



**CFMR**  
COMITÉ FRANÇAIS  
DE MÉCANIQUE  
DES ROCHES

*Séance technique*  
10 octobre 2024  
Ecole des Mines de Paris  
*60 bd Saint-Michel*

# Poromécanique et La physique des roches

*Organisée par :*  
Siavash Ghabezloo (Laboratoire Navier, Ecole des Ponts)

**14:00 Jianfu Shao (Université de Lille)**

Modélisation micromécanique de l'endommagement et de la fissuration dans les matériaux poreux saturés de type rocheux

**14:30 Laurent Brochard (Laboratoire Navier, Ecole des Ponts)**

Prise en compte de l'eau liée dans la modélisation thermo-poro-mécanique des argiles gonflantes

**15:00 Lucas Pimienta (Université de Lausanne)**

Des propriétés hydrauliques et mécaniques au couplage hydromécanique dans les roches poreuses : Le rôle caché de la microstructure

**15:30 Pause**

**16:00 Elisabeth Bemer (IFPEN)**

Impact des méthodes expérimentales sur les différences observées entre modules élastiques statiques et dynamiques

**16:30 Augustin Thomas (BRGM)**

Caractérisation des propriétés poro-élastique d'aquifères fracturés à l'aide de signaux de marée : étude de terrain en Martinique

**17:00 Discussion**



**CFMR**

COMITÉ FRANÇAIS  
DE MÉCANIQUE  
DES ROCHES

## **Micromechanics-based modeling of damage and cracking in saturated rock-like porous materials**

**Jian-Fu Shao<sup>1</sup>, Lun-Yang Zhao<sup>2</sup>, Qi-Zhi Zhu<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>University of Lille, CNRS, Centrale Lille, LaMcube, UMR9013, Lille, France

<sup>2</sup>State Key Lab. of Subtropical Building Science, South China Univ. of Technology, Guangzhou, China

<sup>3</sup>Key Lab. of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai Univ., Nanjing, China

This work is devoted to modeling of induced damage and localized cracking in rock-like saturated porous media by considering coupling between microcrack growth and frictional sliding. The objective is to describe the progressive transition from diffuse microcracks to localized macrocrack. By using analytical homogenization procedure, the macroscopic poroelastic relations for cracked materials are first established for open microcracks. For closed frictional microcracks, the homogenization method is combined with the thermodynamics framework. The driving forces for microcrack growth and frictional sliding are identified by taking into account fluid pressure effect. The transition from diffuse microcracks to localized macroscopic cracks is further investigated when the damage density reaches the critical value. The evolution law of localized cracks is then determined. The displacement discontinuities across localized cracks are taken into account. A series of application examples are presented. Comparisons between numerical results and experimental data are presented from both drained and undrained laboratory tests.

## **Impact des méthodes expérimentales sur les différences observées entre modules élastiques statiques et dynamiques**

**Elisabeth Bemer, Noalwenn Dubos-Sallée, Valérie Poitrineau**

IFPEN, Ruel-Malmaison

La caractérisation de l'injectivité et de l'intégrité à long terme d'un site de stockage de CO<sub>2</sub> requiert de simuler le transport du CO<sub>2</sub> et son impact sur le comportement mécanique de la roche hôte et des formations environnantes à l'aide d'un modèle numérique intégrant la variabilité des propriétés hydromécaniques au sein des différents faciès. Les vitesses des ondes élastiques sont disponibles à différentes échelles et fournissent donc des données clés pour l'extrapolation des propriétés élastiques, à condition de pouvoir relier les modules élastiques dynamiques aux modules statiques.

A l'échelle du laboratoire, les modules élastiques statiques sont classiquement mesurés via des essais triaxiaux et les modules élastiques dynamiques sont obtenus via des mesures des vitesses de propagation d'ondes ultrasoniques. Les écarts observés peuvent avoir différentes origines physiques liées aux conditions expérimentales et à la roche étudiée. Cependant, certains écarts sont en fait attribuables aux méthodes de mesure utilisées. Une approche expérimentale permettant une comparaison cohérente entre les modules élastiques statiques et dynamiques est ainsi proposée.



**CFMR**  
COMITÉ FRANÇAIS  
DE MÉCANIQUE  
DES ROCHES

## Addressing bound water in the thermo-poro-mechanical modeling of swelling clays

**Laurent Brochard**

Laboratoire Navier (École des Ponts, Univ. Gustave Eiffel, CNRS)

Swelling clays are well-known for their very large deformations induced by changes in humidity. However, the unusual mechanical behavior of clays is not limited to drying shrinkage, and many other mechanical anomalies have been reported. In this work, we investigate specifically two thermo-mechanical anomalies: 1- the excessive thermal pressurization of interstitial water during undrained heating, and 2- the very large drained thermal expansion of over-consolidated clays. These anomalies are usually attributed to bound water, that is, the water molecules adsorbed at the surface of the nanometric clay particles. Yet, a consistent thermo-poro-mechanical modeling relating adsorption and macroscopic observation remains a challenge, and, in this work, we revisit the usual poromechanics to propose a model that can quantitatively explain the two anomalies.

The main challenge to model clay-water interactions is that the thermo-mechanical behavior of an adsorbed fluid differs from that of a bulk fluid. In particular, there is a pressure difference between bound water and free water even though the two fluids are in osmotic equilibrium, and this difference is called the disjoining pressure. Understanding and modeling the adsorption-induced effects require a fine description of how the disjoining pressure evolves upon thermo-chemo-mechanical changes. In this respect, recent advances in realistic molecular simulation of clays offer unprecedented details about the behavior of bound water at a scale inaccessible to mechanical testing. In particular, it is possible to show that the usual thermo-mechanical properties (compressibility, thermal expansion, heat capacity) are significantly affected by adsorption. And, even more confusing, one finds that Gibbs-Duhem does not apply, which means that the behavior of the adsorbed fluid is no more extensive with the number of particles, and a total of 6 moduli are necessary to fully characterize the thermo-mechanical behavior of bound water. This conceptual change calls for an entirely new formulation of poromechanics. We propose such a formulation of non-linear thermo-poro-mechanics.

Application of the new theory provides good quantitative estimates of the two thermo-mechanical anomalies of clays. Moreover, the fine analysis of these tests is quite instructive regarding the underlying physics. For instance, the excess thermal pressurization of water during undrained heating is not because bound water has a larger thermal expansion than free water (it is smaller actually), but because there is a net transfer from the bound water to the free water.



**CFMR**  
COMITÉ FRANÇAIS  
DE MÉCANIQUE  
DES ROCHES

## **Caractérisation des propriétés poro-élastique d'aquifères fracturés à l'aide de signaux de marée : étude de terrain en Martinique**

**Augustin Thomas**

BRGM, Orléans

Comment les propriétés des aquifères évoluent-elles au cours du temps? Les propriétés des aquifères, qu'elles soient hydrogéologiques (perméabilité et coefficient de stockage) ou mécaniques (modules élastiques ou poro-élastiques) sont généralement considérées constantes aux échelles de temps humaines. Toutefois, des événements naturels extrêmes (séismes, pluies intenses), ou mêmes anthropiques (pompage ou injection importante de fluide) peuvent modifier ces propriétés. L'objectif de ces travaux a consisté à la fois à quantifier les propriétés des aquifères fracturés de Martinique et leur évolution, ainsi qu'à chercher à comprendre les processus sous-jacents qui expliquent ces changements. Une méthodologie reposant sur la technique d'analyse des signaux de marées observées dans les forages a été développée. A partir d'une analyse des séries piézométriques disponibles depuis 2007 en Martinique grâce au réseau mis en place par le BRGM, ainsi que le développement de modèles hydrogéologiques adaptées aux caractéristiques et à la géométrie des aquifères étudiés, les propriétés de différents aquifères ont pu être inversées.

En particulier sur le site du Galion, la combinaison de l'analyse de la marée terrestre et atmosphérique ont permis pour la première fois l'inversion de la perméabilité ainsi que du module élastique de cisaillement, ainsi que leur évolution sur 15 ans. La paramétrisation du modèle poro-élastique a été une des clés pour parvenir à cet objectif. Les chroniques obtenues ont permis une meilleure compréhension de l'effet des contraintes dynamiques (ondes sismiques) et statiques (contrainte effective) sur les propriétés de l'aquifère.

## **Des propriétés hydrauliques et mécaniques au couplage hydromécanique dans les roches poreuses : Le rôle caché de la microstructure**

**Lucas Pimienta**

Université de Lausanne, Institute of Earth Sciences  
Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Génie Civil

L'injection de fluides dans des réservoirs géologiques, ou dans le laboratoire, génère déformations et contraintes dictées par un couplage hydromécanique. Il prédit quand et comment une roche saturée homogène répondra à une variation de pression effective. Ce couplage se déduit linéairement de ses propriétés hydrauliques et mécaniques effectives intrinsèques, mesurées indépendamment et elles aussi valides à l'échelle du Volume Élémentaire Représentatif (VER): Les propriétés hydrauliques déterminent l'échelle de temps de la déformation, dont la magnitude est dictée par ses propriétés mécaniques.

De récents travaux, d'effets d'injections fluides sur la fracturation et – parallèlement – d'études des compressibilités de squelette, ont néanmoins été rapportés poussant des théoriciens à questionner les concepts de micro-homogénéité poroélastique du VER. Ici, suivant la poroélasticité classique, nous discuterons comment le protocole expérimental lors de telles mesures pourrait être affecté par un simple biais de ce couplage hydro-mécanique dans des roches poreuses.