



**HAL**  
open science

## Analyse 3D du gonflement hydrique transitoire d'une roche argileuse : interaction entre échantillon et imageur

Michel Bornert, H Gharbi, A Bonnelye, A Dimanov, Patrick Aïmedieu,  
Emmanuel Keita, A King

### ► To cite this version:

Michel Bornert, H Gharbi, A Bonnelye, A Dimanov, Patrick Aïmedieu, et al.. Analyse 3D du gonflement hydrique transitoire d'une roche argileuse : interaction entre échantillon et imageur. IMAGERIE GC 2019, Apr 2019, Champs-sur-Marne, France. hal-03323441

**HAL Id: hal-03323441**

**<https://hal.science/hal-03323441v1>**

Submitted on 21 Aug 2021

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

## **Analyse 3D du gonflement hydrique transitoire d'une roche argileuse : interaction entre échantillon et imageur**

M. Bornert<sup>1</sup>, H. Gharbi<sup>2</sup>, A. Bonnelye<sup>2</sup>, A. Dimanov<sup>2</sup>, P. Aïmedieu<sup>1</sup>, E. Keita<sup>1</sup>, A. King<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Université Paris Est, Laboratoire Navier

<sup>2</sup>Ecole polytechnique, Laboratoire de Mécanique des Solides

<sup>3</sup>Synchrotron Soleil, Ligne Psiché

### **RÉSUMÉ**

Les déformations hydriques d'un échantillon millimétrique de roche argileuse soumis à un gradient d'humidité relative sont mesurées par tomographie X synchrotron et corrélation d'images volumiques. On cherche aussi à caractériser l'endommagement induit par les gradients de gonflement. Le suivi de masse de l'échantillon et la complexité des profils de déformation mesurés révèlent que le faisceau synchrotron modifie localement l'équilibre hydrique de l'échantillon pendant l'acquisition d'image, rendant la sollicitation encore plus complexe que celle escomptée. Aucun endommagement macroscopique n'est détecté, malgré l'ampleur des gradients induits, en conséquence probable d'une sélection rigoureuse de l'échantillon qui ne présente pas d'hétérogénéité mésoscopique notable. L'expérience met toutefois en évidence un phénomène totalement inattendu de dissolution préférentielle des inclusions de calcite en périphérie d'échantillon.

**Mots clés :** Argilite ; Transfert d'eau ; Tomographie ; Corrélation d'image ; Dissolution ; Couplage.

### **INTRODUCTION**

Le comportement mécanique des roches dans lesquelles il est envisagé d'enfuir les déchets radioactifs ultimes de l'industrie nucléaire doit sa complexité en particulier aux phénomènes de couplages hydromécaniques opérant dans leur phase argileuse dominante. Les transferts d'eau s'accompagnent de déformations hydriques qui peuvent être fortement hétérogènes, tant à l'échelle mésoscopique des gradients de teneur en eau produits pendant les périodes transitoires d'échange qu'à l'échelle plus microscopique où les particules argileuses de composition chimique et d'orientation variables côtoient des inclusions de seconde phase, principalement quartz et calcite, non sujettes à ces gonflements ou retraites. Ces gradients peuvent induire un dommage de la roche, sous diverses formes, qui peut remettre en cause à la fois sa tenue mécanique et son imperméabilité, compromettant potentiellement son rôle de barrière au transport des radionucléides. Les lois de comportement utilisées dans les codes de dimensionnement des ouvrages se doivent d'intégrer ces phénomènes, et leur analyse expérimentale fine est ainsi indispensable en vue de leur compréhension et modélisation. De nombreuses études expérimentales ont porté sur cette question, analysée depuis l'échelle des galeries jusqu'à celle de la microstructure composite de la roche. Les investigations menées sous microscopie optique ou électronique environnementale [1] ont en particulier montré la mobilisation de divers mécanismes irréversibles lors de cycles de saturation/désaturation : plasticité locale de la phase argileuse, fissuration aux interfaces argile/particules ou interne à la phase argileuse, selon les conditions expérimentales. Ces analyses sont toutefois pour la plupart limitées par leur caractère surfacique. La présente étude a pour but de les étendre dans le volume, et pour une variété de conditions de sollicitations hydriques.

### **MATERIAU ET ECHANTILLONS.**

Des échantillons de roche argileuse de forme cylindrique, d'environ 4mm de diamètre et 6mm de long, ont été prélevés au sein de carottes fournies par l'ANDRA, avec un soin particulier visant à sélectionner des échantillon sans fissuration initiale et sans hétérogénéité constitutive notable. En particulier ces échantillons ne présentent pas de veine de pyrite ni d'inclusion de calcite de grande extension, dont le rôle endommageant est déjà connu qualitativement. Deux directions de prélèvement

sont considérées, avec une stratification du massif soit parallèle soit perpendiculaire à l'axe des cylindres. Les faces latérales des échantillons sont rendues étanches par un film de graisse et une jaquette polymère, de sorte à imposer le transfert d'eau par les faces extrémales seulement. Les échantillons sont ensuite équilibrés avec une atmosphère dont l'humidité relative est contrôlée par une solution saline commerciale, à RH = 95% ou RH=35%, pour mener par la suite des essais in situ de dessiccation ou d'hydratation, respectivement. On focalise ici le propos sur l'expérience d'hydratation avec transfert selon la direction parallèle à la stratification.

### **EXPERIENCE DE GONFLEMENT SOUS TOMOGRAPHIE SYNCHROTRON.**

L'échantillon est placé dans le compartiment supérieur d'une double petite enceinte en PMMA (figure 1a) et l'humidité relative à ses extrémités est imposée par un feutre imbibé de solution saline placé dans la partie inférieure. La pesée régulière de la partie supérieure permet d'évaluer la prise d'eau de l'échantillon, par comparaison avec un dispositif témoin contenant un échantillon métallique (courbe en figure 1b). L'échantillon est observé par tomographie synchrotron sur la ligne Psiché de Synchrotron Soleil [2], d'abord avant le changement de solution saline, puis rapidement après et à divers intervalles de temps croissants. Les conditions d'imagerie particulières permettent d'observer l'ensemble de l'échantillon ou au moins sa moitié supérieure avec une très bonne résolution spatiale, pour révéler à la fois sa microstructure et sa réponse mécanique globale. La taille de voxel utilisée est de  $1,287\mu\text{m}$  et la définition des images 3D est de  $3248 \times 3248 \times 2048$  voxels, la totalité de l'échantillon étant couverte par trois scans superposés, chacun durant environ 45 minutes. La figure 1c fournit un exemple de coupe axiale d'une image.

### **PROFILS DE DEFORMATIONS HYDRIQUES.**

La séquence d'image est ensuite analysée par corrélation numérique en utilisant le contraste microstructural de la roche, au moyen de fenêtres de  $40^3$  voxels. L'incertitude sur la mesure de déplacement, évaluée à partir de l'analyse de mouvements rigides, est d'environ 0,2 voxel, et s'avère insuffisante pour quantifier des gradients locaux, du fait de la faiblesse des déformations en jeu, de l'ordre de  $10^{-3}$ . L'analyse de la déformation moyenne sur des sections transverses d'épaisseur  $200\mu\text{m}$  permet en revanche de réduire l'incertitude à moins de  $10^{-4}$ , voire près de  $10^{-5}$  pour les composantes transverses, qui s'avère suffisante pour mettre en évidence les profils complexes de gonflements hydrique selon l'axe de l'échantillons, tel que celui représenté en figure 2a, obtenu 17h après le début de l'hydratation à RH=95%.

### **ANALYSE DES RESULTATS ET CONCLUSIONS.**

Sur ce profil on constate par exemple une déformation plus importante à cœur qu'aux extrémités de l'échantillon, alors qu'un profil inverse, plus conforme à l'intuition, est observé aux temps plus courts. D'autres observations similaires, portant par exemple sur la comparaison de la zone commune entre deux images juxtaposées, enregistrées à 45 minutes d'intervalle, montrent une évolution notable de l'échantillon pendant l'observation. Il s'avère ainsi que l'état d'équilibre de l'eau dans la roche est modifiée par l'irradiation des rayons X en cours d'observation, ce qui se traduit par une perte d'eau hétérogène, dont on constate aussi les effets globaux sur la courbe de masse (figure 1b). Ces interactions peuvent induire des gradients mésoscopiques de déformation à l'échelle de l'échantillon, dont l'intensité peut atteindre 0,15%/mm, pour une variation mesurée du gonflement normal à la stratification selon une direction parallèle. Il est toutefois remarquable qu'aucune fissuration mésoscopique n'a été observée, alors que l'on peut raisonnablement estimer que les microfissures sont détectables dans les images acquises sitôt que leur ouverture dépasse de l'ordre de  $0,2\mu\text{m}$ .

En revanche, un autre phénomène de dégradation de la roche est mis en évidence par cette expérience,

### **REFERENCES**

- [1] L.L. Wang, M. Bornert, E. Héripré, D.S. Yang, S. Chanchole, Irreversible deformation and damage in argillaceous rocks induced by wetting/drying, *Journal of Applied Geophysics*, 107, pp. 108-118, 2014

- [2] A. King, N. Guignot, P. Zerbino, E. Boulard, K. Desjardins, M. Bordessoule, N. Leclerq, S. Le, G. Renaud, M. Cerato, M. Bornert, N. Lenoir, S. Delzon, J.P. Perrillat, Y. Legodec, J.P. Itié, Tomography and imaging at the PSICHE beam line of the SOLEIL synchrotron, *Rev. Sci. Instrum.* 87, 2016.