



Caractérisation des Réservoirs Géologiques

Présentation de l'équipe

L'équipe **CRG (Caractérisation des Réservoirs Géologiques)**, pilotée par **Daniel BRITO**, a pour objectif l'analyse des propriétés et des caractéristiques des systèmes réservoirs géologiques. Objet d'échelle métrique à pluri-kilométriques, les systèmes réservoirs constituent l'interface géologique qui permet l'analyse intégrée de l'ensemble des processus à l'œuvre dans la construction d'un bassin sédimentaire. Les processus en jeu s'échelonnent de l'échelle du bassin jusqu'à celle du réseau poral, couplant enveloppes solides et couches fluides. Les activités de l'équipe croisent des approches géologiques (géologie structurale, sédimentologie, géochimie, géomorphologie et néotectonique) avec celles de la géophysique, la physique des roches, et de la minéralogie.

Activités de recherche

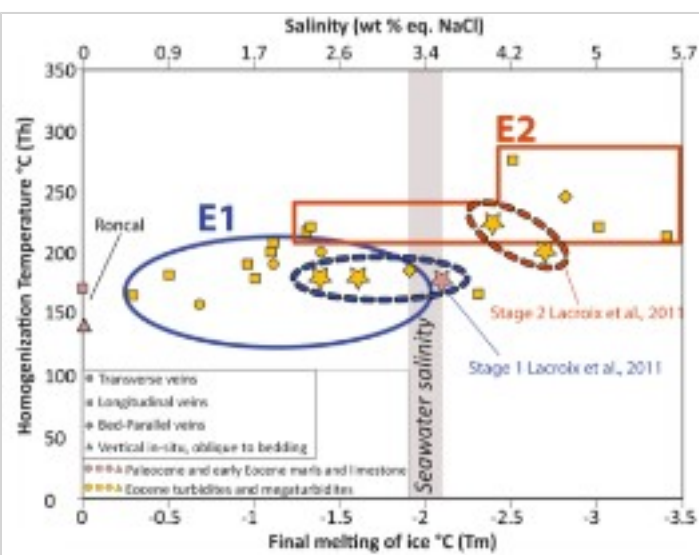
A) Interaction tectonique et sédimentation (dynamique de bassin)

La dynamique de bassin est un sujet central de l'équipe CRG. Siège de l'essentiel des géoressources, résultat de la compétition entre processus orogéniques et d'extension, le bassin sédimentaire est à l'interface entre les processus de surfaces et la géodynamique, entre l'érosion et la construction sédimentaire. Sa compréhension, plus que tout autre nécessite une intégration très poussée des processus à l'œuvre, et ce en balayant de très larges gammes d'échelles de temps et d'espace.

L'équipe CRG possède une indéniable compétence en ce domaine : notre approche consiste tout d'abord en une caractérisation conjointe de l'évolution sédimentaire et structurale des objets étudiés afin de proposer un cadre général d'étude, une architecture évolutive. C'est ce cadre qui est par la suite nourri d'informations quantitatives (stratigraphie séquentielle, scénarii cinématiques, conditions de température et de pression, etc.) pour améliorer notre description du sous-sol et notre capacité à en estimer les caractéristiques. Ces travaux reposent d'abord sur une analyse quantitative des données (sismiques, forages, terrain, imagerie de surface, etc.) permettant la construction du géomodèle, en attachant une importance particulière à la description des liens entre structures tectoniques et évolution des paysages et des faciès sédimentaires. Ce géomodèle est alors habillé par les informations issues de l'analyse et de l'interprétation des données, comme des mesures quantitatives des propriétés des roches et minéraux composant l'objet d'étude (paléotempérature, paléopiézomètre, composition des fluides en place, etc.).

Nous nous sommes particulièrement intéressés à :

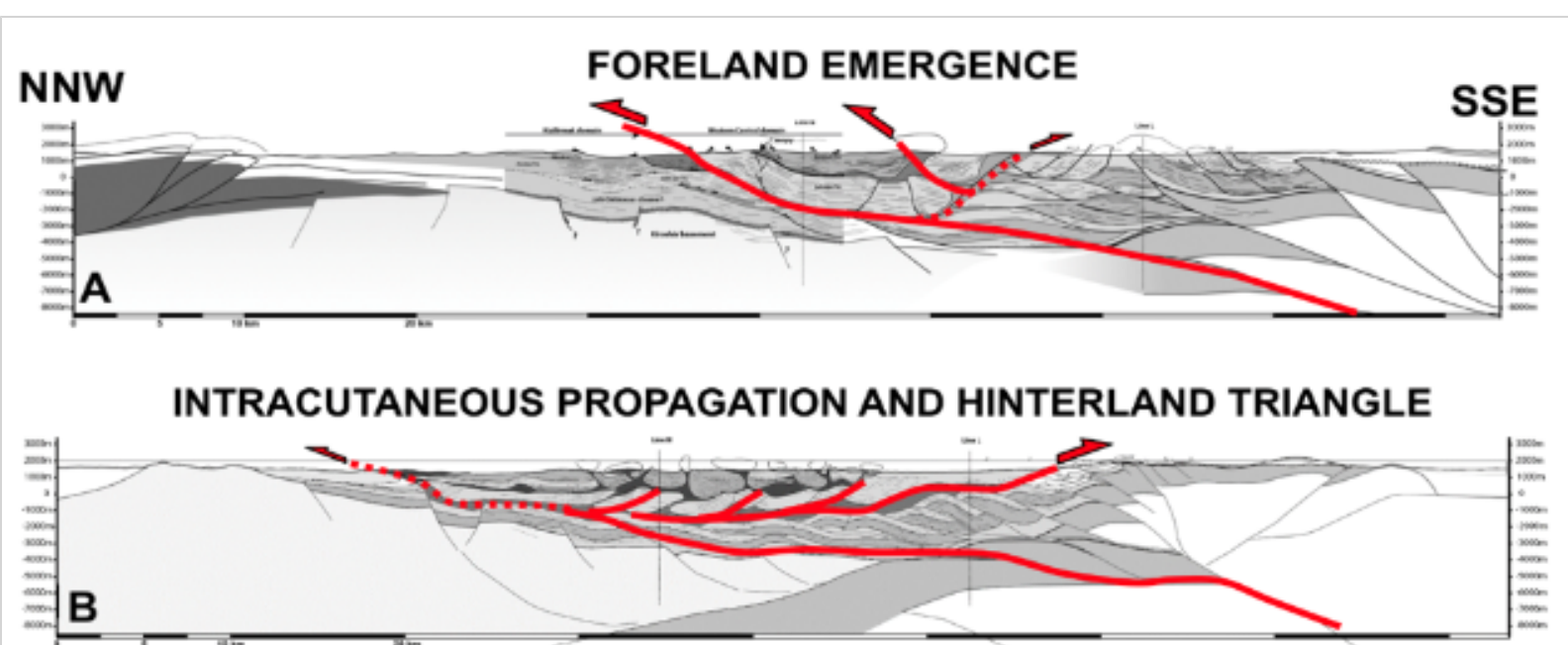
a) la dynamique des bassins d'avant pays qui permettent l'enregistrement continu de l'ensemble des étapes d'évolution d'un orogène et sa propagation. Deux chantiers sont particulièrement suivis : (1) **le bassin du Neuquen** au front des Andes Argentine, qui permet l'étude de la dynamique des bassins sédimentaires intra montagneux (Huygues et al., 2015a, 2015b), témoins des stades de construction de la chaîne et de la réponse jointe crustale et lithosphérique, y compris dans son enregistrement passé (familles de fractures, Branellec et al. 2015a, b), comme sa dynamique actuelle (Messenger et al. 2010 ; Branellec et al., 2017) ; (2) **le bassin de Jaca** au Sud des Pyrénées qui permet de suivre non seulement l'interaction entre la propagation des systèmes de plis et chevauchements et les architectures sédimentaires associés, mais aussi les marqueurs de l'endommagement réservoirs (fracturations, déformation matricielle, minéralisation) (Crognier et al., 2017), autant d'enregistreurs clés des conditions de déformations



Caractérisation de deux épisodes de circulation de fluides (E1 et E2) dans le bassin de Jaca (Crognier et al., 2017)

b) la tectonique salifère. Les capacités de fluages des séries évaporitiques confèrent à cette géologie des caractéristiques hors norme. Sensible à la moindre stimulation, le sel amplifie l'ensemble de la dynamique géologique. Or des provinces pétrolières parmi les plus prolifiques du monde sont directement contrôlées par le fluage des évaporites (Angola, Golfe du Mexique mais plus proche de nous, le domaine de la mer du Nord voire certaines parties de l'Aquitaine). Un chantier particulièrement unique, le bassin de Sivas en Turquie (Callot et al. 2014), nous a permis de mener une étude complète d'un bassin sous exploré, en débutant par la cartographie, l'analyse sédimentaire (Ribes et al., 2015 ; 2017), le lien avec la tectonique (Kegaravat et al., 2016), l'intégration des interactions fluides roches (Pichat et al., 2017), et l'intégration dans un cadre régional. Ces travaux nous ouvrent maintenant la voie pour une analyse poussée de l'âge et de l'importance de ce type de structure dans le domaine pyrénéen et alpin. Dans une suite logique, nous nous intéressons maintenant à une possible analogie entre la déformation des séries argileuses et celles des séries salifères.

c) En outre ces approches couplant tectonique et sédimentation permettent de développer des méthodes de quantification originales tels la datation fine des épisodes de déformation via les minéralisations des familles de fractures par des méthodes innovantes (voir ci-après), la datation relative des épisodes de thermicité et de déformation, le lien avec les phases de minéralisations.





Partitionnement de la déformation dans la chaîne plissée de Sivas en fonction du découplage par la canopée salifère (Kergaravat et al., 2017 ; Legeay et al. soumis).

B) Interaction fluide-roche et diagénèse

Nous cherchons à identifier et quantifier les changements minéralogiques et géochimiques associés à l'enfouissement des roches réservoirs et des roches mères. Ces modifications, liées aux variations de T, P et de composition des fluides durant l'enfouissement, la déformation et l'exhumation subis au cours de l'histoire géologique du bassin sédimentaire et le cas échéant de l'orogène, ont un impact prépondérant sur les propriétés des réservoirs (porosité, perméabilité, propriétés mécaniques) et donc sur leur qualité en termes de ressources (huile, gaz, eau, géothermie...) comme de stockage. Les approches employées comprennent l'étude pétrographique d'échantillons prélevés sur le terrain ou sur des carottes de forages (microscope optique, cathodoluminescence, MEB, QEMSCAN, etc.), la géochimie des isotopes et éléments traces (microsonde, sonde ionique, IRMS...) ainsi que l'étude des inclusions fluides par microthermométrie. Par ailleurs, quantifier la chronologie et la durée des processus diagénétiques est un défi majeur que nous abordons à travers le développement de techniques de datations U-Pb par LA-ICPMS des carbonates, minéraux ubiquistes dans les systèmes réservoirs. Une telle approche doit à terme permettre la datation d'étapes élémentaires d'évolution minérale et d'endommagement des réservoirs.

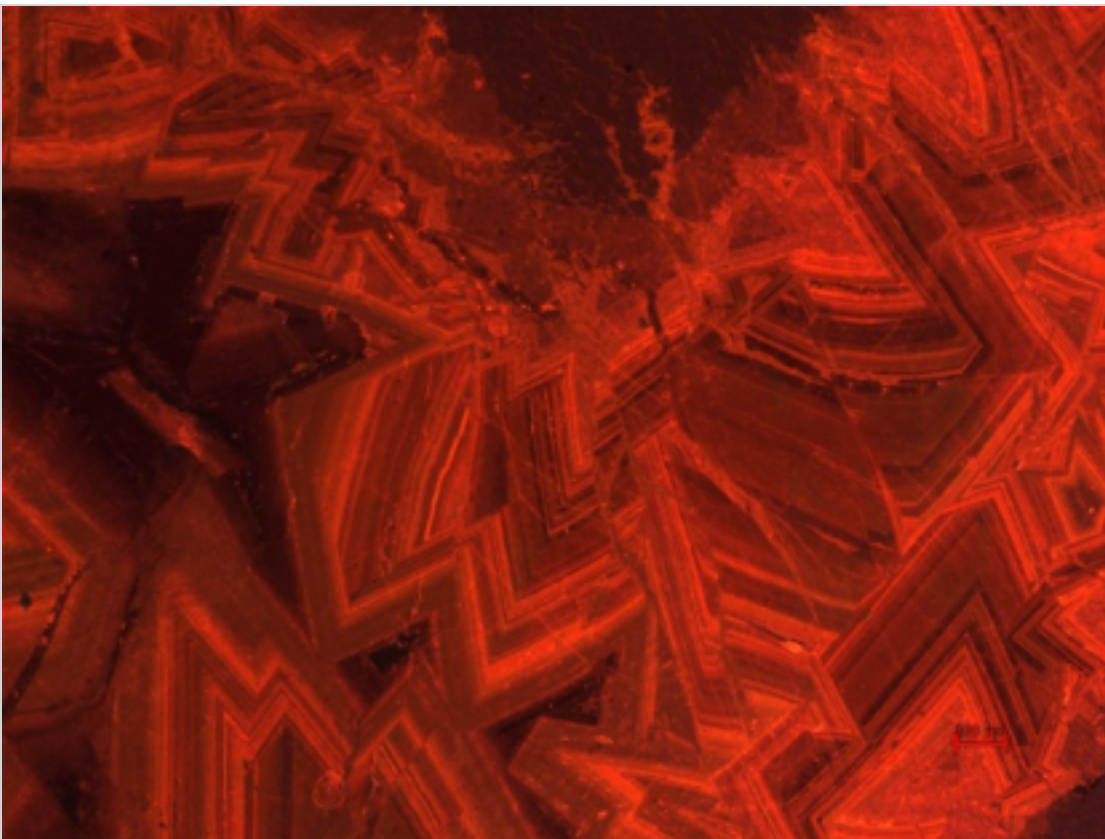
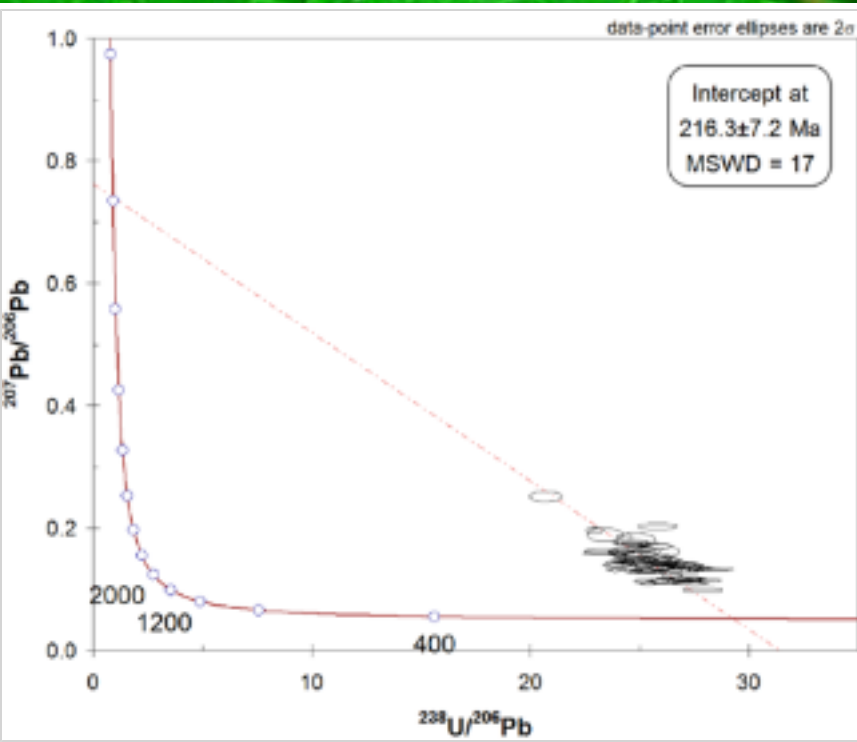


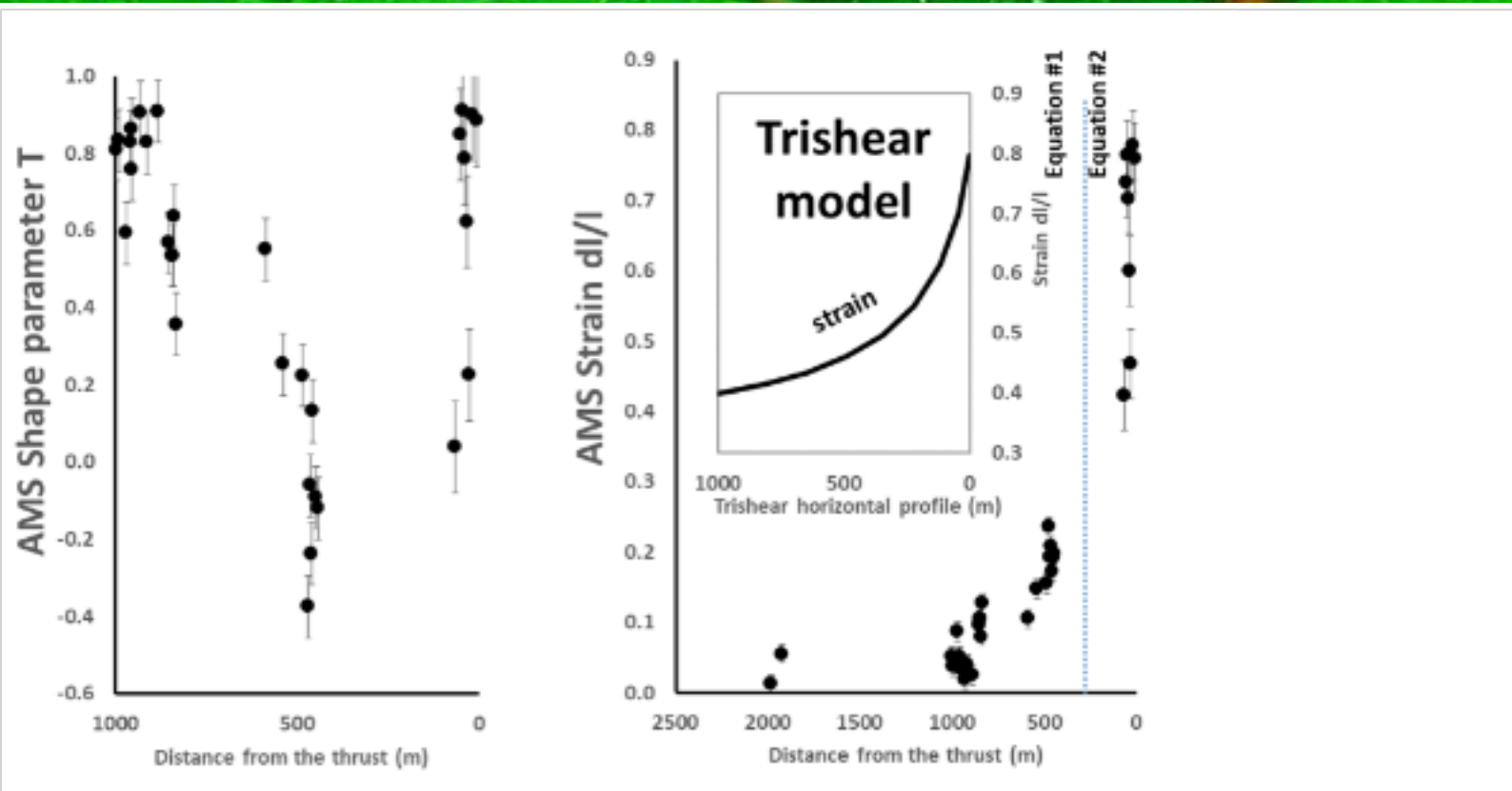
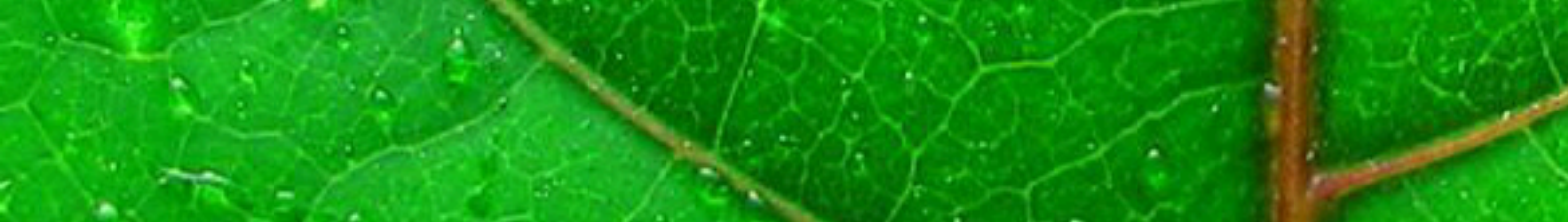
Image cathodoluminescence de ciments dolomitiques dans une brèche tectonique (carbonates du Jurassique sup., Chaînons béarnais)



Exemple de datation de calcite par méthode U-Pb (diagramme Tera-Wasseburg)

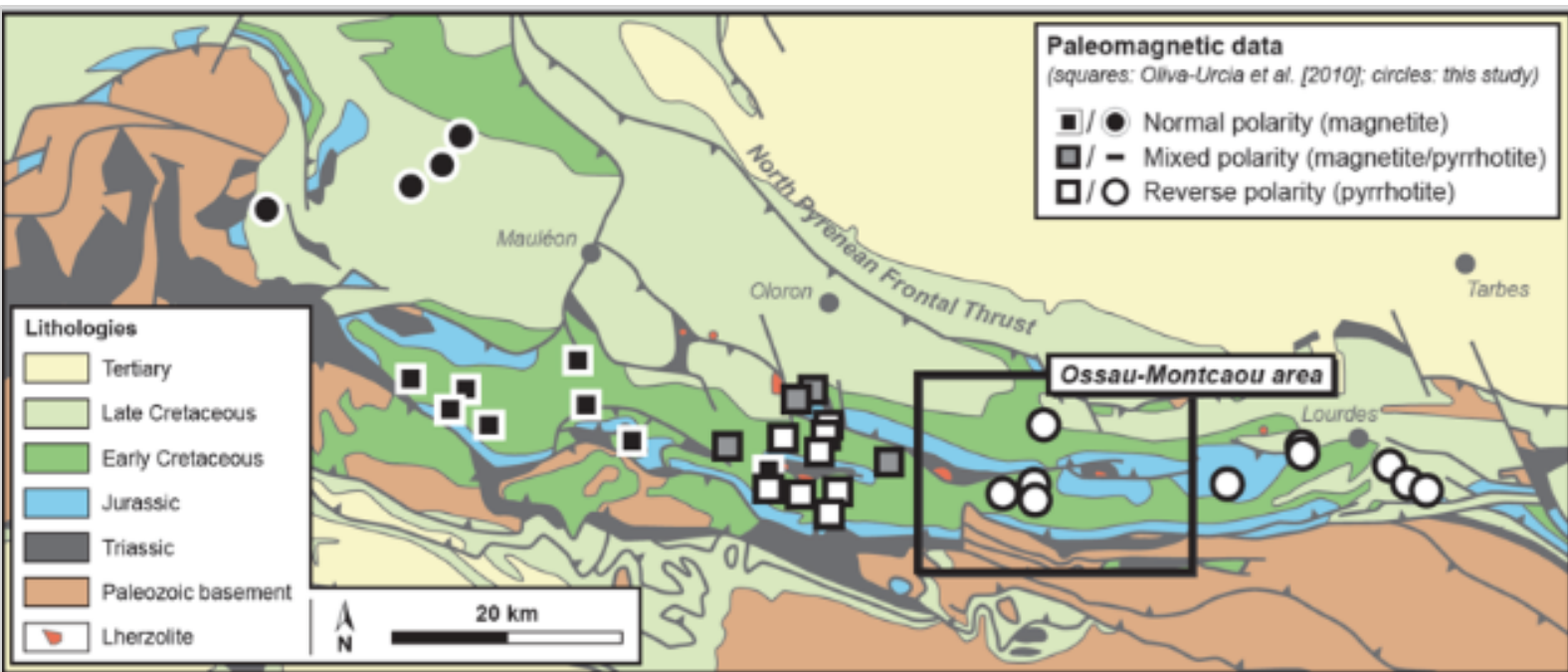
C) Quantification des processus et des conditions de déformation

a) Endommagement matriciel des roches réservoirs. L'endommagement d'une roche réservoir se traduit par un changement des propriétés de la matrice, et par le développement de structures à plus grande échelle, alliant bandes de compaction, fracturation, schistosité, et failles. Nous avons identifié un chantier à Sigües (Aragon) où les conditions de terrain exceptionnelles permettent de suivre à l'échelle du banc un gradient d'endommagement. Dans ce projet, un grand nombre de techniques ont été utilisées pour caractériser la déformation matricielle (anisotropie de susceptibilité magnétique pour la fabrique des argiles, micro-tomographie pour la fabrique du quartz et de la calcite, FIB-SEM, MEB, diffraction des rayons X) ainsi que des études de terrain pour comprendre l'origine de ces déformations.



Fabrication des argiles mesurée avec l'anisotropie de susceptibilité magnétique (ASM). A gauche : évolution du paramètre de forme T par rapport à la distance de la faille. A droite : déformation (dl/l) modélisée en prenant l'hypothèse d'une rotation rigide des argiles (Aubourg et al., AAPG, 2018)

b) Paléo-topographie des domaines sédimentaires de marges étirées. Les Chainons Béarnais, reliques de la série sédimentaire développée sur la marge hyper-étirée et chaude du Nord Pyrénéen, sont considérés comme peu déformés par l'orogène pyrénéen. Une approche thermique (spectroscopie Raman), paléomagnétique, et de terrain, permet de contraindre la paléo-structure des Chainons Béarnais et de valider l'hypothèse d'une structuration précoce durant le développement de la marge passive. Par ailleurs, notre approche permet de cartographier les secteurs qui ont été rejeués pendant la compression pyrénéenne et de contraindre le mode de fermeture d'une marge hyper étirée.



Carte montrant la localisation des données paléomagnétiques montrant le type de minéral (magnétite, et pyrrhotite) et la polarité enregistrée (Menant et al., RST, 2016).

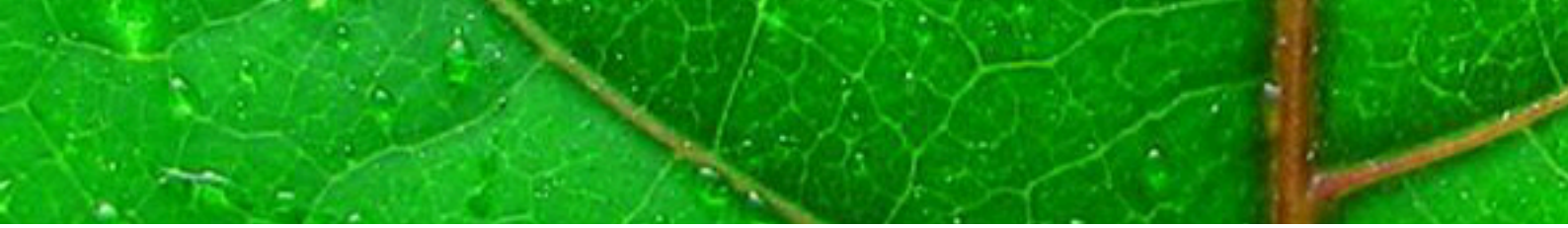
D) Approche multi-physique de la propagation d'ondes en laboratoire

Il s'agit ici de reproduire à l'échelle du laboratoire l'analogie des outils utilisés en prospection géophysique à l'échelle du terrain. Les activités expérimentales tournent autour de la propagation d'ondes mécaniques ou électromagnétiques dans des milieux poreux consolidés (roches naturelles) ou non (sable), de tailles variables (cm à m), de nature homogène à très hétérogène (fracturée par exemple).

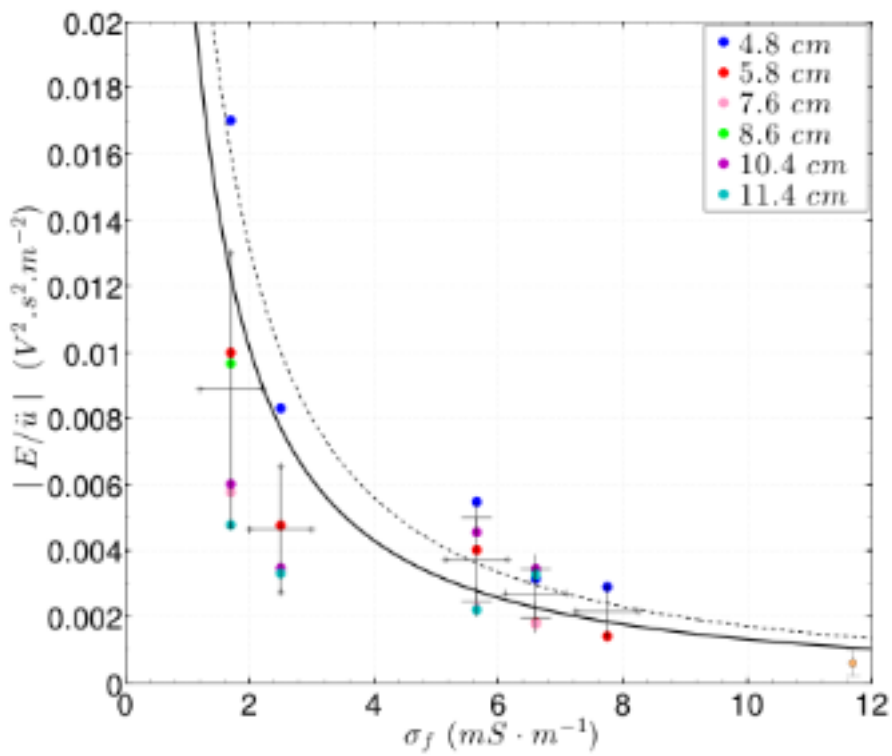
Des sources sismiques de différents types sont utilisées en laboratoire : mécanique (piston), sonore (haut-parleurs), ultrasonore (piézoélectrique), laser (laser pulsé). Cette grande variété de sources nous permet de travailler sur une grande gamme de fréquence (100 Hz à 5 MHz) en mono-fréquentiel ou en large bande. Les déplacements sismiques engendrés sont mesurés par des transducteurs piézoélectriques ou bien par un vibromètre laser utilisant le principe de l'interférométrie. L'équipe a également développé ces dernières années des expérimentations originales permettant l'observation des effets sismoélectriques accompagnant l'onde sismique dans les milieux poreux. Les mesures électromagnétiques sont réalisées quant à elles à l'aide d'antennes radar très haute fréquence (GHz).

L'objectif en laboratoire est également de réaliser des mesures très hautes résolutions (en temps et en espace) de la propagation d'onde dans des milieux contrôlés et de les comparer ensuite à des simulations numériques directes. Le but, à terme, est d'utiliser le champ d'onde complet enregistré et d'aller vers l'inversion de formes d'ondes complètes, qu'elles soient d'origines mécanique ou électromagnétique.

Enfin, cette approche à l'échelle du laboratoire revêt encore davantage d'intérêt si les résultats expérimentaux sont extrapolés vers la très petite échelle (micro-, downscaling) ou vers la grande échelle (macro-, upscaling, échelle du réservoir). Le travail multi-échelle liant laboratoire et terrain conduisant au changement d'échelle est un objectif majeur de la caractérisation géophysique des réservoirs.

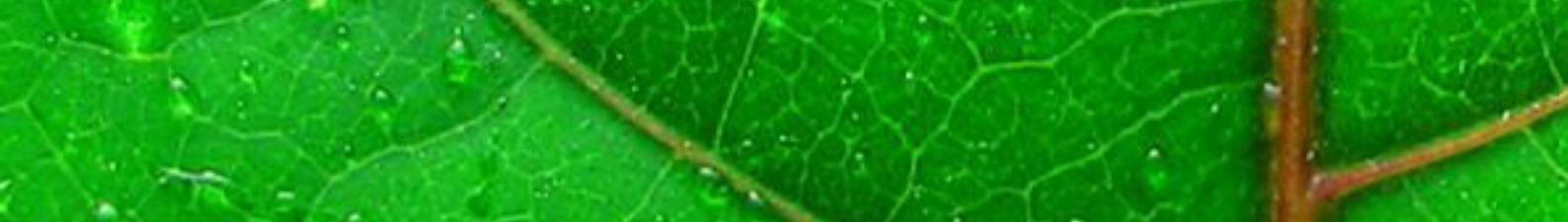


Électrodes mesurant des différences de potentiels électriques dans des expériences sismo-électriques réalisées dans un sable partiellement saturé en eau (Holzhauer et al., 2015).



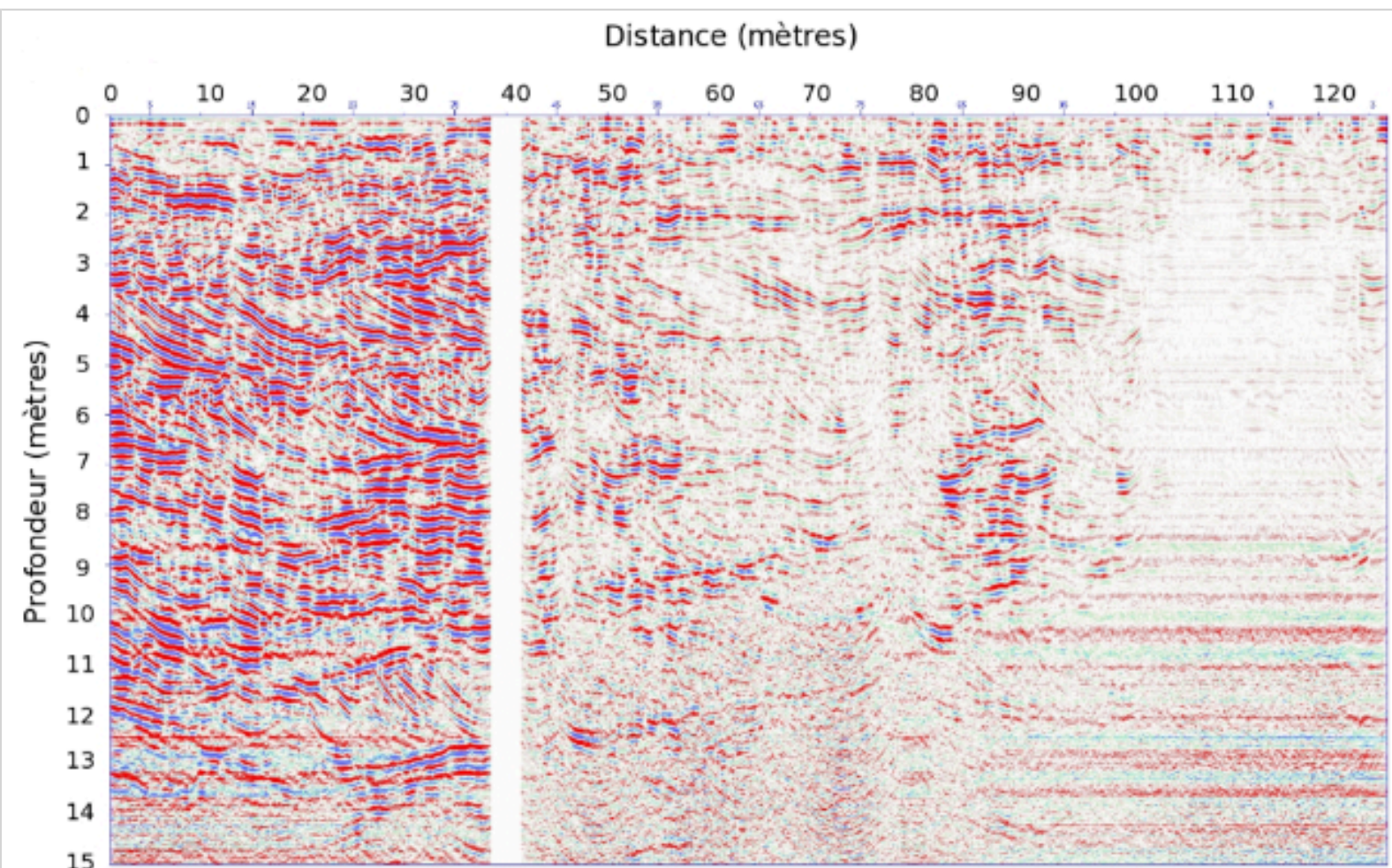
Fonction de transfert E/\ddot{u} mesurée expérimentalement en fonction de la conductivité du fluide du milieu poreux (Holzhauer et al., 2015).

E) Caractérisation géophysique de site



Les travaux menés dans le cadre de la thématique « caractérisation géophysique de sites » ont pour objectif d'étudier la variation spatiale et/ou temporelle des propriétés physiques du sous-sol (i.e. fracturation, teneur en eau, etc.). Les projets de recherche reposent systématiquement sur des données acquises sur site, que ce soit en surface, en tunnel/cavités ou en puits. Les moyens matériels de l'équipe permettent d'envisager des investigations à l'échelle hectométrique et concernent pour l'essentiel les méthodes sismiques dites « haute résolution » et le radar. En fonction des objectifs les méthodes électriques (tomographie électrique, ERT) viennent compléter nos mesures.

Au-delà des objectifs d'imagerie (voir figure radar ci-dessous) permettant de caractériser le contexte géologique, structural (stratigraphie, fracturation, ...) nos travaux s'appuient aussi sur l'évolution temporelle des paramètres mesurés, tel que la vitesse des ondes EM, particulièrement sensible à la teneur en eau.

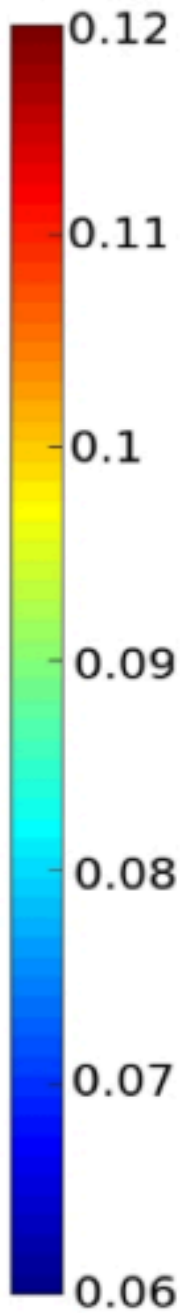


Exemple de section radar permettant d'imager la stratification en milieu calcaire.

Ainsi, l'analyse de l'évolution des modèles de vitesse EM obtenus via des tomographies de temps de propagation (voir figure vitesse EM) permet d'appréhender la circulation de l'eau dans un milieu présentant une certaine porosité.



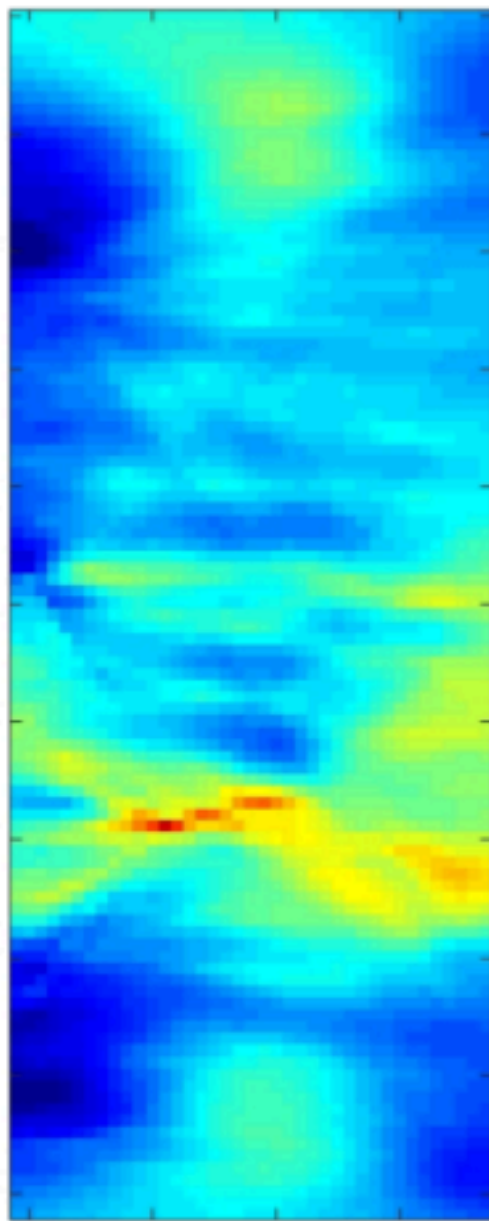
Velocity
(m/ns)



F5

E

F6

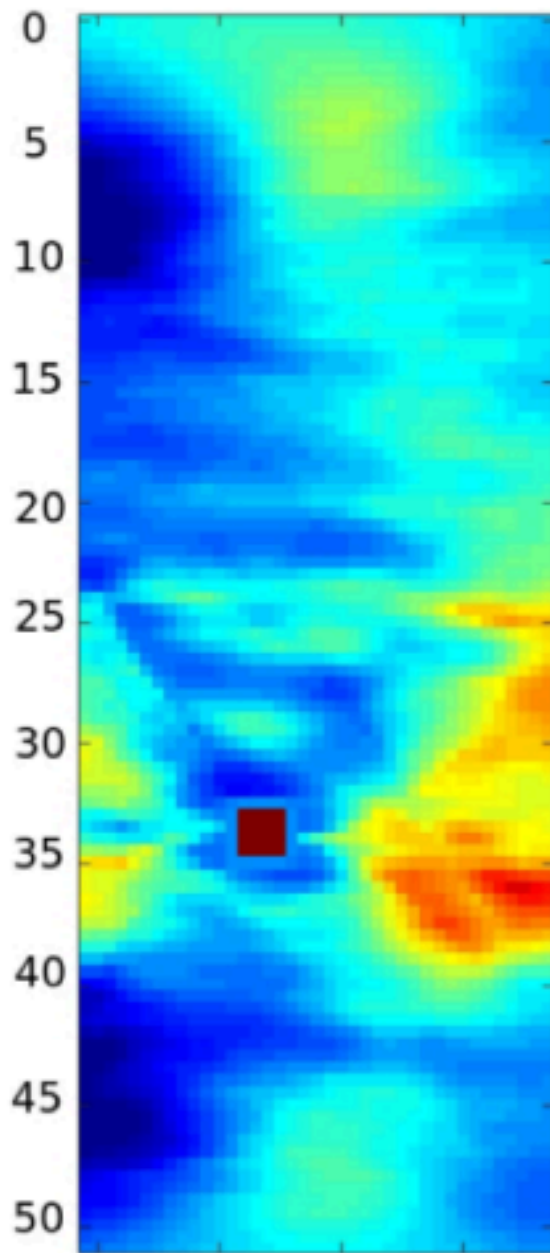


Distance (m)

F5

F

F6



Distance (m)

Exemple de modèles de vitesse EM (tomographie entre puits) en milieu karstifié.

Les projets menés au sein du laboratoire concernent la caractérisation d'analogues de réservoirs carbonatés mais notre capacité à imager et caractériser le sous-sol dans la tranche 0-200 m nous amène à nous impliquer dans des projets portant sur des objectifs très variés (objectifs environnementaux, sites archéologiques, risque sismique, géoressources, ...).

Membres permanents du groupe



Charles AUBOURG | 🏠 PR

Nicolas BEAUDOIN, Chaire junior E2S-UPPA (2018-2022)

Cédric BONNEL, MC

Clarisse BORDES, MC

Daniel BRITO | 🏠, MC HDR

Jean-Paul CALLOT | 🏠, PR, Chaire de Géologie structurale

Thibaut de L'HAMAIDE, PAST

Guilhem HOAREAU | 🏠, MC, Chaire CNRS

Isabelle MORETTI, chercheur E2S (2019-2021)

Bertrand NIVIERE, MC

Dominique ROUSSET, MC

Federici SANJUAN, IR CNRS

Guy SENECHAL, MC

Doctorants

Yacine KICHE (2016-2019)

Chengyi SHEN (2016-2019)

Arthur BLOIN (2016-2019)

Geoffrey MOTTE (2017-2020)

Pierre-Alexandre GRIGNARD (2017-2020)

Naïm CELINI (2017-2020)

Gulce DINC (2017-2020)

Bruno LECLERE (2017-2020)

Philippine RUTMAN (2017-2020)

Marion BURGIO (2016-, doctorante au GET UMR5563)

Victor MARTINS-GOMES (2018-2021)

Abishek BASA (2018-2021)

Post-doctorants



Edouard LE GARZIC

Guillaume BARRE

Eider HERNANDEZ BILBAO

Alexandre PICHAT

Esther IZQUIERDO LLAVALL

Etienne LEGEAY

Nathalie ETHEVE

Maxime DUCOUX

Stephen CENTRELLA

Jessica SAIAG

Matthieu BRANELLEC