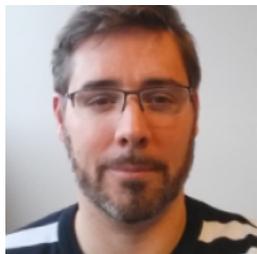


# Service de Modélisation Analogue en Hydrologie



Yves Méheust (MdC)  
*Responsable scientifique*



Francesco Gomez (IE)  
*Responsable technique*



Joris Heyman (CR)  
*Depuis 2019*



Tanguy Le Borgne  
(Phys. CNAP)

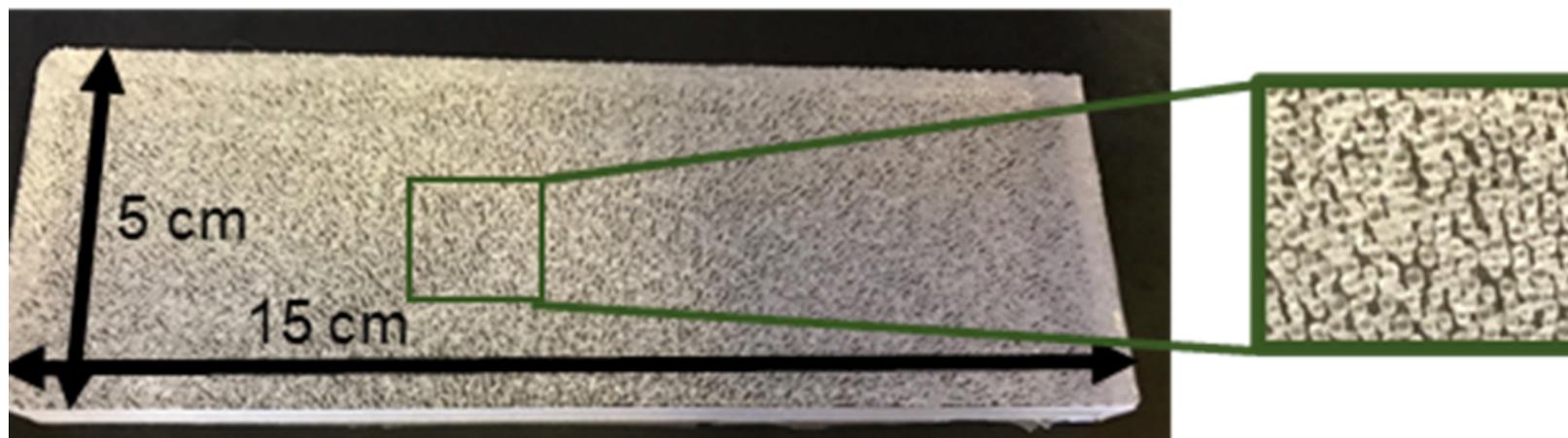
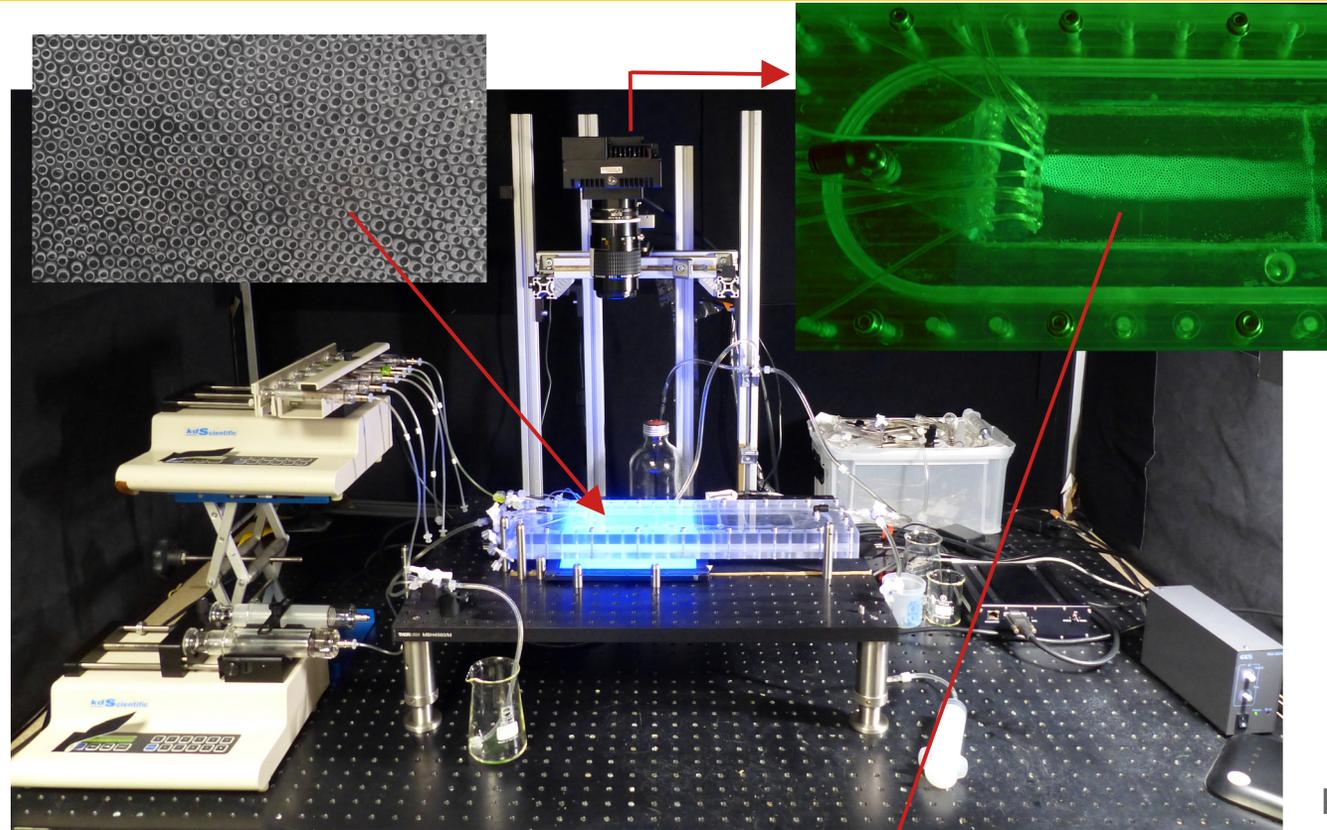


Figure S. Izumoto

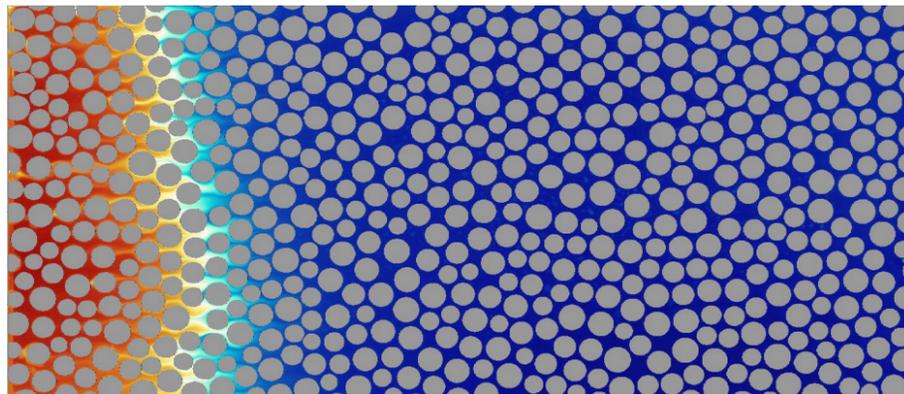


Hervé Tabuteau  
(CR Institut de Physique de  
Rennes)

Expérience  
millifluidique



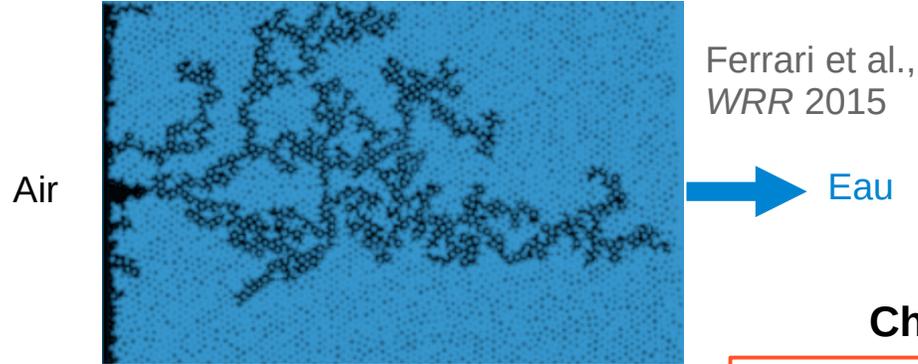
Photos O. Borgman



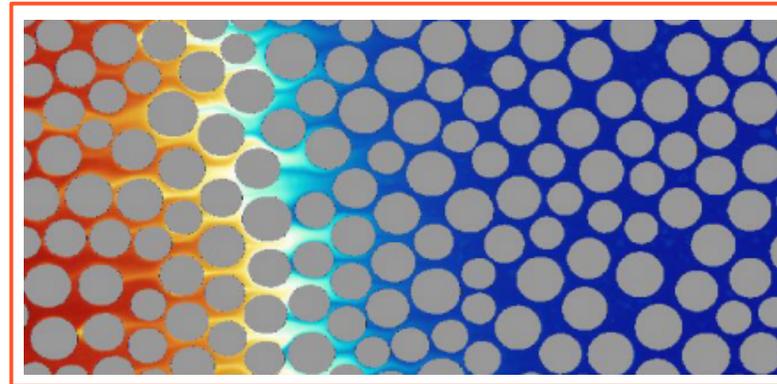
**Injection continue d'un soluté passif dans  
un milieu poreux saturé**

Expérience B. Géraud

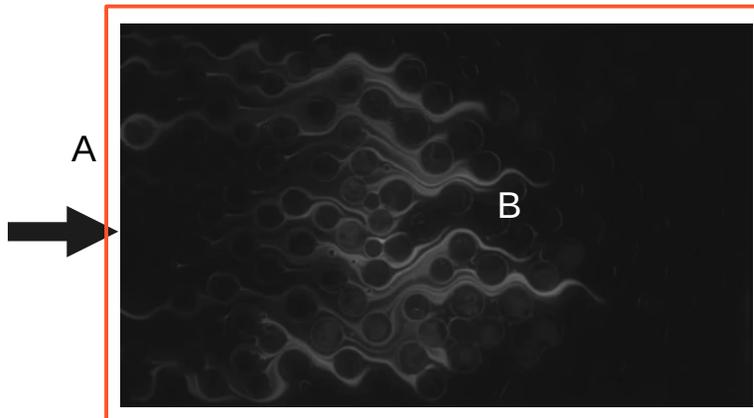
**Distribution spatiale de phases immiscibles**



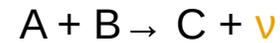
**Champ de concentration**



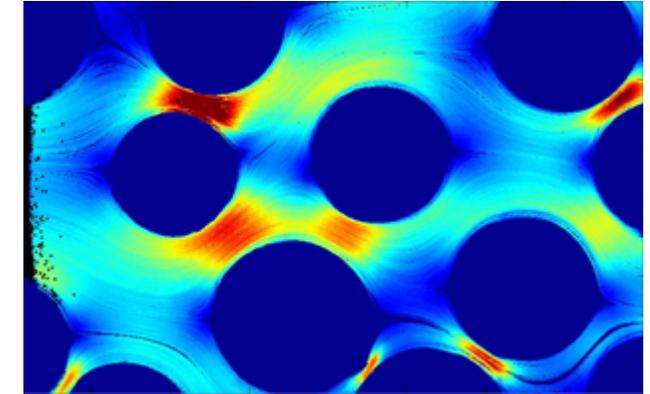
**Taux de réaction locaux**



de Anna et al.,  
*ES&T* 2014

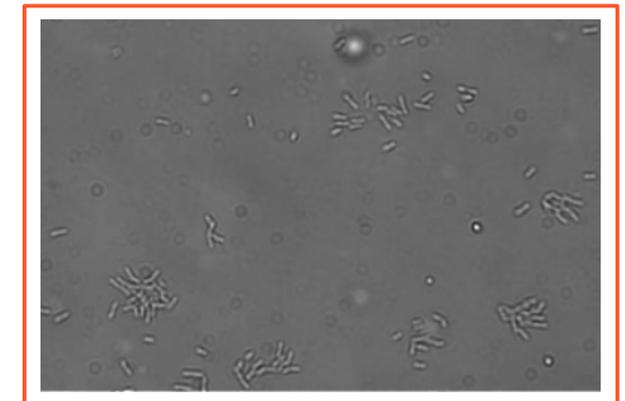


**Vitesses fluides par suivi de traceurs solides**



Thèse  
R. Turuban

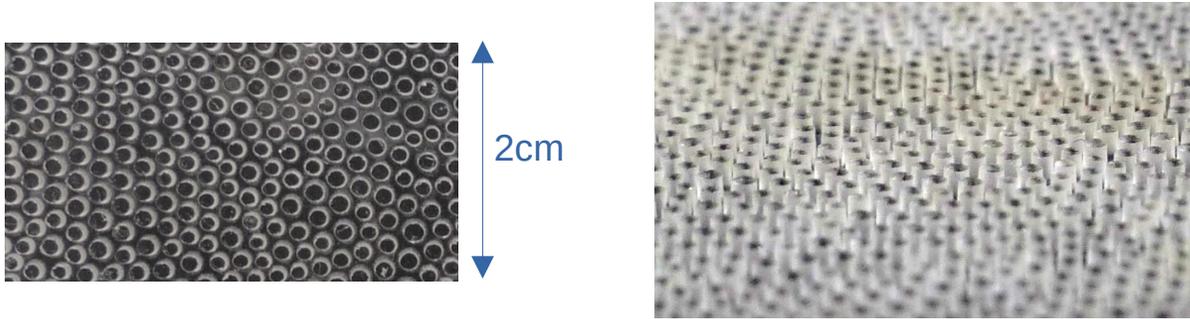
**Division des bactéries sous écoulement**



Thèse  
A. Hubert

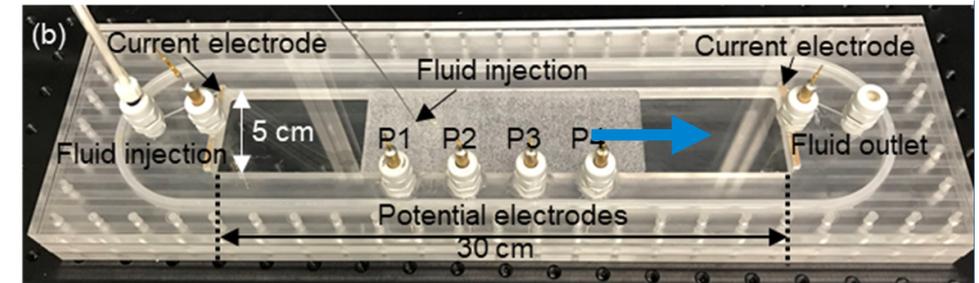
→ Mesures résolues en espace et en temps !

Fabrication des cellules micro/macrofluidiques



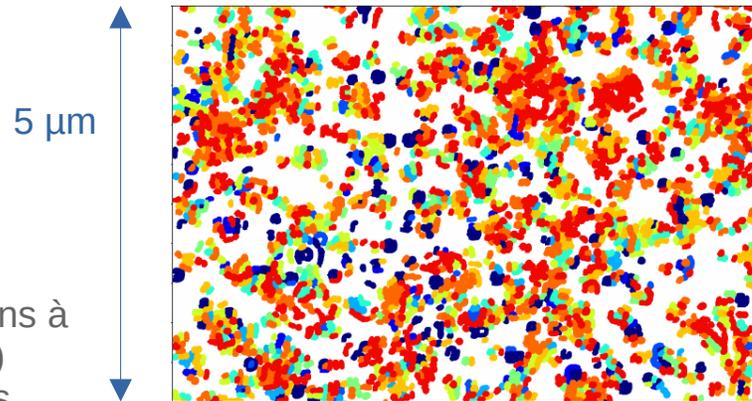
- Moulage d'un photo-polymère transparent
- Géométrie numérique → Moule fabriqué par découpe laser

Couplage des mesures de conductivité électrique réelle ou complexe à l'imagerie optique



Thèse S. Izumoto, ITN ENIGMA

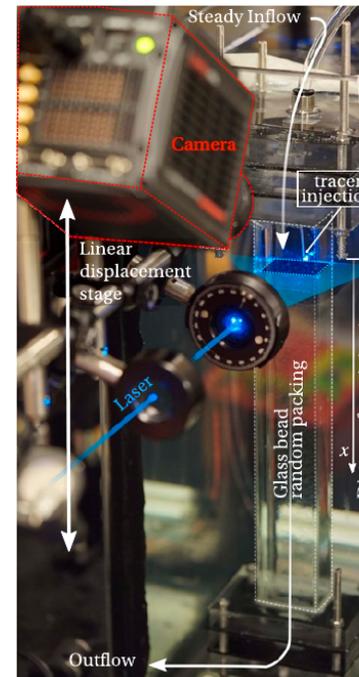
Développement d'un laboratoire de microfluidique



Hubert et al., en révisions à Nature Com. (2021)  
ERC ReactiveFronts

Observation sous microscope de la dynamique des bactéries

Mesure spatialisée en 3D des concentrations



- Tomographie optique" combinée à la fluorescence induite
- Caractérisation des propriétés de mélange des milieux 3D par push-pull au laboratoire

Voir vidéo sur

<https://geosciences.univ-rennes1.fr/modelisation-analogique-en-hydrologie>

Heyman et al., PNAS (2020)  
ERC ReactiveFronts

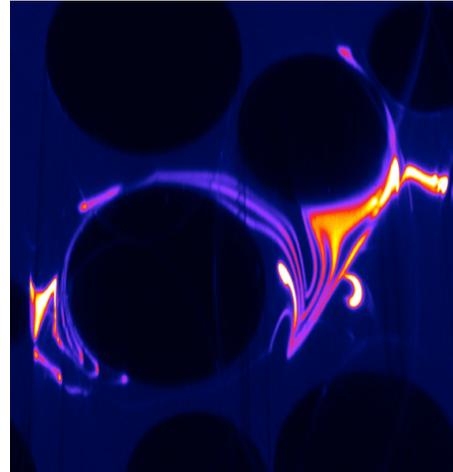
**ERC ReactiveFronts**

- Première caractérisation expérimentale de la nature intrinsèquement chaotique du mélange en milieux poreux 3D

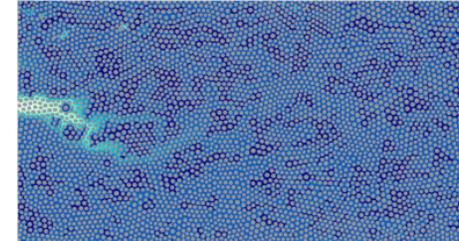
Heyman et al., PNAS (2020)

- Mise en évidence d'une adaptation phénotypique des bactéries à la contrainte imposée par un écoulement

Hubert et al., en révision à Nature Com. (2021)



**UnsatPorMix**

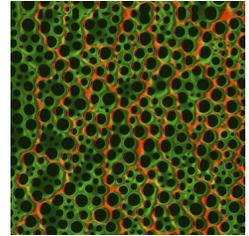


Impact de l'hétérogénéité structurale sur le mélange en milieu saturé

**Projets MSCA**

O. Borgman

**MicroMix**

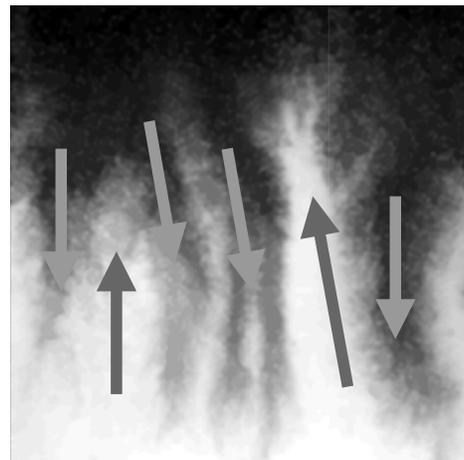


N. Waisbord

Impact du mélange en écoulement hétérogène sur la croissance des biofilms

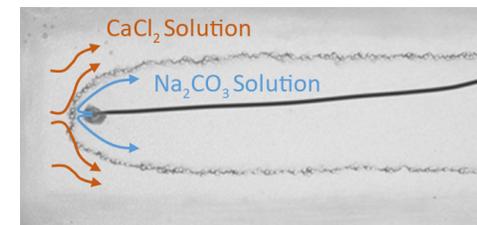
**ANR CO2-3D**

Étude du piégeage par solubilisation du CO<sub>2</sub> dans un milieu poreux 3D



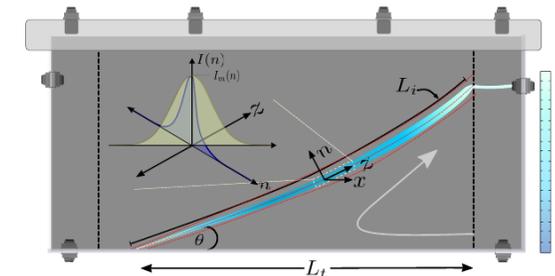
**ITN ENIGMA**

Mesure SIP d'une réaction de précipitation



Thèse S. Izumoto

Intrusion d'eau saline



Thèse K. de Vriendt

**CPER "Buffon" (2014-2021)**

Opération "Transport par les écoulements":

- > 200 k€ d'équipement (caméras, tables à déplacements, tables optiques, pompes à seringues, contrôleurs de pression)

**Halle expérimentale Buffon**

Nouveau laboratoire:

- Salle de microfluidique-microscopie
- Salle de milli-fluidique
- Espace de stockage

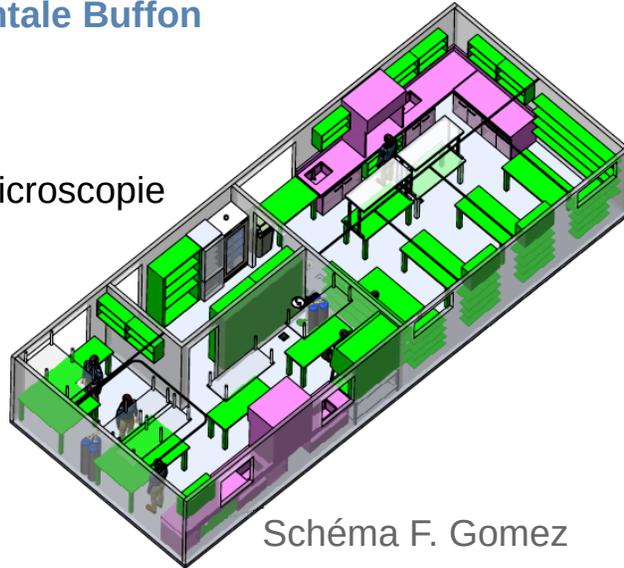


Schéma F. Gomez

**Tomographie aux rayons X (CPER "Buffon")**

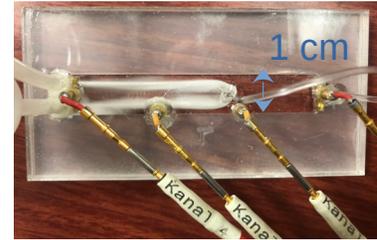


Mesures 3D dans matériaux opaques:

- de la structure de géomatériaux,
- de la distribution spatiale des phases fluides,
- des concentrations

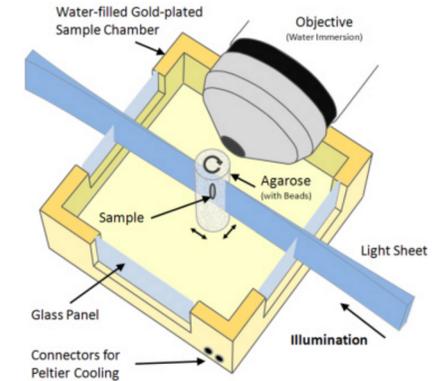
**Perspectives méthodologiques et scientifiques**

**1) Évolution vers le microscopique:**



Couplage de la microfluidique et des mesures géo-électriques

Postdoc S. Izumoto  
ANR IMAGE soumise



Couplage entre mesures sur les réactions en 3D et visualisation de bactéries

Rennes-Métropole OpenSPIM

**2) Étude en géométries de fractures:**

- Écoulements diphasiques en fractures géologiques
- Lien avec le stockage souterrain du CO<sub>2</sub> ANR-DFG 2PhlowFrac

**Plateforme labellisée d'imagerie et modélisation analogue**

Regroupera

- les deux Services de Modélisation Analogiques de GR
- des expériences de l'IPR sur les écoulements granulaires
- le micro-tomographe X ?

## Financements et projets scientifiques

- **CPER** "Transport par les Écoulements" (2014-2021, Y. Méheust)
- **ERC ReactiveFronts** (2016-2021, T. Le Borgne)
- **ANR CO2-3D** (2017-2022, Y. Méheust)
- **ITN ENIGMA** (2016-2020, P. Davy & T. Le Borgne)
- **MSCA MicroMix** (2019-2021, N. Waisbord – T. Le Borgne)
- **MSCA UnsatPorMix** (2019-2021, O. Borgman – Y. Méheust)
- **MSCA ChemicalWalks** (2019-2021, T. Aquino – T. Le Borgne)
- **ANR SUCHY** (2019-2022, J. Heyman)
- **Rennes-Métropole OpenSPIM** (2020-2021, J. Heyman)
- **ITN CoperMix** (2021-2025, T. Le Borgne)
- **ANR TwoPhlowFrac** (2021-2024, Y. Méheust)

## Chercheurs postdoctorants



Baudouin Géraud  
(2016-2017)



Joris Heyman  
(2017-2018)



Jayabrata Dhar  
(2018-2019)



Oshri Borgman  
(2019-2021)



Tomás Aquino  
(2019-2021)



Nicolas Waisbord  
(2019-2021)



Shabina Ashraf  
(2020-2022)

## Articles scientifiques

1. J. Jiménez-Martínez, T. Le Borgne, H. Tabuteau & Y. Méheust (2017), Analysis of mixing dynamics in unsaturated porous media from photo-bleaching micro-model experiments, *Water Resour. Res.* **53** (2), 1457-1472.
2. D. Jougnot, J. Jimenez-Martinez, R. Legendre, T. Le Borgne, Y. Méheust, & N. Linde (2018), Impact of small-scale saline tracer heterogeneity on electrical resistivity monitoring in fully and partially saturated porous media: insights from geoelectrical milli-fluidic experiments, *Adv. Water Resour.* **113**, 295-309.
3. 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.
4. J. Heyman, D. R. Lester & T. Le Borgne (2021), Scalar Signatures of Chaotic Mixing in Porous Media, *Phys.Rev. Lett.* **126**, 034505.
5. A. Hubert, J. Jimenez-Martinez, H. Tabuteau, J. Heyman, T. Le Borgne & Y. Méheust (2020), Micromodel experiments of solute transport, mixing and reactions in subsurface environments: a review, in revision for *J. Hydrol.*
6. 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.*

## Doctorants



Régis Turuban  
(2013-2017)



Satoshi Izumoto  
(2016-2021,  
"secondment" ITN)



Kevin De Vriendt  
(2017-2021,  
"secondment" ITN)



Hugo Sanquer  
(2019-2022)



Mélissa Garry  
(2020-2024)