

Les transferts dans la zone critique

Responsables: Dimitri Lague puis Yves Méheust (depuis déc. 2019)

- Historique:**
- Née en 2017 de la réunion de 3 équipes
 - Renforcée en 2018 par 3 chercheurs et 1 ingénieure CNRS
 - Mutation d'un physicien CNAP
 - 2 recrutements CR, 2 recrutements IR, 1 IR en CDI
 - + 90% personnels non-permanents

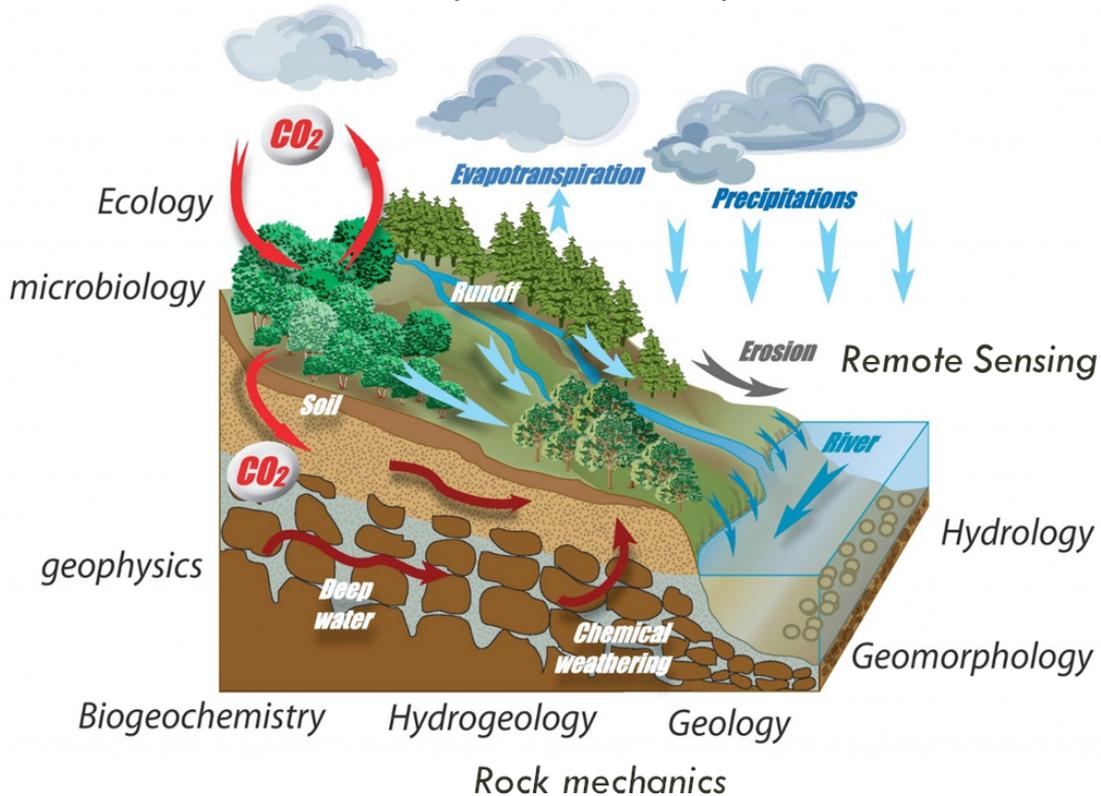


Photo 2015

Photo 2020

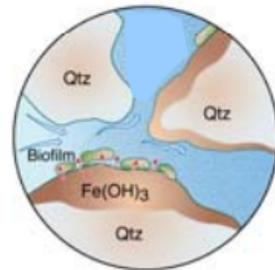
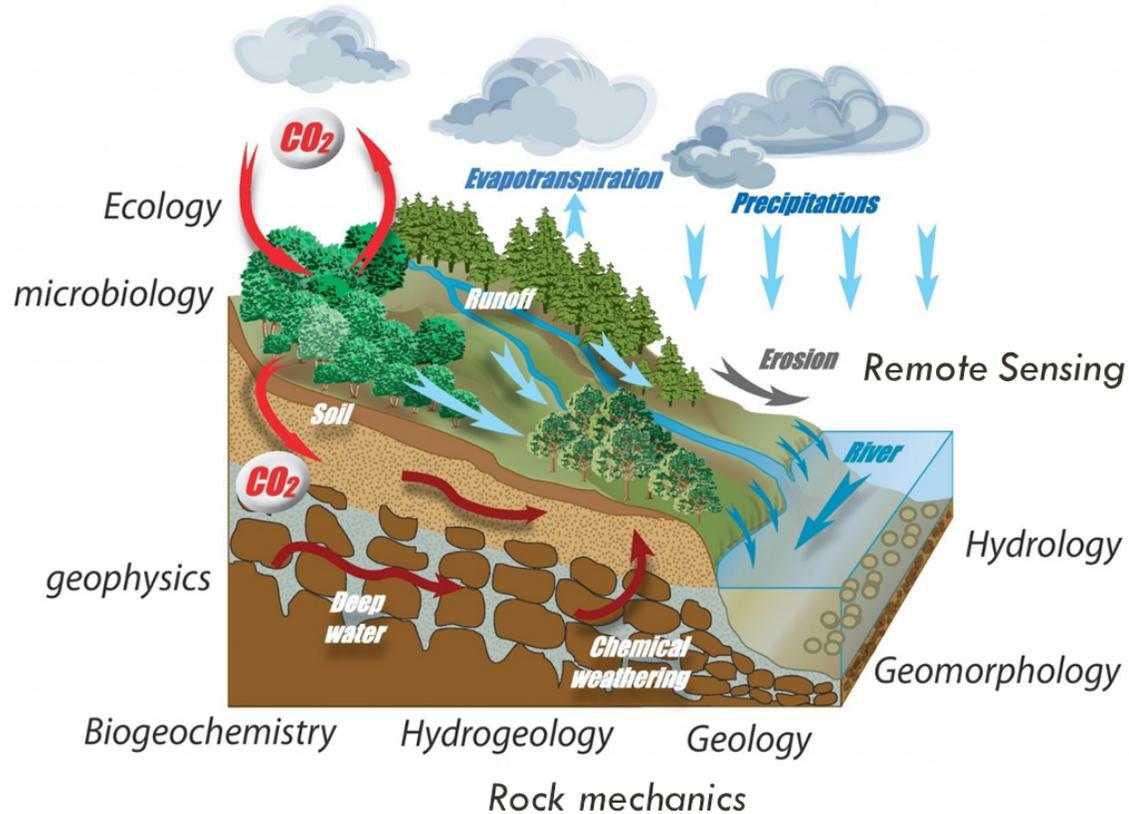


Aujourd'hui:

- 12 Chercheurs CNRS
- 6 enseignants-chercheurs
- 10 Ingénieurs
- 4 ingénieurs CDD
- 34 jeunes chercheurs (doctorants et post-doctorants)
- 3 ingénieurs ITASCA associés

→ 4 groupes au sein de l'équipe:

Hydrologie (Y. Méheust), Géomorphologie (P. Steer),
Géophysique (F. Nicollin) & Géochimie des Surfaces (G. Gruau)



Fonctionnement de la zone critique

- › **Ressource en eau:** quantité disponible et qualité
- › **Écoulements souterrains:** flux et connectivité,
- › **Polluants:** sources, transport, piégeage, interaction chimique avec le milieu
- › **Lien entre processus de transport et activité biologique**
- › Lien entre dynamique des **rivières et paysages**
- › **Couplage entre érosion/transferts de sédiments et tectonique**
- › **Évènements extrêmes** (crues, séismes, volcanisme)
- › La dynamique des **systems hydrothermaux**

→ Un grande variété de champs disciplinaires

Phénomènes complexes

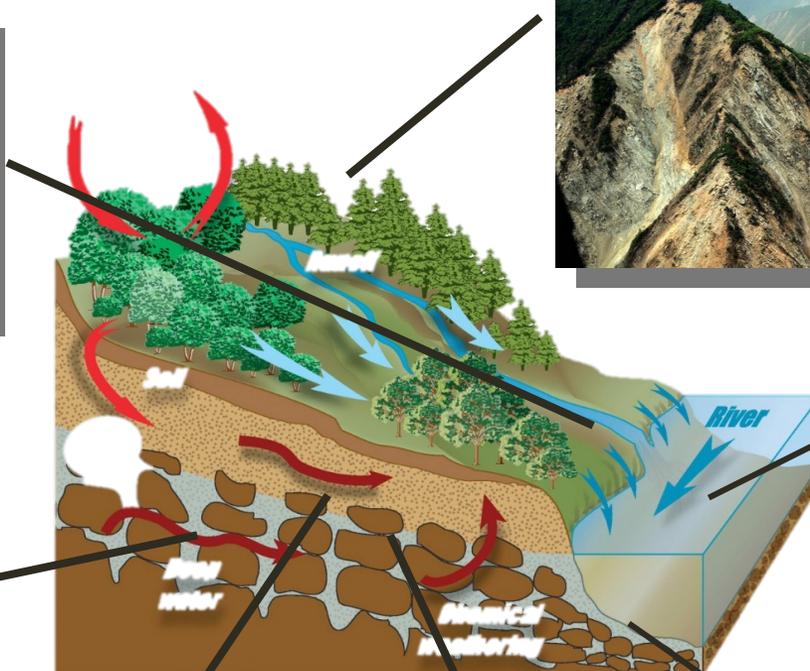
- Faisant intervenir des processus couplés
 - › couplés entre eux
 - › donnant lieu à des instabilités
- Concernant
 - › des milieux fortement hétérogènes
 - › des échelles spatiales allant du μm à l'échelle globale
 - › des échelles temporelles très courtes (évènements extrêmes) à très longues (temps géologiques)



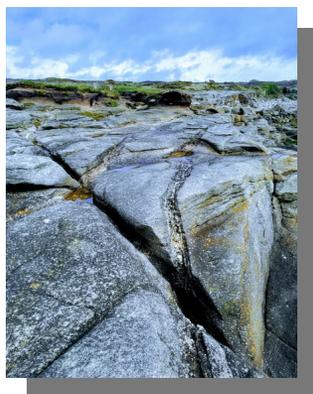
Zones humides



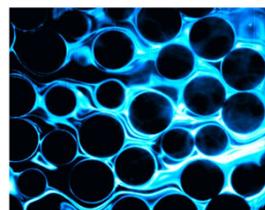
Chaînes de montagnes



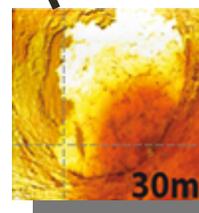
Lacs et rivières



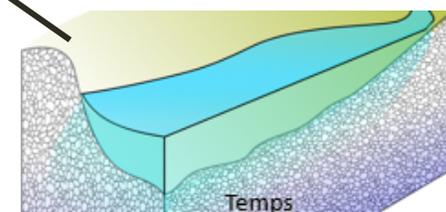
Socle fracturé



Milieux poreux



Communautés microbiennes



Zone hyporhéique

Tendance générale:

- Étude des couplages
- Extension de la gamme des échelles
- Étude des processus aux interfaces entre différents compartiments

1) Exploiter l'interdisciplinarité de l'équipe

- pour
- combiner les approches méthodologiques
 - associer les expertises
- + **nombreuses collaborations interdisciplinaires** avec d'autres instituts de l'UR1 (IPR, Ecobio, IRISA)

2) Couples mesures in situ, expériences de labo & modélisation numérique/théorique

- **Investissement important dans les plateformes et services expérimentaux**

3) Étudier les processus fondamentaux sans perdre de vue les applications et les enjeux sociétaux

Aléas et risques: risques hydrologiques (crues), hydrosédimentaires post-sismiques et volcaniques



Applications industrielles souterraines: stockage des déchets nucléaires (Factory) et du CO₂, géothermie

Ressources en eau souterraine : qualité et quantité disponible, lien avec le réchauffement climatique



Restauration des rivières et bassins-versants: projet BERCEAU (Agence de l'Eau)

Imagerie Satellitaire

- **Données gravimétriques GRACE**
- **Imagerie optique HR**

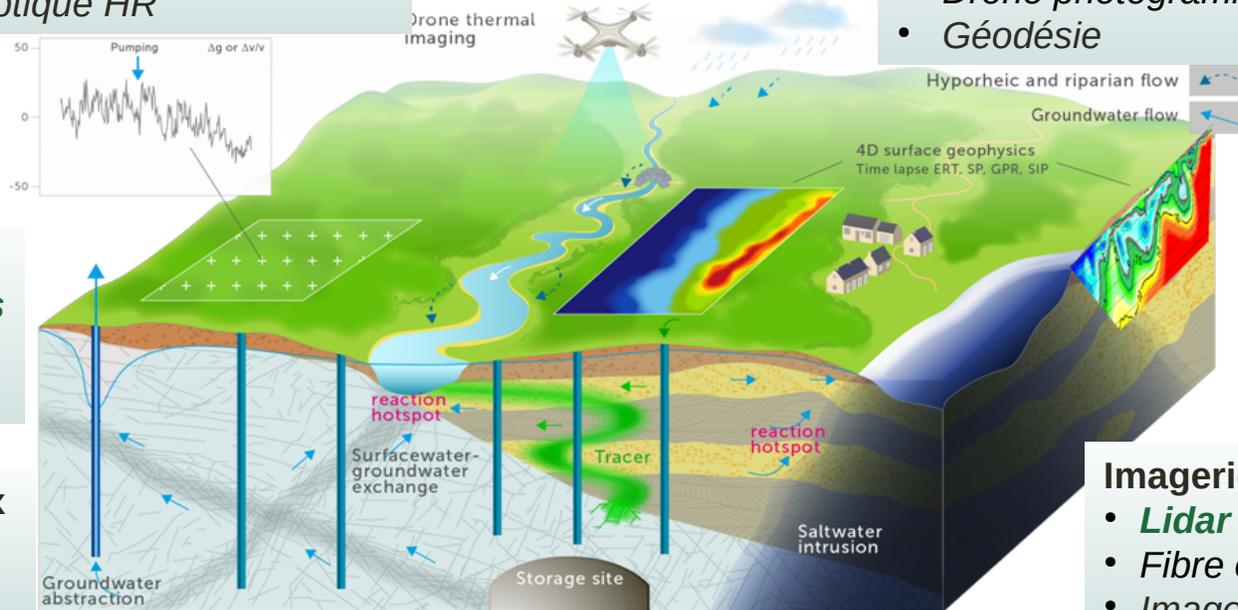


Subsurface

- **Tomographie muons**
- **Hydrogéodésie**
- **Impédance complexe**

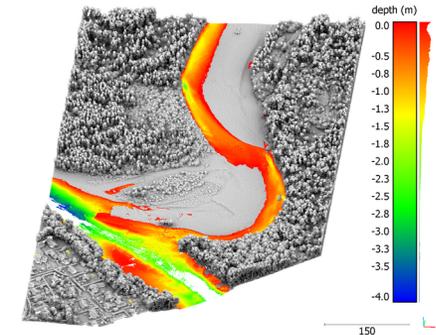
Traçage des flux

- **Fibre optique**
- **Traceurs gaz**



Topographie et végétation 3D

- **Lidar terrestre**
- **Drone photogrammétrique**
- **Géodésie**

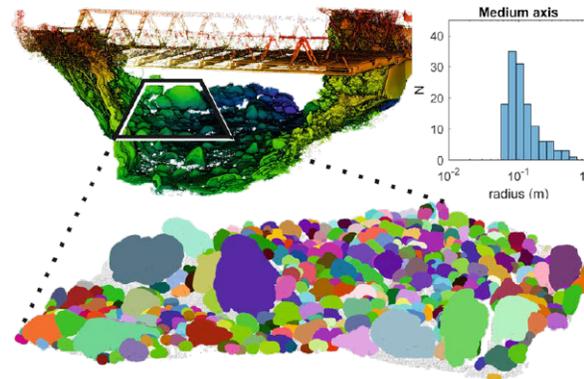


Imagerie des rivières et de la tranche d'eau

- **Lidar aéroporté topo-bathymétrique**
- **Fibre optique**
- **Imagerie acoustique**

Enjeux sur le traitement et le couplage aux données

- Données massives ("Big Data"): classification, fouille, apprentissage machine + fusion de données hétérogènes
- Diffusion des algorithmes/codes développés
- Inversion couplées à partir de données de nature différentes
- Données 3D: analyses morphologiques automatiques

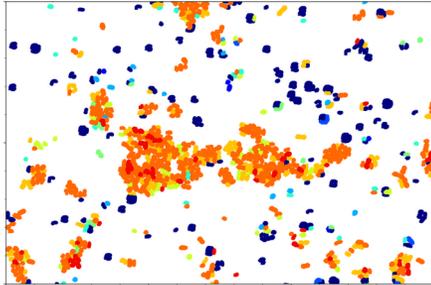


Infrastructures

- Equipex CRITEX
- Observatoires de Ploemeur-Guidel (SNO H⁺) et AgrHys → OZCAR
- Plateforme Condate-Eau d'analyse des gaz dissous
- Plateforme LIDAR

Modélisation analogue du transport en milieux poreux

- Millifluidique couplée aux mesures électriques

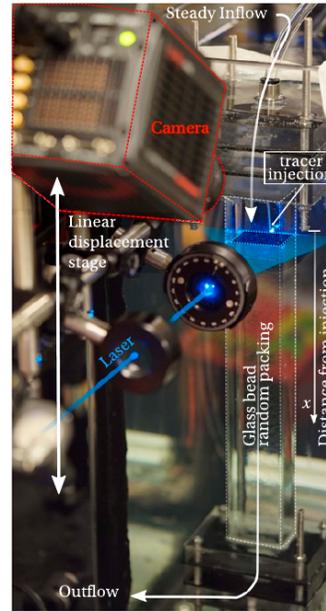


- Tomographie optique couplée à la fluorescence induite

Heyman et al. PNAS 2020

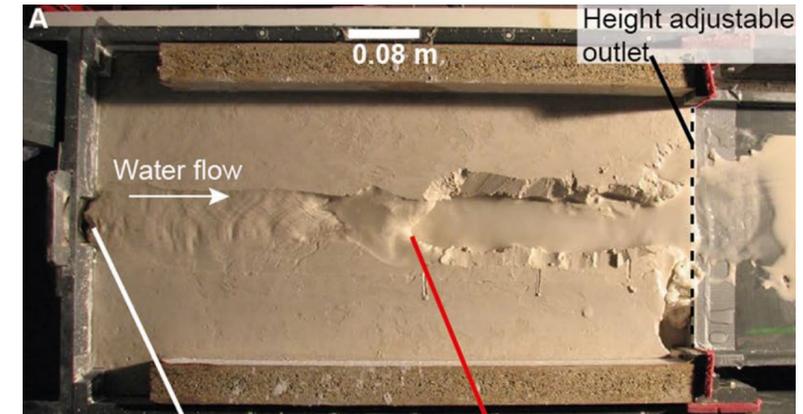
- Microfluidique → bactéries sous écoulement

ANR MixingProcesses, ERC Reactive Front, ANR CO2-3D



Modélisation analogue en géomorphologie

- Modélisation de la dynamique d'une rivière:



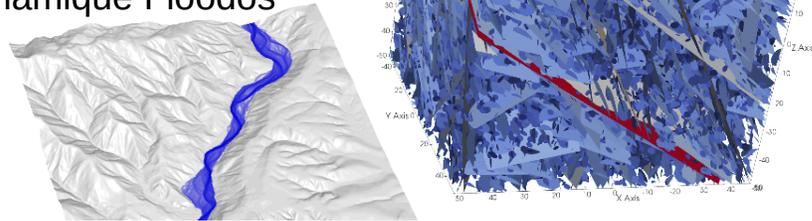
- Dispositif pour étudier l'érosion de milieux fracturés imprimés en 3D ERC FEASIBLE

Développements numériques

- Plateforme DFN.lab (LabCom Fractory)

P. Davy, C. Darcel, R. Le Goc

- Nouvelle composante hydrodynamique Floodos pour le modèle de morphodynamique Eros

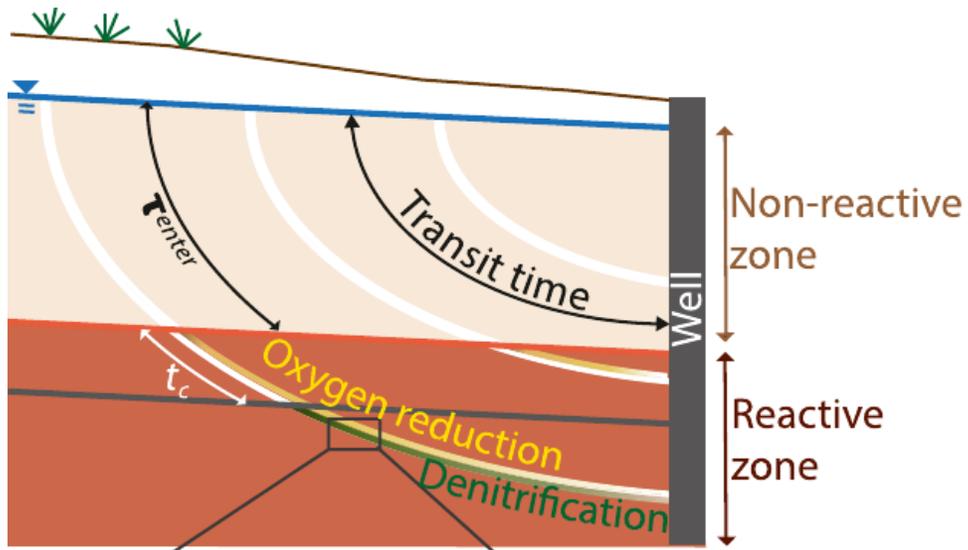


- **Traitement de données:** données 3D (nuages de points), données 2D (traitements d'image), signaux géophysiques, méthodes d'inversion

Analyses géochimiques des eaux

- Une nouvelle méthode de datation combinant silice dissoute (DSi) et concentrations de CFC, testée sur 5 aquifères
- L'analyse des matières organiques naturelles par thermoanalyse-GC/MS
- L'identification des plastiques par pyrolyse GC/MS

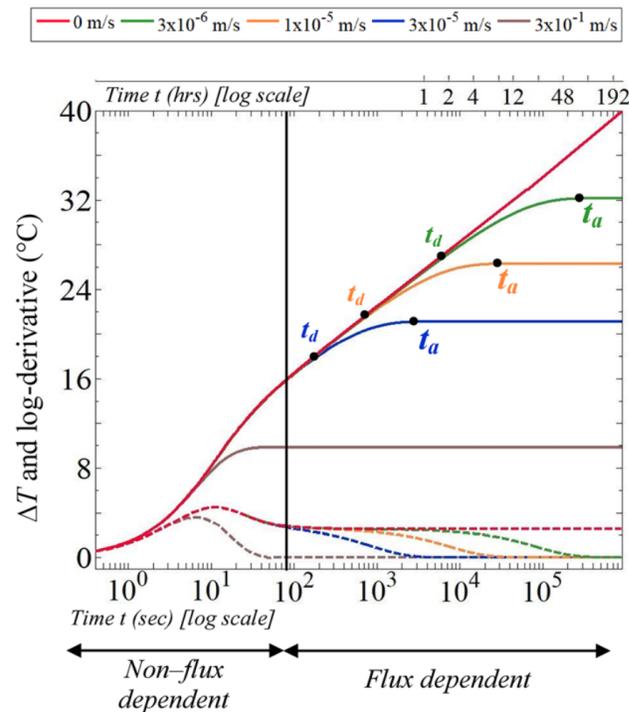
Stratification de la réactivité et dénitrification des aquifères



- Étude sur le site de Ploemeur
- Généralisée à 5 autres aquifères aux USA
- Comparaison des temps de réaction apparents de O_2 et NO_3^-
 - caractérisation de la profondeur de la zone altérée

Kolbe et al., *PNAS* 2019

Collaboration avec l'UMR ECOBIO



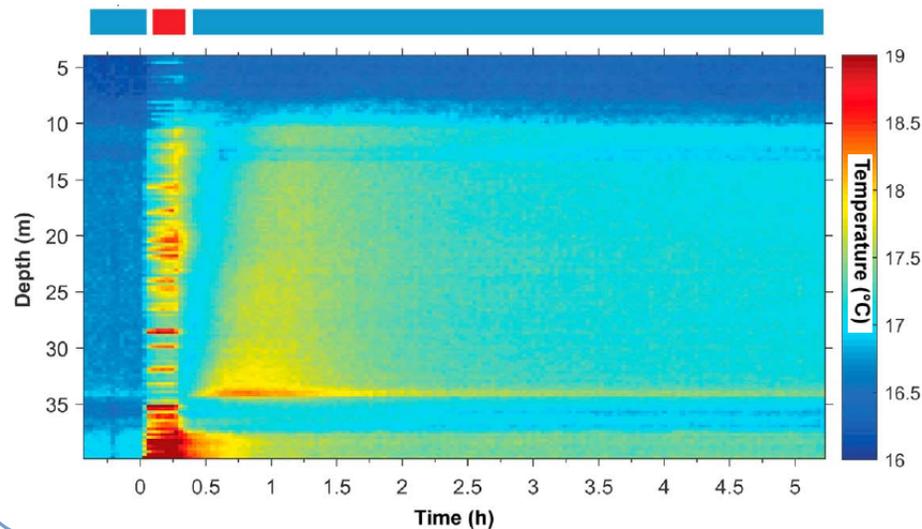
Mesure distribuée par fibre optique

- Mesure du flux dans le puit à partir de $T(t)$
- Validation dans un boîte à sable

Thèse de N. Simon
Simon et al., *WRR* 2021

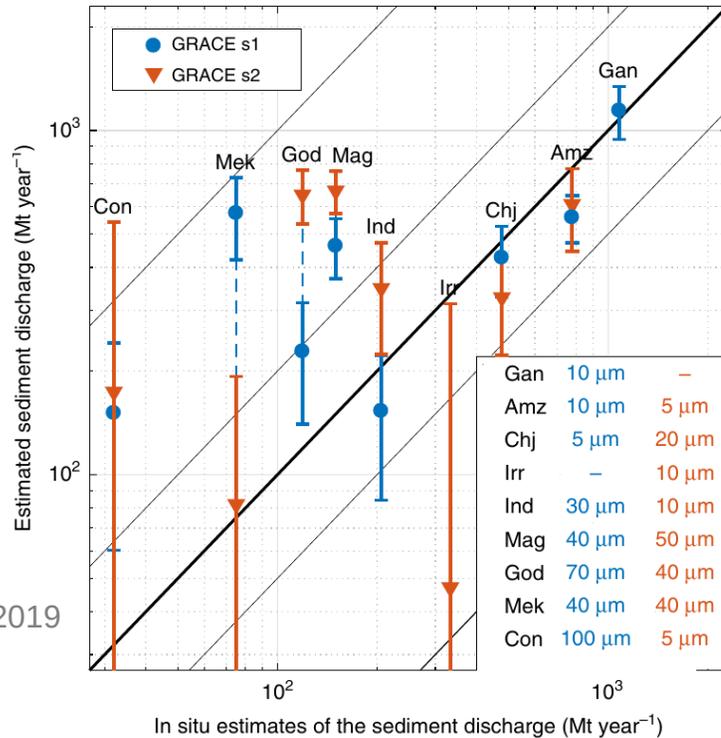
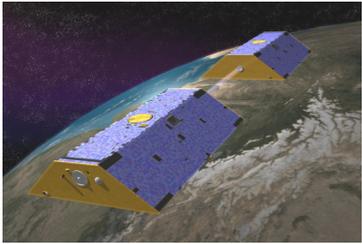
- Traçage thermique & de soluté entre deux puits

→ caractérise la géométrie des fractures



de la Bernardie, *WRR* 2018

Hydrologie globale par gravimétrie spatiale

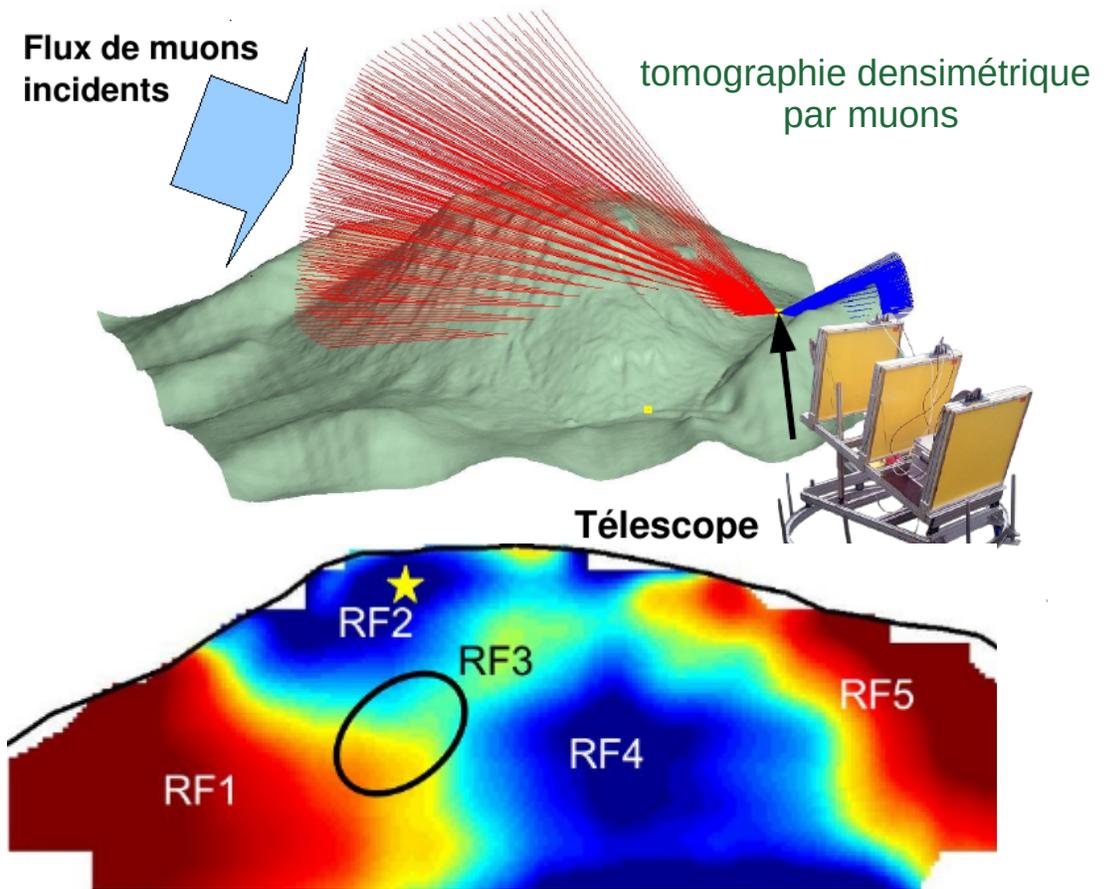


Mouyen et al., *Nature Com.* 2019

- Les débits massiques de sédiments des plus gros fleuves du monde, estimés à partir de données GRACE, sont cohérents avec les estimations in situ.
- La technique a aussi permis de montrer que l'eau perdue par les glaciers des Montagnes Rocheuses canadiennes est d'abord stockée dans les aquifères avant de s'écouler dans les rivières.

Castellazzi et al., *WRR* 2019

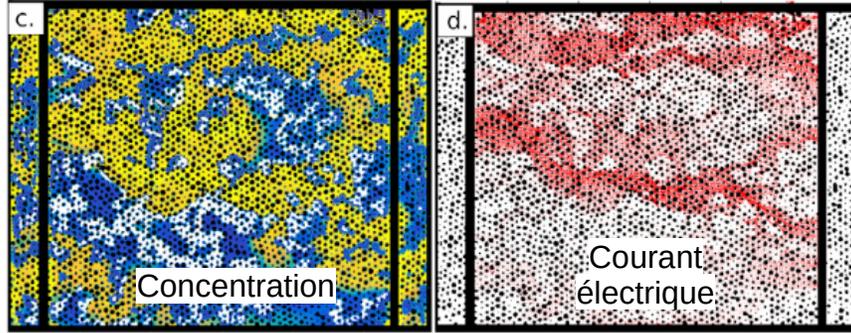
Dynamique d'un système hydrothermal



- Localisation précise de la zone hydrothermale active par tomographie densimétrique à muon
→ détection potentielle des précurseurs d'éruptions phréatiques

Lien entre transport réactif et signaux géo-électriques

- Études millifluidiques:



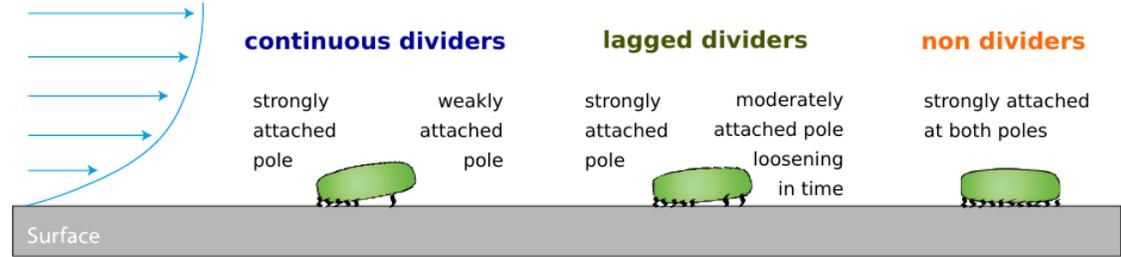
MSCA "GoelectricMixing"
Ghost et al., *GRL* 2018

→ explication de la "masse manquante" dans les tests de traçage par ERT

- Études théoriques/numériques: compréhension des couplages entre transport des charges et signal électrique en milieux poreux et fractures

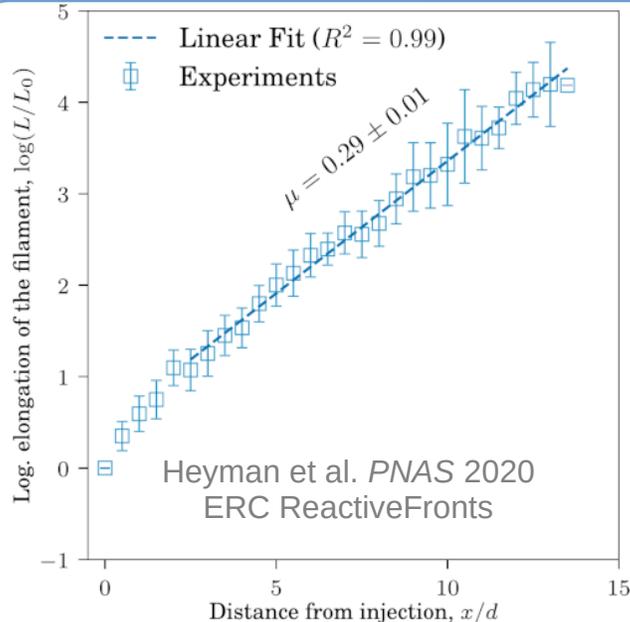
Collaboration Univ. Lausanne, Jougnot et al., *AWR* 2018

Adaptation d'une population bactérienne au "stress" imposé par un écoulement



- Étude microfluidique sur une population de bactéries E. coli
- Les E. coli présentent 3 comportements face à l'écoulement, relatifs à leur attachement aux surfaces

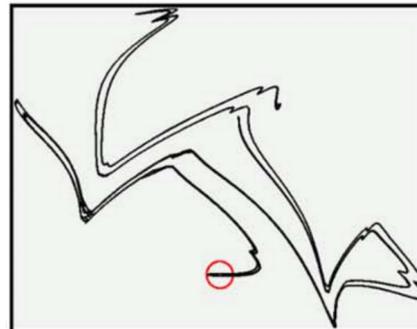
ERC ReactiveFronts, thèse d'A. Hubert



Heyman et al. *PNAS* 2020
ERC ReactiveFronts

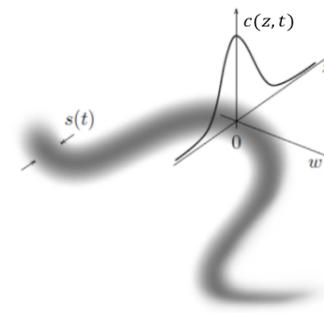
Mélange en milieux 3D

- Les écoulements sont intrinsèquement chaotiques
 - déformation exponentielle
 - repliements



Turuban et al., *PRL* 2019

Théorie "lamellaire" du mélange

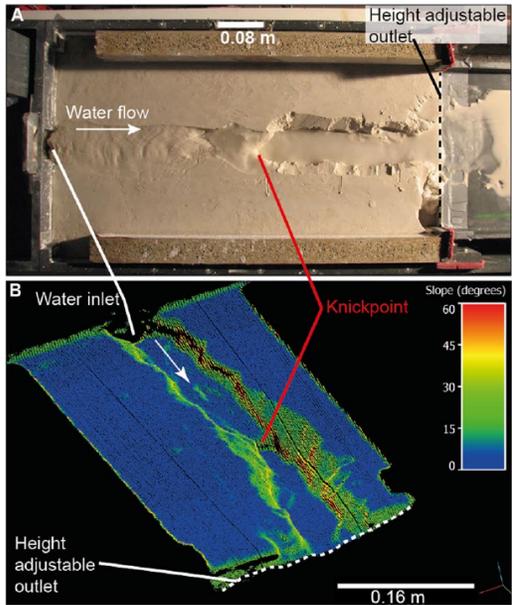


- Adaptée au transport de solutés en milieux poreux
- Permet de relier la PDF des concentrations à l'hétérogénéité du milieu

Le Borgne et al., *JFM* 2017

- Testée à l'échelle porale et l'échelle du bassin versant

Jimenez et al., *WWR* 2017
Bandopadhyay et al., *GRL* 2018

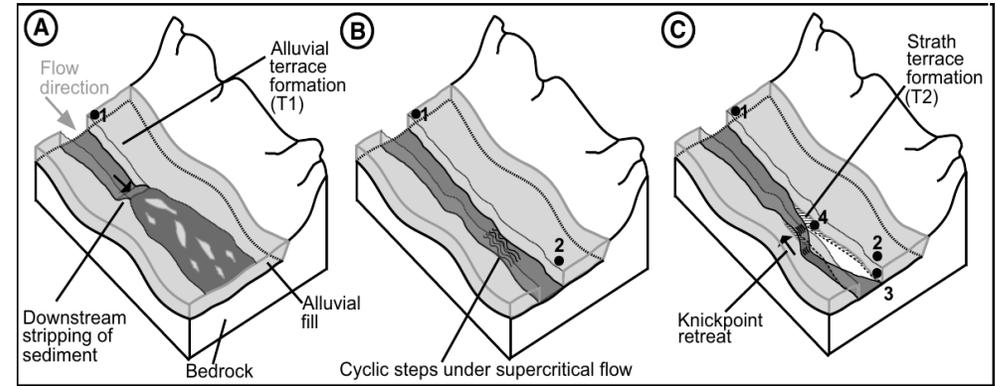


Vitesse de retrait des “knickpoints”

- Migration vers l’amont des points de rupture de pente
- Vitesse de migration: peu influencée par le débit
- Raison: rétroactions morphodynamiques entre débit, largeur et érosion

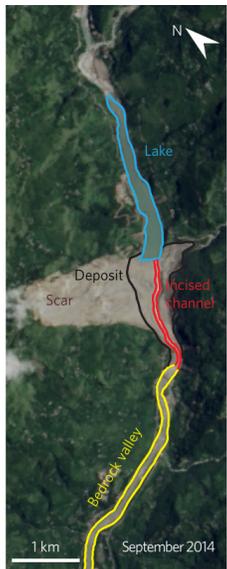
MSCA WATERFALLMODELD3D,
Baynes et al., *Sci. Rep.* 2018

Émergence de terrasses fluviales autogéniques



Baynes et al., *Geology* 2018

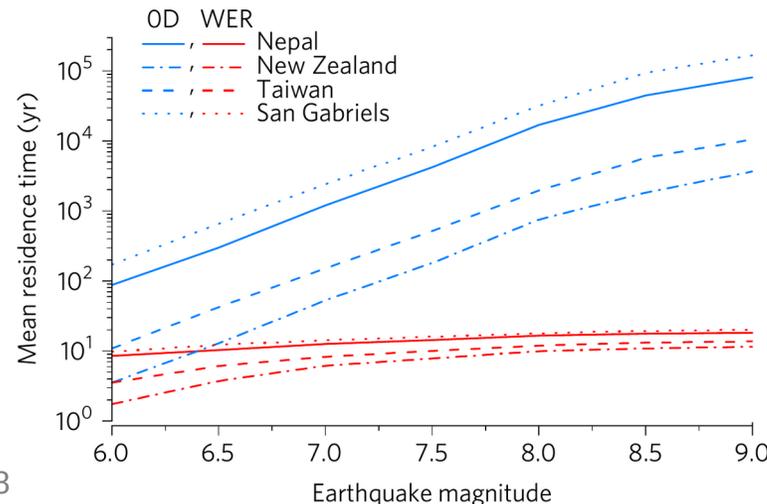
- Écoulement torrentiel
- Expériences et simulations numériques EROS/FLOODOS
- Formation des terrasses et génération d’un unique “knickpoint”



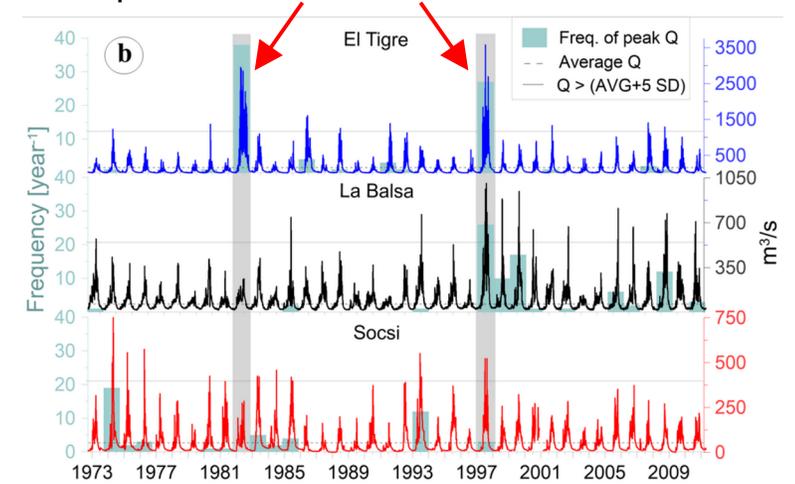
Export des sédiments issus de glissements de terrain

- Étude numérique
- Les temps d’export sont 10 ou 100 fois plus faibles que ceux prédits par les modèles classiques “OD”

Croissant et al., *Nature Geosci.* 2018



Impact d’El Nino sur données Andines

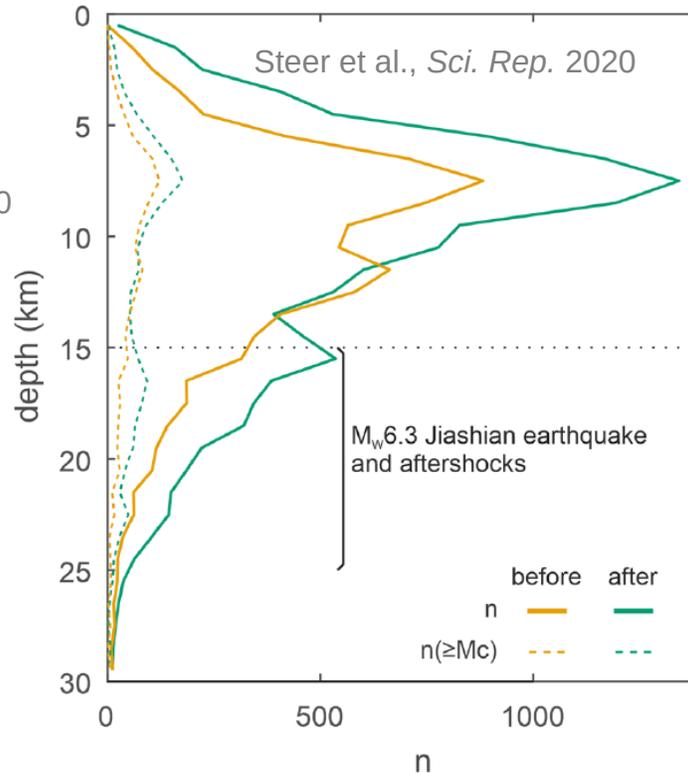


Morera et al., *Sci. Rep.* 2020

Rétroactions des évènements extrêmes sur la sismicité

- Nouveau modèle théorique permettant de quantifier les contributions relatives des paramètres mécaniques et de la géométrie des glissements sur leur distribution de taille

Thèse Jeandet 2018
Jeandet et al., *GRL* 2020



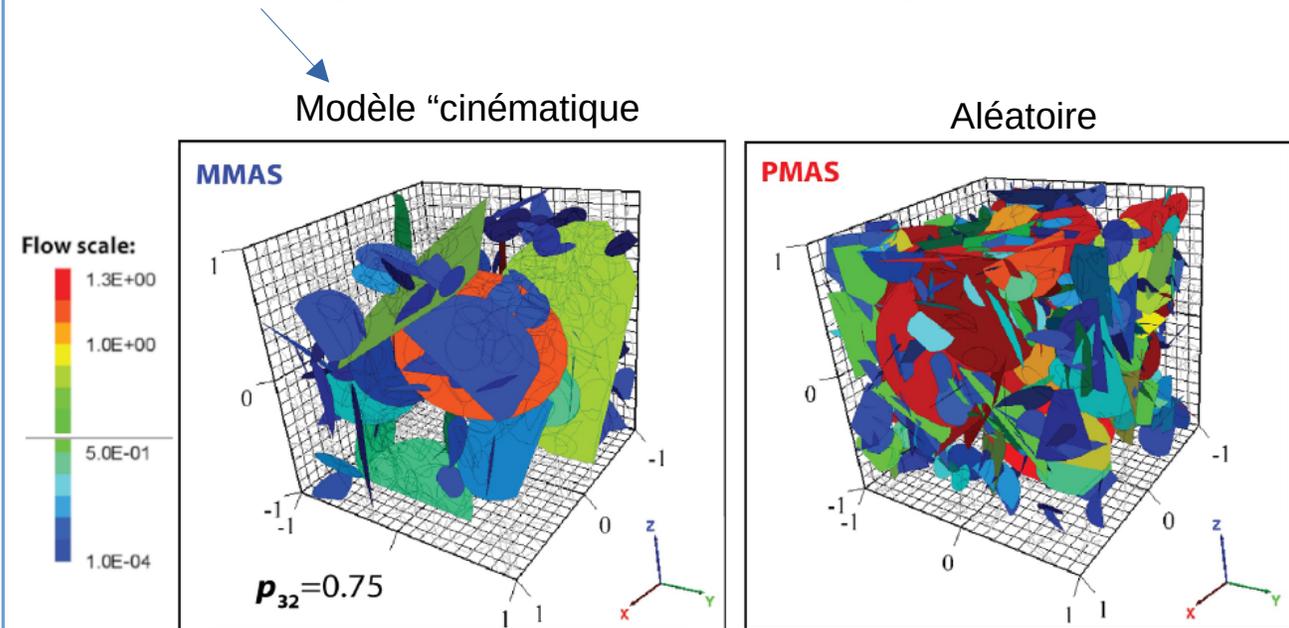
- Mise en évidence de l'impact fort de l'érosion résultant du typhon Morakot (Taïwan 2009) sur les tremblements de terre dans les 2.5 années suivantes. ANR Euroquake

→ **ERC FEASIBLE** (2019-2025)



Géomécanique des DFNs

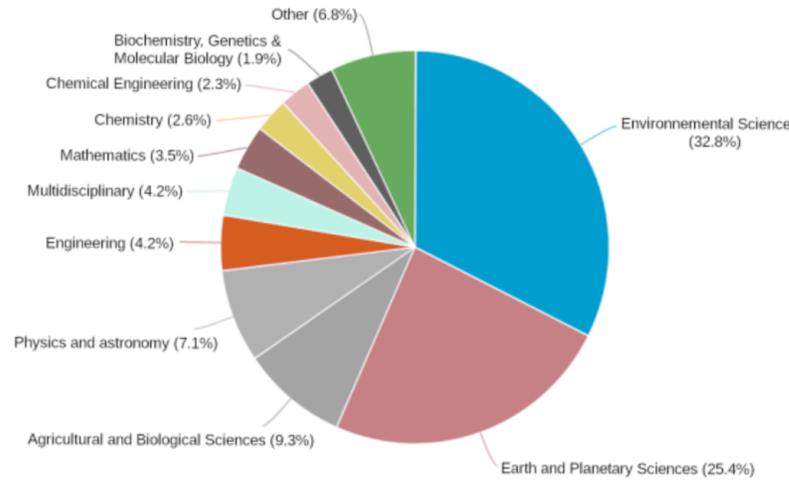
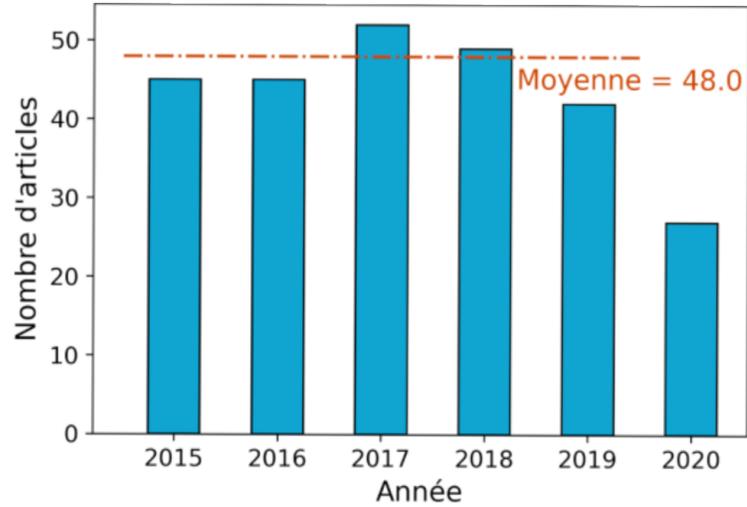
- Un nouveau type de modèle de milieu fracturé synthétique:



Thèse de J. Maillot
J. Maillot et al., *WRR* 2016

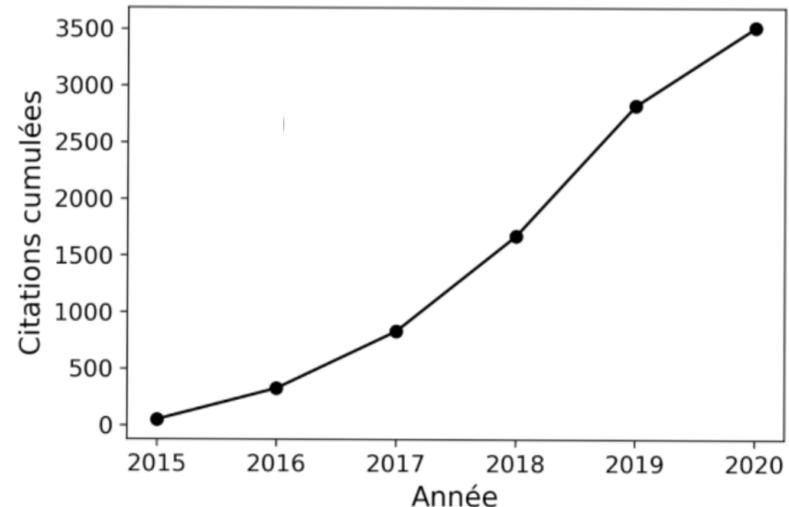
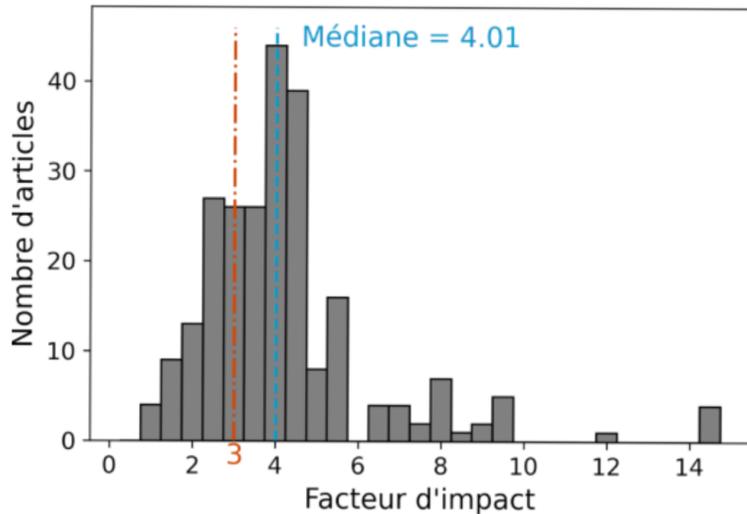
→ Les propriétés de connectivité, distribution des longueurs, et de distribution des flux sont différentes

- Un modèle théorique permet de prédire les propriétés d'élasticité d'un milieu fracturé composé de fractures en prenant en compte la friction sur les plans de fracture Davy et al., *JGR* 2018



Champs disciplinaires

- Environnement: 33%
- Sciences de la terre: 25%
- Physique et sciences de l'ingénieur: 11%
- Biologie et agronomie: 10%



Quantité

- **260 articles** (58 par an complet)
- 3.6 articles par [chercheur.an]
- **4.4 articles par [ETP.an]**

Qualité

- **78% des publications dans des revues du 1er quartile: IF > 3.0**
- **~1 article sur 10 à IF >7.0**
- ~5.5 citations par article et par an en moyenne sur ~ 2.5 premières années d'existence des articles

Projets internationaux et financés par l'Europe

Équipe porteuse de

- **2 ITNs**: ENIGMA (2017-2020) & CoperMix (2021-2025)
- **2 ERCs**: ReactiveFronts (T. Le Borgne, 2016-2021) & FEASIBLE (P. Steer, 2019-2024)
- 5 MSCA
- **LIA "Ressources et Société"** France-Québec
- de nombreux projets internationaux (US, NZ, Canada, Norvège)
+ participation à 1 autre ITN et 2 INTERREG

À l'échelle nationale

- **Co-portage de l'Equipex CRITEX** (L. Longuevergne)
- **Portage ou coportage de 7 ANRs**, participation à 4 autres
- 2 membres de la section 30 du CNRS
- 1 membre du comité CNAP-SCOA
- Nombreux projets internationaux (US, NZ, Canada, Norvège)
- Participation à 7 comités d'évaluation HCERES et au comité n°6 de l'ANR

Contrats avec le secteur privé et les collectivités territoriales

- **Labcom** CNRS-UR1-Itasca **Fractory** (P. Davy, C. Darcel)
- Nombreux projets avec l'Agence de l'Eau, EDF, le BRGM

Distinctions individuelles

- **1 highly-cited scientist** (L. Longuevergne, 2019)
- **1 Interpore Medal for Porous Media** (T. Le Borgne, 2020)

Localisation des co-auteurs internationaux



Organisation de conférences et écoles internationales

- **Organisation de CMWR2018** (J.R. de Dreuzy, T. Le Borgne)
- **6 participations individuelles** à des comités d'organisation
- **2 éditions de l'école thématique** "Flow and Transport in Porous and Fractured Media" **de Cargèse**
- 36 sessions de conférences internationales

Seulement 6 ECs dans l'équipe (dont 1 CNAP).

Mais:

- Plusieurs chercheurs et ingénieurs CNRS participent à l'enseignement
- Portage de l'essentiel des enseignements de l'UR1 sur l'hydrologie et les transferts en milieux perméables, l'hydrologie de surface et la géomorphologie
- **Création** en 2006 & **Portage depuis du parcours Hydro3 du Master SdT & Environnement**, devenu **Master Sciences de l'Eau (SdE)** lors du dernier contrat
- **Portage de la création d'un L3 Environnement** en 2018 (vivier pour le Master SdE)
- **F. Nicollin est co-directrice des enseignements** à Géosciences Rennes

Un vrai succès:

- Fonctionnement en équipe pour **partager les expertises complémentaires et les responsabilités**
- **Bonne dynamique scientifique** → **rayonnement** national et international

Mais... elle est victime de son succès :

- L'animation scientifique ne peut plus se faire à l'échelle de l'équipe entière
- La gestion financière doit être menée sur plusieurs lignes budgétaires

Donc: **l'équipe DIMENV se transforme...** → 4 nouvelles équipes TERA, RIVIERES, DEMODE, Eau et Territoires

Quel est son héritage ?

- Thématiques de recherche à l'interface entre disciplines
- Méthodes et plateformes expérimentales
- La culture transdisciplinaire et les projets associés, issus de l'équipe, vont continuer à exister au sein des équipes qui sont en grande partie ses héritières

Pour compléter:

<https://geosciences.univ-rennes1.fr/dynamique-imagerie-et-modelisation-des-systemes-environnementaux-dimenvrisce>