



**CFMR**

**COMITE FRANCAIS DE MECANIQUE DES ROCHES**

[www.cfmr-roches.org](http://www.cfmr-roches.org)

**le cnam**  
école sciences industrielles &  
technologies de l'information

## INVITATION

Séance Technique

### **Avancées récentes sur les approches multi-échelles en mécanique des roches**

jeudi 19 mars 2015

CNAM

292 bd St-Martin, 75003 PARIS

- 14 : 00**      **Accueil des participants : *Frédéric Pellet* (CFMR)**
- 14 :05**      **Introduction à la thématique : *Jean Sulem*, Laboratoire Navier-CERMES, Ecole des Ponts ParisTech**
- 14 :15**      **Modélisation double échelle FEM-DEM pour les matériaux frottants-cohérents.**  
*Jacques Desrues, T.K. Nguyen, Grenoble-INP, UJF, CNRS UMR5521, Laboratoire 3SR*
- 14 :45**      **Numerical modelling from laboratory to in situ scale: some examples.**  
*Marco Barla, Dept. of Structural, Geotechnical and Building Engineering, Politecnico di Torino*
- 15:15**      **Micromécanismes actifs dans le sel gemme : quantifications expérimentales pour une modélisation pertinente.**  
*M. Bornert, A. Dimanov, J. Raphanel, A. Gaye, M. Bourcier, E. Heripre, D. Picard, W. Ludwig, LMS, Ecole Polytechnique*
- 15:45**      **Pause café**
- 16:00**      **Propriétés poroélastiques de roches calcaires oolithiques.**  
*Albert Giraud, Dragan Grgic, Laboratoire GéoRessources, ENSG-Université de Lorraine, Nancy*
- 16 :30**      **Développement d'une méthodologie de construction des modèles numériques de roche par approche particulière.**  
*Marianne Peter-Borie, Arnold Blaisonneau, Sylvie Gentier, Théophile Guillon, Xavier Rachez, BRGM, Orléans*
- 17 : 00**      **Discussion**
- 17 : 30**      **Fin de la séance**



### MODELISATION DOUBLE ECHELLE FEM-DEM POUR LES MATERIAUX FROTTANTS-COHERENTS

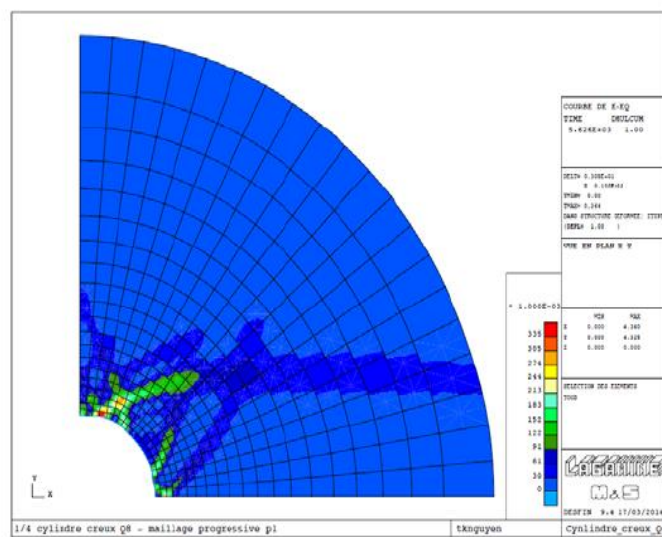
J. Desrues\*, T.K. Nguyen \* †

\* Grenoble-INP, UJF, CNRS UMR5521, Laboratoire 3SR, Email: jacques.desrues@3sr-grenoble.fr

† actuellement à : BRGM, Direction Risques et Préventions

**Résumé :** La modélisation numérique multi-échelle, qui utilise *en parallèle* une approche numérique de l'homogénéisation du comportement micro-structural des matériaux pour définir leur réponse constitutive macroscopique, et une méthode numérique classique du type éléments finis à l'échelle de la structure macroscopique, se développe depuis quelques années dans le domaine de la géomécanique[1,2,3]. Les roches peuvent souvent être considérées comme des milieux granulaires dotés de cohésion entre leurs grains, et dans ce cas une approche mettant en oeuvre la méthode des éléments discrets (DEM) à l'échelle micro avec une méthode d'éléments finis (FEM) à l'échelle macro peut être considérée comme physiquement cohérente. Dans une telle approche, on attache à chaque point d'intégration (points de Gauss) du modèle FEM « macro » un problème aux limites périodiques « micro » qu'on résout par DEM, dont la réponse (c'est-à-dire l'état de contrainte associé à une histoire de déformation pour un volume élémentaire représentatif – VER – associé au point d'intégration considéré) est utilisé par le code FEM comme l'est usuellement le résultat de l'intégration d'une loi de comportement. Un avantage significatif d'une telle approche est qu'elle permet de prendre en compte le comportement micro-structural à l'échelle pertinente, c'est-à-dire celle des grains, tout en traitant le problème de structure (excavation, pente, forage, tunnel ...) à sa propre échelle. Une utilisation directe des éléments discrets avec des grains de taille réelle conduit généralement à une impasse en raison du nombre astronomique de grains à prendre en compte –sauf cas particuliers de structures d'extension limitée impliquant des grains « gros » comparativement, par exemple les ballast de voies ferrées. Dans une telle approche, les caractéristiques de comportement liées à la micro-structure, tels que l'anisotropie acquise sous l'effet de la déformation, ou encore l'adoucissement lié par exemple à la dilatance ou à l'altération de la cohésion au niveau des contacts individuels, découlent naturellement de l'évolution du VER microscopique attaché à chaque point d'intégration du modèle macroscopique.

Une implémentation du modèle FEM-DEM dans un code élément fini généraliste (code Lagamine de l'Université de Liège) est présentée et différents résultats sont discutés, notamment l'émergence spontanée de la localisation de la déformation au niveau de la structure macroscopique.



### Références

- [1] Nitka M., Combe G., Dascalu C., Desrues J. Two-scale modeling of granular materials: a DEM-FEM approach, Granular Matter vol.13 No 3, pp. 277-281, (2011)
- [2] Nguyen T.K., Combe G., Caillerie D., Desrues J. FEM x DEM modelling of cohesive granular materials: numerical homogenisation and multi-scale simulation, Acta Geophysica vol.62 No 5, pp. 1109-1126, (2014)



[3] Guo Ning and Zhao Jidong. A coupled FEM/DEM approach for hierarchical multiscale modelling of granular media. International Journal for Numerical Methods in Engineering 99.11, 789-818 (2014)

## NUMERICAL MODELLING FROM LABORATORY TO IN SITU SCALE: SOME EXAMPLES

Marco Barla, Dept. of Structural, Geotechnical and Building Engineering, Politecnico di Torino, E-mail: marco.barla@polito.it

**Abstract:** Numerical modelling is an important tool for the rock engineer. The numerical methods are nowadays effectively adopted both at the design stage as well as during construction and performance monitoring (e.g. observational method). Different methods are available and can be grouped in two main families:

- Methods based on the discretisation of the only contour of the problem (BEM)
- Methods based on the discretisation of the full volume of the problem (FEM, FDM, DEM, FDEM).

Numerical analyses can be conducted in 2D or 3D conditions and can be adopted to solve diverse rock engineering problems. The choice on the method to be adopted is crucial and depends on the problem itself, on its complexity and on the information and available knowledge on rock mass conditions and properties.

For problems in which large-scale phenomena of interest (e.g. rock slides) are strongly influenced by processes occurring at much smaller scales (e.g. fracture propagation), executing exhaustive simulations including the processes at the smallest scales for a domain of engineering significance, is currently impractical, and likely to remain so for a very long time. To face this, numerical methods may be used with a multi-scale approach combining multiple models defined at fundamentally different length scales within the same overall spatial domain. For example, a small-scale model with high resolution can be utilized in a fraction of the overall domain and linked to a large-scale model with coarse resolution over the remainder of the overall domain, providing necessary efficiency of characterization and computation that will render solution of these problems practical.

This presentation will illustrate a multi-scale approach with the application to three rock-engineering examples. The first example will deal with the mechanical characterisation of a cemented alluvial deposit, performed by means of laboratory and in situ testing as well as FEM and DEM numerical modelling at the volume element scale. The small scale modelling allowed determining the mechanical parameters as a function of the degree of cementation of the ground. These are then used at the in situ scale for design and analysis of tunnels.

In the second example, tunnelling in a squeezing rock mass is addressed. The analysis of time dependent behaviour at laboratory scale is shown to be fundamental in understanding the behaviour of the rock mass at the in situ scale. The third example will show an application of multi-scale analysis with the FDEM for a slope stability problem, where the fracture mechanism studied at the laboratory scale allow for efficient simulation of large rock slides.

## MICROMECHANISMES ACTIFS DANS LE SEL GEMME : QUANTIFICATIONS EXPERIMENTALES POUR UNE MODELISATION PERTINENTE

M. Bornert<sup>(\*)</sup>, A. Dimanov<sup>(\*\*)</sup>, J. Raphanel<sup>(\*\*)</sup>, A. Gaye<sup>(\*)</sup>, M. Bourcier<sup>(\*\*)</sup>, E. Heripre<sup>(\*\*)</sup>, D. Picard<sup>(\*\*)</sup>, W. Ludwig<sup>(\*\*\*)</sup>,

(\*) Laboratoire Navier, Marne-la-Vallée,

(\*\*) Laboratoire de Mécanique des solides, Ecole Polytechnique, Palaiseau

(\*\*\*) Laboratoire MATEIS, Insa de Lyon

**Résumé :** La formulation pertinente d'une loi de comportement représentative du comportement des matériaux reste un enjeu majeur pour garantir la capacité prédictive des calculs numériques de structures, notamment lorsque l'on considère des réponses à long terme, ou sous des modes de sollicitation difficilement accessibles à l'expérimentation en laboratoire. Dans ce contexte, les approches multiéchelles reposant sur la connaissance des mécanismes physiques élémentaires actifs à l'échelle d'un grain constitutif et l'utilisation de lois de changement d'échelle adéquates peuvent être une réponse. Le comportement de la halite a fait et fait encore l'objet de nombreuses études dans ce sens, notamment en vue d'applications de stockage en cavités souterraines. Les modèles proposés reposent pour la plupart sur la connaissance des mécanismes de glissement plastique intracristallins, étudiés par exemple sur des monocristaux sous diverses conditions thermodynamiques. Il s'avère toutefois qu'une prévision raisonnable des réponses macroscopiques reposant sur ces seuls mécanismes de glissement cristallin conduit à des contradictions sur la nature des systèmes activés et/ou les valeurs de leurs paramètres constitutifs. On montrera dans cet exposé comment une analyse expérimentale quantitative à l'échelle d'un ensemble de grains constitutifs, combinant expérimentation in situ



sous MEB ou tomographe, à température ambiante et haute température, et traitement d'image par corrélation, permet de revisiter ces hypothèses de modélisation. On établit en particulier, d'une part, l'importance d'un mécanisme de déformation par glissement aux joints de grains, qui, certes secondaire en termes de contribution globale à la déformation, s'avère indispensable à l'écoulement ductile macroscopique. D'autre part, l'analyse permet aussi une quantification des contributions relatives de mécanismes de glissement plastique et de leurs conditions d'activation au sein du polycristal. Cette vision rénovée du comportement de cette roche est plus généralement susceptible d'expliquer certaines observations paradoxales et illustre le danger potentiel d'une extrapolation hâtive.

## PROPRIETES POROELASTIQUES DE ROCHES CALCAIRES OOLITHIQUES

*Albert Giraud, Dragan Grgic, Laboratoire GéoRessources, ENSG-Université de Lorraine, Nancy*

**Résumé :** Les roches calcaires sont étudiées, notamment, dans le cadre des recherches relatives au projet de stockage géologique de CO<sub>2</sub>, et dans le cadre de problèmes d'ingénierie de réservoirs pétroliers.

On s'intéresse en particulier aux roches calcaires poreuses dites oolithiques, composées de grains poreux de forme quasi sphérique ou ovoïde (les oolithes) et de fraction variable suivant le faciès géologique de matériau de remplissage intergranulaire : ciment sparitique, pores, fissures etc.

Les propriétés poroélastiques effectives de ces matériaux hétérogènes dépendent des caractéristiques microstructurales : fractions volumiques des constituants, porosités inter et intra granulaires, fissures etc. Les approches micromécaniques permettent de caractériser ces relations et d'obtenir des estimations des propriétés effectives.

On présente tout d'abord les principales caractéristiques microstructurales de ces matériaux ainsi qu'une synthèse de résultats expérimentaux obtenus sur les propriétés poroélastiques.

La seconde partie de l'exposé présente des applications de modèles micromécaniques développés dans le cadre des approches de type sphères composites de Hashin (CSA).

L'impact, sur le comportement macroscopique, des matériaux de remplissage inter granulaires ainsi que de la couche de transition entourant les oolithes (similaire à l'ITZ, Interfacial Transition Zone) semble essentiel. Les travaux en cours portent sur la caractérisation (micro indentation, nano indentation), des propriétés élastiques des constituants ainsi que sur l'amélioration des modèles microstructuraux.

## DEVELOPPEMENT D'UNE METHODOLOGIE DE CONSTRUCTION DES MODELES NUMERIQUES DE ROCHE PAR APPROCHE PARTICULAIRE

*Mariane Peter-Borie, Arnold Blaisonneau, Sylvie Gentier, Théophile Guillon, Xavier Rachez, BRGM, Orléans, m.peter@brgm.fr*

**Résumé :** Dans les domaines de la géothermie, du stockage géologique du CO<sub>2</sub> ou encore de l'exploitation de gaz dans des réservoirs non conventionnels, les phénomènes physiques mis en jeu lors des différentes phases de la gestion du réservoir peuvent être à l'origine d'un endommagement de la roche à proximité du puits. La mise en œuvre d'une approche DEM (modèle particulaire) est adaptée pour modéliser les ruptures se produisant à l'échelle des grains, et apporter des réponses dans l'analyse de l'endommagement des roches sous diverses sollicitations.

Le travail de construction du modèle numérique de roche, constitue, aujourd'hui, une véritable difficulté dans l'utilisation des logiciels de modélisation par une approche particulaire. En particulier, la pertinence des résultats de ces modélisations dépend en grande partie de la capacité à conceptualiser la roche (association des différents constituants de la roche et des objets numériques). Une attention particulière est portée au choix de l'échelle dite micro des particules. Suivant l'échelle du problème, la nature des roches et le phénomène étudié, la particule numérique peut représenter soit un grain/minéral d'une roche grenue, soit un volume homogénéisé de la roche. Les propriétés physiques, mécaniques et thermiques attribuées aux particules sont alors à mettre en cohérence avec le choix des constituants élémentaires de la roche modélisés, tout en reproduisant un comportement dit macroscopique cohérent. La méthodologie développée de construction du modèle numérique de roche sera présentée.

Un exemple d'application sera présenté pour illustrer l'apport potentiel de cette approche. Cet exemple portera sur la modélisation à l'aide du code PFC2D (©Itasca) de phénomènes thermo-mécaniques induits par l'injection d'un fluide froid dans une roche hôte plus chaude.