
<b>Unité d'accueil :</b> Géosciences Rennes
<b>Nom, prénom du directeur de thèse (HDR indispensable):</b> Méheust Yves <b>Adresse mail :</b> yves.meheust@univ-rennes1.fr <b>Nom, prénom du co-directeur (le cas échéant) (HDR indispensable):</b> Neuweiler Insa, Institute of Fluid Mechanics and Environmental Physics in Civil Engineering, Univ. Hannover, Hanovre (Allemagne) <b>Adresse mail :</b> neuweiler@hydromech.uni-hannover.de <b>Nom, prénom du co-encadrant de thèse 1 (le cas échéant) :</b> <b>Adresse mail :</b>
<b>Financement (origine et montant) :</b> Contrat Doctoral Univ. Rennes 1 (politique d'établissement)
<b>Contact(s) (adresse postale) :</b> Directeur de thèse : Yves Méheust ( <a href="mailto:yves.meheust@univ-rennes1.fr">yves.meheust@univ-rennes1.fr</a> ) / 0223236251 /Géosciences Rennes, Université de Rennes 1, Campus Beaulieu, bât. 14B, 35042 Rennes)
<b>Mode de recrutement</b> Le mode de recrutement du doctorant dépend de la nature du financement du projet de thèse. Pour identifier le mode de recrutement, veuillez consulter le site web de l'ED EGAAL - <a href="#">cliquez ici</a> . Le projet de thèse <b>ne sera pas</b> publié si cette information est manquante. <input checked="" type="checkbox"/> <b>Concours</b> <input type="checkbox"/> <b>Entretien</b> <input type="checkbox"/> <b>Autre (précisez) :</b>

**Toutes les rubriques de ce document doivent être remplies.**

**Une fois complété, merci d'enregistrer ce document au format pdf avec le nom suivant :**

**Nom du Directeur thèse\_Unité\_Acronyme du sujet\_FR.pdf**

## DESCRIPTION SCIENTIFIQUE DU PROJET DE THÈSE

### Contexte socio-économique et scientifique : (10 lignes)

Le réchauffement de l'atmosphère par effet de serre depuis 150 ans est dû aux deux tiers au Dioxyde de Carbone (CO<sub>2</sub>). Pour limiter le réchauffement on peut capturer le CO<sub>2</sub> généré par les installations industrielles et l'injecter dans des aquifères profonds (profondeur > 800 m), où il est supercritique, donc moins dense que la saumure résidente. Après injection, il remonte par flottabilité jusque sous la roche-toit, puis s'étale horizontalement sous elle (piégeage dit *structural*). Pendant ce déplacement, il déplace la saumure résidente, ce qui donne lieu une instabilité des interfaces liquide-gaz et ainsi à un piégeage (dit *résiduel*) du CO<sub>2</sub>. Très peu de travaux ont abordé des configurations d'aquifères ou réservoirs fracturés. L'estimation (i) des circonstances dans lesquelles une telle procédure peut maintenir le CO<sub>2</sub> piégé sur au moins un millénaire, (ii) de l'importance relative des différents mécanismes de piégeage, (iii) de la quantité de CO<sub>2</sub> qui peut être ainsi stockée, et (iv) de la durée de l'opération de stockage, reste un défi.

### Hypothèses et questions scientifiques (8 lignes)

Les variations spatiales de topographie des parois des fractures géologiques, conjuguées à l'instabilité physique des interfaces fluide-fluide, conduisent à une grande richesse dans les distributions spatiales des phases fluides. Cela impacte à la fois la saturation en CO<sub>2</sub>, liée à la quantité de fluides résidents non déplacés, et la quantité de CO<sub>2</sub> qui est détachée de la phase CO<sub>2</sub> injectée et participe ainsi au piégeage résiduel. Les questions scientifiques posées sont les suivantes. Quels sont les régimes d'écoulement dans les fractures, selon le débit d'injection, l'orientation de la fracture, et les viscosités/densités relatives des fluides injecté et résident ? Comment ces régimes impactent-ils la quantité de CO<sub>2</sub> participant aux piégeages structurel et résiduel à l'échelle de la formation ? Quelle est l'échelle de temps de ces modes de piégeage, et de quels paramètres dépend-elle ?

### Principales étapes de la thèse et démarche (10-12 lignes)

*Première année* : Nous développerons un nouveau dispositif d'écoulement en fracture géologique, et nous visualiserons optiquement et caractériserons la distribution spatiale des phases pour les différentes valeurs de l'espace des paramètres.

*Deuxième année* : L'analyse de ces distributions spatiales de phases permettra de caractériser les régimes d'écoulement en fonction des différents paramètres. Les résultats expérimentaux seront comparés à des résultats numériques obtenus dans le cadre du doctorat lancé en parallèle à l'Univ. de Hanovre, et serviront à valider ces derniers.

*Troisième année* : L'ensemble des résultats (expérimentaux et numériques) à l'échelle de la fracture seront « upscalés » à l'échelle de la formation géologique à l'aide d'une simulation numérique de grande échelle, développée en collaboration entre les deux groupes (avec l'appui d'un(e) postdoc).

### Approches méthodologiques et techniques envisagées (4-6 lignes)

La thèse sera essentiellement expérimentale, et mettra an œuvre le développement d'un nouveau dispositif expérimental en laboratoire. La cellule d'écoulement reproduira la géométrie d'une fracture géologique. Les parois rugueuses seront soit usinées soit imprimées en 3D. L'écoulement sera contrôlé en débit par une pompe (pour le liquide) ou par un contrôleur de pression (pour le gaz). Des capteurs de pression différentiels permettront de mesurer la perte de charge à travers le milieu. Une caméra optique de grande résolution et de fréquence d'acquisition 100 Hz permettra d'imager la distribution spatiale des phases.

### Compétences scientifiques et techniques requises pour le candidat

Les candidats devront avoir un master en sciences de la terre, sciences de l'eau, sciences de l'ingénieur, ou physique. Une bonne connaissance de la mécanique des fluides est requise. Des compétences expérimentales relatives aux expériences d'écoulements en laboratoire seront appréciées. Une bonne culture de et un intérêt pour les milieux souterrains naturels sera un atout. Nous recherchons des candidats curieux et fortement motivés, autonomes et désireux d'évoluer dans un environnement interdisciplinaire.

## ENCADREMENT DE LA THÈSE<sup>1</sup>

<b>Nom de l'unité d'accueil :</b> Géosciences Rennes	<b>Nom de l'équipe d'accueil :</b> DIMENV
<b>Nom du directeur de l'unité :</b> Olivier Dauteuil	<b>Nom du responsable de l'équipe :</b> Yves Méheust
<b>Coordonnées du directeur de l'unité :</b> olivier.dauteuil@univ-rennes1.fr	<b>Coordonnées du responsable de l'équipe :</b> yves.meheust@univ-rennes1.fr
<p><b>Directeur de thèse</b></p> <p>Nom, prénom : Méheust Yves</p> <p>Fonction : Maître de Conférence Hors Classe</p> <p>Date d'obtention de l'HDR : 2016</p> <p>Employeur : Université de Rennes 1</p> <p>École doctorale : EGAAL</p> <p>Taux d'encadrement doctoral dans le présent sujet (%) : 60</p> <p>Taux d'encadrement doctoral en cours (directions et co-directions) (%) : 50</p> <p>Nombre de directions/co-directions de thèse en cours : 1</p>	
<p><b>Co-directeur (le cas échéant)</b></p> <p>Nom, prénom : Neuweiler Insa</p> <p>Fonction : Professeur à l'institut de Mécanique de Fluides de l'Université d'Hannovre (Allemagne)</p> <p>Date d'obtention de l'HDR : 2007</p> <p>Employeur : Université d'Hannovre</p> <p>École doctorale de rattachement : <i>Non-applicable</i></p> <p>Taux d'encadrement doctoral dans le présent projet (%) : 40</p> <p>Taux d'encadrement doctoral en cours (directions/co-directions/co-encadrements) (%) : 200</p> <p>Nombre de directions/co-directions/co-encadrements de thèse en cours : 4</p>	
<p><b>Devenir des anciens doctorants du directeur et co-directeur(s)/co-encadrant(s) de thèse (depuis 5 ans)</b></p> <p><i>Compléter les informations suivantes pour <u>chaque</u> ancien doctorant</i></p> <p>Nom, prénom : Turuban, Régis</p> <p>Date de début et de fin de thèse : 2012-2017</p>	

<sup>1</sup> Dans l'ED EGAAL, si 1 scientifique dans la direction de la thèse = 100% d'encadrement doctoral ; si 2 personnes impliquées dans la direction de la thèse = entre 50% et 70% d'encadrement doctoral pour l'HDR directeur ; si 3 personnes impliquées dans l'encadrement de la thèse : répartition :40% - 30% - 30% de l'encadrement doctoral.

Direction de thèse : Yves Méheust (directeur) et Tanguy Le Borgne (co-directeur)

Emploi actuel, lieu : Postdoc, SISSA Trieste (Italie)

Contrat (post-doc, CDD, CDI) : Postdoc (CDD)

Liste des publications issues de ce travail de thèse :

1. P. de Anna, J. Jimenez-Martinez, H. Tabuteau, R. Turuban, T. Le Borgne, M. Derrien & Y. Méheust (2014), Mixing and reaction kinetics in porous media: an experimental pore scale quantification, *Environ. Sci. Tech.* **48**, 508-516.
2. J. Jimenez-Martinez, P. de Anna, H. Tabuteau, R. Turuban, T. Le Borgne, & Y. Méheust (2015), Pore-scale mechanisms for the enhancement of mixing in unsaturated porous media and implications for chemical reactions, *Geophys. Res. Lett.* **42**(13), 5316-5324.
3. R. Turuban, D. R. Lester, T. Le Borgne & Y. Méheust (2018), Space-Group Symmetries Generate Chaotic Fluid Advection in Crystalline Granular Media, *Phys. Rev. Lett.* **120**, 024501.
4. R. Turuban, D. R. Lester, H. Heyman, T. Le Borgne & Y. Méheust (2019), Chaotic Mixing in Crystalline Granular Media, *J. Fluid Mech.* **871**, 562-594.
5. J. Heyman, D. R. Lester, R. Turuban, Y. Méheust, & T. Le Borgne (2020), Stretching and folding sustain microscale chemical gradients in porous media., *Proc. Nat. Acad. Sci.* **117** (24), 13359-13365.

Nom, prénom : Hubert, Antoine

Date de début et de fin de thèse : 2016-2020

Direction de thèse : Tanguy Le Borgne (directeur) et Yves Méheust (co-directeur)

Emploi actuel, lieu : Ingénieur en recherche et développement

Contrat (post-doc, CDD, CDI) : CDI

Liste des publications issues de ce travail de thèse :

1. A. Hubert, T. Aquino, H. Tabuteau, Y. Méheust & T. Le Borgne & (2020), Enhanced and non-monotonic effective kinetics of solute pulses under Michaelis–Menten reactions, *Adv. Water Resour.* **146**, 103739.
2. A. Hubert, J. Jimenez-Martinez, H. Tabuteau, J. Heyman, T. Le Borgne & Y. Méheust (2020), Micro-model experiments of solute transport, mixing and reactions in subsurface environments: a review, in revision for *J. Hydrol.*
3. A. Hubert, J. Farasin, H. Tabuteau, A. Dufresne, Y. Méheust & T. Le Borgne (2020), Shear-induced switching between active growth and dormancy in *E. coli* dynamics, in revision for *Nature Com.*

Nom, prénom : Fernandez Visentini, Alejandro

Date de début et de fin de thèse : 2018-2021

Direction de thèse : Niklas Linde (directeur), Tanguy Le Borgne (co-directeur) et Yves Méheust (co-encadrant)

Emploi actuel, lieu : Thèse en voie de complétion

Contrat (post-doc, CDD, CDI) :

Liste des publications issues de ce travail de thèse :

1. A. F. Visentini, P. de Anna, D. Jougnot, T. Le Borgne, Y. Méheust & N. Linde (2021), Electrical signature of diffusion-limited mixing: Insights from a milli-fluidic tracer experiment, submitted to *Transport Porous Med.*

Nom, prénom : Izimoto, Satoshi

Date de début et de fin de thèse : 2017-2021

Direction de thèse : Sander (directeur), Tanguy Le Borgne (co-directeur) et Yves Méheust (co-encadrant)

Emploi actuel, lieu : Thèse en voie de complétion

Contrat (post-doc, CDD, CDI) :

Liste des publications issues de ce travail de thèse :

1. S. Izumoto, J. A. Huisman, E. Zimmermann, J. Heyman, F. Gomez, H. Tabuteau, R. Laniel, H. Vereecken, Y. Méheust & T. Le Borgne (2021), Spectral induced polarization of calcite precipitation in a 2D porous medium, submitted to *Environ. Sci. & Tech.*

Nom, prénom : Lenci, Alessandro

Date de début et de fin de thèse : 2017-2021

Direction de thèse : Vittorio Di Federico (directeur) et Yves Méheust (co-directeur)

Emploi actuel, lieu : Thèse en cours

Contrat (post-doc, CDD, CDI) :

Liste des publications issues de ce travail de thèse : aucune publication soumise pour le moment

Nom, prénom : Tecklenburg, Jan

Date de début et de fin de thèse : 2012 - 2017

Direction de thèse : Insa Neuweiler (directeur)

Emploi actuel, lieu : Ingénieur modélisateur

Contrat (post-doc, CDD, CDI) : CDI

Liste des publications issues de ce travail de thèse :

1. Tecklenburg, J., I. Neuweiler, M. Dentz, J. Carrera, S. Geiger, C. Abromowski and O. Silva (2013): A non-local two-phase flow model for immiscible displacement in highly heterogeneous porous media and its parameterization. *Advances in Water Resources* **62**: 475-487.
2. Tecklenburg, J., I. Neuweiler, J. Carrera and M. Dentz (2016): Multi-rate mass transfer modeling of two-phase flow in highly heterogeneous fractured and porous media, *Advances in Water Resources* **91**, 63-77.

Nom, prénom : Cremer, Clemens

Date de début et de fin de thèse : 2012 - 2017

Direction de thèse : Insa Neuweiler (directeur)

Emploi actuel, lieu : Ingénieur modélisateur

Contrat (post-doc, CDD, CDI) : CDI

Liste des publications issues de ce travail de thèse :

1. Cremer, C., I. Neuweiler, M. Bechtold and J. Vanderborght (2016): Solute transport in heterogeneous soil with time-dependent boundary conditions, *Vadose Zone Journal* **15**(6)

2. Cremer, C., C. Schuetz, I. Neuweiler, P. Lehmann and E.H. Lehmann (2017): Unstable infiltration experiments in dry porous media, *Vadose Zone Journal* **16**(7).
3. Cremer, C., and I. Neuweiler (2019): How dynamic boundary conditions induce solute trapping and quasi-stagnant zones in laboratory experiments comprising unsaturated heterogeneous porous media, *Water Resources Research* **55**(12), 10765-10780.

Nom, prénom : Feng, Dianlei

Date de début et de fin de thèse : 2013 - 2017

Direction de thèse : Insa Neuweiler (directeur)

Emploi actuel, lieu : Tenure track position

Contrat (post-doc, CDD, CDI) : CDD

Liste des publications issues de ce travail de thèse :

1. Feng, D., I. Neuweiler and U. Nackenhurst (2017), A spatially stabilized TDG based finite element framework for modeling biofilm growth with a multi-dimensional multi-species continuum biofilm model, *Computational Mechanics* **59**(6), 1049-1070
2. Rath, H., D. Feng, I. Neuweiler, N.S. Stumpp, U. Nackenhurst and M. Stiesch (2017), Biofilm formation by the oral pioneer colonizer *Streptococcus gordonii*: an experimental and numerical study, *FEMS Microbiology Ecology* **93**(3), Nr. Fix010
3. Feng, D., I. Neuweiler, U. Nackenhurst and T. Wick (2019), A time-space flux corrected transport finite element formulation for solving multi-dimensional advection-diffusion-reaction equations, *Journal of Computational Physics* **396**, 31-53.

**Publications majeures des 5 dernières années du directeur de thèse et co-directeur(s)/co-encadrant(s) sur le sujet de thèse :**

- Z. Yang, I. Neuweiler, Y. Méheust, F. Fagerlund & A. Niemi (2016), Fluid trapping during capillary displacement in fractures, *Advances Water Resour.* **95**, 264-275.
- M. Dentz, I. Neuweiler, Y. Méheust & D. M. Tartakovsky (2016), Noise-Driven Interfaces and Their Macroscopic Representation, *Phys. Rev. E* **94**, 052802.
- Z. Yang, Y. Méheust, I. Neuweiler, R. Hu, A. Niemi, Y.-F. Chen (2019), Modeling immiscible two-phase flow in rough fractures from capillary to viscous fingering, *Water Resour. Res.* **55**(3), 2033–2056.

## FINANCEMENT DE LA THÈSE

**Origine(s) du financement de la thèse :** Contrat Doctoral Université Rennes 1 (politique d'établissement)

**Salaire brut mensuel :** 1770

**État du financement de la thèse :** Acquis

**Date du début/durée du financement de la thèse :** 01/09/2021 / 3 ans

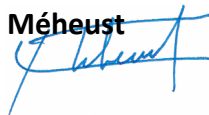
**Date :** 26/03/2021

**Olivier DAUTEUIL**  
Directeur de Géosciences  
Rennes UMR6118



Nom, signature du directeur d'unité : Olivier Dauteuil

Nom, signature du responsable de l'équipe : Yves Méheust



Nom, signature du directeur de thèse : Yves Méheust

