



**Comité Français de Mécanique des Roches
Comité Français de Mécanique des Sols**



Séance Technique du 25 octobre 2018

**Microstructure des géomatériaux argileux
– conséquences pour l'ingénieur**

CNAM, 292 rue Saint-Martin 75003 Paris, Amphi J-B Say

le cnam

EPN 1 - Bâtiment et énergie
Équipe Géologie Géotechnique

(Entrée libre et gratuite)

- 08h45** **Accueil des participants, café d'accueil**
- 09h15** **Introduction de la journée : Ph. Cosenza (ENSI Poitiers) et P. Delage (Ecole des Ponts ParisTech)**
- Approches expérimentales**
- 9h30** **Microstructure des sols et roches argileux gonflants ; cas des sols de la région parisienne : P. Delage (Ecole des Ponts ParisTech)**
- 10h15** **Couplages multi-échelles déformation-microstructure dans les roches argileuses et/ou organiques : apport des collaborations entre mécaniciens et géologues : A.L. Fauchille (Ecole Centrale Nantes)**
- 11h00** **Influence des conditions environnementales sur les propriétés multi-échelles d'argiles compactées : O. Cuisinier (Université de Lorraine)**
- 11h45** **Approche multi-échelle de la caractérisation de l'espace poreux des roches argileuses : D. Prêt (Université de Poitiers)**
- 12h30** **Déjeuner libre**
- Des observations expérimentales vers les modèles**
- 14h00** **Prise en compte de l'hétérogénéité microstructurale des roches argileuses au travers d'un modèle hydromécanique à double échelle B. Pardoën (Université Catholique de Louvain)**
- 14h45** **Variation de la microstructure des argiles remaniées sous chargement triaxial en relation avec le phénomène de dilatance : M. Hattab (Université de Lorraine)**
- Le point de vue des praticiens**
- 15h30** **Interventions de J.C. Robinet (ANDRA) et H. Le Bissonnais (TERRASOL)**
- 16h30** **Questions – Débat – Clôture de la journée**

Microstructure des sols et roches argileux gonflants ; cas des sols de la région parisienne

P. Delage (Ecole des Ponts ParisTech)

Les propriétés de gonflement des sols argileux résultent de l'attraction exercée par les smectites qu'ils contiennent sur les molécules d'eau, du fait de leur déficit de charge électrique. Ce gonflement n'est cependant pas homogène et, contrairement à une idée longtemps répandue, ne peut être modélisé en considérant les effets de double couche au niveau de feuillet élémentaires, car ces feuillets sont toujours regroupés (par dizaines ou centaines) au sein de plaquettes. Des études récentes ont confirmé, sur les sols (argile de Romainville) et roches (argile du Callovo-Oxfordien) argileuses que le gonflement macroscopique résulte de l'effet combiné du développement d'un réseau de fissuration micrométrique inter-plaquettes et d'un gonflement, dit cristallin, des plaquettes elles-mêmes. Les conséquences macroscopiques de ces aspects nano et microscopiques seront considérés pour interpréter certains aspects du comportement de sols gonflants de la région parisienne.

Couplages multi-échelles entre déformation et microstructure dans les roches argileuses et/ou organiques : apport des collaborations entre géomécaniciens et géologues

A.L. Fauchille (Ecole Centrale Nantes)

Les roches argileuses, dont certaines sont riches en matière organique, sont des roches sédimentaires détritiques terrigènes à dominante argileuse. Leur faible perméabilité leur permet de constituer un milieu de haute capacité de rétention de ressources naturelles (hydrocarbures), et de stockage de déchets en formation géologique (radioactifs, CO₂, eau). L'optimisation du rendement et de la sécurité de l'extraction de ressources et de l'enfouissement de déchets nécessite une bonne connaissance du comportement du matériau à court et long termes, et pour les différentes sollicitations rencontrées pendant et après l'exploitation: augmentation de la température autour des colis de déchets, désaturation et re-saturation en eau de la roche, excavation mécanique des galeries et des puits, fracturation hydraulique etc... Les roches argileuses sont caractérisées comme des matériaux hétérogènes et multi-échelles. Leur comportement thermo-hydro-mécanique (THM) à l'échelle macroscopique dépend du comportement de leurs composants à l'échelle de la microstructure, c'est-à-dire à des échelles plus petites. Cependant les mécanismes de déformation et de fissuration lors de sollicitations thermiques, hydriques et mécaniques ainsi que les facteurs qui les contrôlent sont complexes et multiples, et restent relativement mal compris. Depuis 2011, des études dirigées par des chercheurs des Universités de Poitiers et de Manchester (Angleterre) réunissant mécaniciens, géomécaniciens et géologues européens, ont permis d'adopter une démarche multi-échelle (du μm au dm) et multi-facteurs pour mieux comprendre les liens entre le comportement THM des roches argileuses et leur microstructure.

L'apport pour l'ingénieur des collaborations interdisciplinaires autour de ce matériau complexe sera présenté, ainsi que les dernières avancées sur la caractérisation et la comparaison quantitative de la microstructure avec les déformations, grâce à plusieurs études

de cas. L'exposé permettra de mettre en lumière les limites de cette comparaison et de proposer des perspectives innovantes, incluant par exemple la localisation des écoulements et l'intégration de phénomènes non locaux, au cours de chargements mécaniques.

Influence des conditions environnementales sur les propriétés multi-échelles d'argiles compactées

O. Cuisinier (Université de Lorraine)

Les propriétés particulières des argiles gonflantes en font des matériaux très intéressants dans de nombreuses applications comme la construction de sites de stockage de déchets profonds ou de surface. L'hydratation d'une argile gonflante provoque son gonflement, ce qui est associé à une réorganisation profonde de sa microstructure à toutes les échelles, depuis la particule jusqu'à l'ouvrage, ce qui peut conduire à altérer leurs propriétés hydriques et mécaniques. Un enjeu est de parvenir à quantifier la relation entre les changements de la microstructure des argiles aux modifications de leur comportement hydromécanique macroscopique. Cet objectif nécessite le développement de dispositifs expérimentaux originaux et des stratégies expérimentales adaptées. Deux exemples seront présentés pour illustrer les travaux menés sur ces aspects au LEMTA.

Le premier exemple portera sur l'analyse de l'évolution de la microstructure d'argiles gonflantes traitées à la chaux et soumises à des cycles d'humidification/séchage qui altèrent progressivement leur comportement. Le deuxième exemple portera sur le suivi couplé de la pression de gonflement d'une argile gonflante en corrélation avec l'évolution de la porosité inter-agrégat identifiable à différentes échelles. Différents types de fluides ont été utilisés pour hydrater les éprouvettes afin de contrôler les composantes cristalline et osmotique du gonflement.

Approche multi-échelles de la caractérisation de l'espace poreux des roches argileuses

D. Prêt (Université de Poitiers)

Les roches argileuses sont par définition extrêmement hétérogènes et anisotropes de part les processus de formation mis en jeu lors des phases de dépôt sédimentaire et de croissance de leur minéraux constitutifs lors de l'enfouissement. La caractérisation de l'organisation du squelette minéral et du réseau poreux associé d'une carotte décimétrique (échelle du laboratoire) nécessite donc la prise en compte de cette hétérogénéité, notamment dans le but de modéliser les propriétés mécaniques et de transfert du matériau. La mise en œuvre d'une combinaison de techniques est donc nécessaire afin de couvrir une large gamme d'échelles (volumes/résolutions sondés) s'étendant de celle de la carotte jusqu'à celle du feuillet argileux nanométrique. Ce type d'approche sera illustré à travers l'utilisation couplée de méthodes globales classiques (porosimétrie mercure, adsorption de gaz) et de techniques d'imagerie désormais établies ou plus innovantes : autoradiographie, tomographie de rayons X, FIB/SEM, analyse minéralogique spatialisée par microscopie électronique via la cartographie chimique ou des mosaïques grand champs.

Prise en compte de l'hétérogénéité microstructurale des roches argileuses au travers d'un modèle hydromécanique à double échelle

B. Pardoen (Université Catholique de Louvain)

Dans le contexte de la gestion des déchets radioactifs, les roches argileuses sont considérées comme des milieux favorables pour le dépôt géologique profond. Ces roches présentent une microstructure complexe [1], à différentes échelles. Diverses questions scientifiques se posent actuellement sur la manière dont les caractéristiques microstructurales des roches hétérogènes peuvent enrichir le comportement constitutif à l'échelle macroscopique. Dès lors, la modélisation du comportement hydromécanique d'une roche argileuse est considérée en tenant compte de ses caractéristiques microstructurales. L'objectif est de développer une approche numérique prenant en compte le comportement multi-échelle des roches argileuses et son effet à grande échelle afin de prédire les déformations et la rupture.

Une approche double-échelle est étudiée pour la modélisation du comportement de l'argile du Callovo-Oxfordien (COx), une roche hôte potentielle pour le dépôt profond de déchets radioactifs en France. L'approche présentée est une méthode par éléments finis à double échelle (FEMxFEM) utilisant des surfaces élémentaires (SE) pour modéliser le comportement du matériau à l'échelle microscopique [2]. La réponse globale des SE à l'échelle microscopique sert de loi de comportement numérique implicite homogénéisée à l'échelle macroscopique [2]. Le travail se concentre sur la définition de SE dans l'argilite. Cette définition se veut être à la fois une représentation réaliste et simple du matériau [3]. Des observations et caractérisations expérimentales de la microstructure de la roche sont considérées pour définir le matériau de manière réaliste [1]. Les résultats de calculs à double échelle mettent en évidence le comportement de l'argile aux échelles microscopique et macroscopique par rapport aux données expérimentales d'essais de compression [3]. L'accent est mis sur les processus de déformation aux deux échelles.

References:

[1] Robinet, J.-C., Sardini, P., Coelho, D., Parneix, J.-C., Prêt, D., Sammartino, S., Boller, E., Altmann, S. (2012). Effects of mineral distribution at mesoscopic scale on solute diffusion in a clay-rich rock: Example of the Callovo-Oxfordian mudstone (Bure, France), *Water Resources Research*, 48, W05554.

[2] van den Eijnden, A.P., Bésuelle, P., Collin, F., Chambon, R., Desrues, J. (2017). Modeling the strain localization around an underground gallery with a hydro-mechanical double scale model; effect of anisotropy. *Computers and Geotechnics*. 85:384-400.

[3] Pardoen, B., Dal Pont, S., Desrues, J., Bésuelle, P., Prêt, D., Cosenza, P. (2018). Heterogeneity and variability of clay rock microstructure in a hydro-mechanical double scale FEMxFEM analysis. *micro to MACRO Mathematical Modelling in Soil Mechanics*. University Mediterranea of Reggio Calabria - DICEAM.

La microstructure des roches et sols : un pont entre les processus fondamentaux « petites échelles » et leur comportement multi-échelles

J.C. Robinet (Andra/ Direction R&D)

La microstructure traite de l'organisation spatiale des constituants (minéraux, matières organiques...) d'une roche ou d'un sol et définit son espace poral. Elle est le siège de processus fondamentaux qui régissent les interactions entre les différents solides et fluides et constitue ainsi l'une des clés gouvernant les propriétés intrinsèques Thermo-Hydro-Mécanique-Chimiques (THMC) d'une roche ou d'un sol.

Les connaissances relatives à la microstructure d'une roche ou d'un sol permettent tout d'abord de mieux comprendre leur comportement THMC à différentes échelles de temps et d'espace. On citera par exemple pour la formation des argilites du Callovo-Oxfordien, le lien entre les paramètres du transfert des fluides et la géométrie de son réseau de pore composé des pores de dimension nanométrique et leurs évolutions respectives à l'échelle de la formation géologique. Dans ce cadre, les données microstructurales participent à la justification de notre compréhension du système et à la robustesse des choix de gammes de paramètres (notamment en termes de variabilité attendue)

Au-delà des liens généraux que l'on peut établir entre microstructure et comportement intrinsèques, le développement des méthodes de pétrographie quantitative (associant acquisition de données numériques en 2D et 3D et traitement numérique de celles-ci) permet aujourd'hui de disposer de données numériques spatialisées aux différentes échelles. Ces distributions sont utilisées pour alimenter des simulations numériques dans l'objectif de mieux comprendre et représenter les comportements des propriétés multi-échelles THMC des roches et des sols et de les intégrer dans une perspective de conception et dimensionnement d'installations industrielles, telles que celles d'un stockage de déchets radioactifs. La mise en œuvre de cette démarche de pétrographie quantitative s'effectue également en présence de sollicitations THMC ce qui permet de confronter, améliorer et valider aux différentes échelles les modèles et outils de représentation THMC des roches et des sols.

Ces approches ont fait l'objet de nombreux travaux coordonnés par l'Andra depuis plus d'une dizaine d'années et se développent aujourd'hui dans le cadre du Projet Fédérateur MIPOR au sein du programme NEEDS (nucléaire, énergie, environnement, déchets, société).

Prise en compte du gonflement des terrains argileux pour le dimensionnement des ouvrages d'infrastructure :

H. Le Bissonnais (TERRASOL)

Dans le cadre des études de conception liées au projet du Grand Paris Express, des divergences d'interprétation sont apparues parmi les maîtrises d'œuvre quant à la méthodologie de prise en compte des pressions de gonflement de certaines formations (Argile Plastique notamment). Un groupe de travail a été organisé au sein du CFMS afin de rédiger des recommandations pour le dimensionnement des ouvrages de génie civil en interaction avec des sols gonflants (soutènement verticaux, fondations profondes, radiers sur argiles gonflantes, tunnels). La présentation résume l'avancement des réflexions du groupe de travail, en particulier en ce qui concerne la caractérisation des propriétés des terrains

gonflants (domaine d'application des essais, prélèvement et conservation des échantillons, quels liens entre le phénomène et les essais d'identification classiques).