

# Caractérisation expérimentale de la déformation et de la rupture localisée dans une argilite

Pierre Bésuelle, Jacques Desrues, Gioacchino Viggiani & Nicolas Lenoir

Universités de Grenoble & CNRS  
Laboratoire Sols, Solides, Structures - Risques (3S-R)  
BP 53  
38 041 Grenoble cedex 9  
Pierre.Besuelle@hmg.inpg.fr

## Résumé :

*Nous présentons une étude expérimentale de caractérisation de la rupture par localisation de la déformation dans une roche argileuse. Des essais triaxiaux ont été effectués sur une ligne de lumière de l'ESRF pour obtenir des reconstructions microtomographiques en volume à différents stades de l'essai. Une mesure du champ de la déformation a été faite en associant aux images obtenues une méthode de corrélation d'images en volume. Ces résultats permettent d'identifier très clairement le seuil d'initiation de la localisation, et le mode de déformation dans les bandes.*

## Abstract :

*We present an experimental study to characterize localized deformation and failure in a clay rock. Triaxial tests were performed at the ESRF and X-ray CT scans were taken at different loading steps. A volume field measurement of the strain has been computed by using a digital image correlation method applied to the CT scans. These results allow to clearly identify the onset of localization, and the mode of deformation inside the bands.*

## Mots-clefs :

**microtomographie ; localisation de la déformation ; roche argileuse**

## 1 Introduction

La rupture dans les géomatériaux, incluant sols, roches et bétons, se manifeste très fréquemment par une localisation de la déformation selon des structures fines et étendues. Il se produit une transition depuis un mode de déformation diffuse vers un mode où la déformation est fortement concentrée spatialement, le matériau en dehors de ces zones se comportant alors de manière plus ou moins rigide. Cette évolution se caractérise d'une certaine manière par un changement d'échelle de la déformation. Elle a, en revanche, potentiellement des effets importants sur les propriétés mécaniques et de transfert du milieu considéré à grande échelle. Par exemple, les zones de localisation peuvent jouer le rôle de drain ou de barrière de perméabilité.

Une caractérisation fine de ce phénomène de localisation est de fait fortement facilitée par l'emploi de méthodes de mesure de champ qui permettent de mettre en évidence cette transition d'échelle. Plus particulièrement, pour les essais de laboratoire, des méthodes de mesure tridimensionnelle permettant une observation en volume de la structure d'un échantillon au cours de son chargement semblent une avancée très prometteuse. Les techniques d'imagerie non destructives, telle que la tomographie à rayons X, ont suivi ces dernières années des évolutions remarquables (e.g., Baruchel *et al.* (2000)) et offrent de nouvelles possibilités pour étudier la rupture dans les géomatériaux. Cependant, certaines spécificités des essais sur les géomatériaux (pression de confinement, pression interstitielle) rendent les protocoles expérimentaux difficiles

quand on souhaite, de manière simultanée, imposer un chargement à l'échantillon et en faire un suivi par imagerie (*i.e.*, tomographie *in situ*) (*e.g.*, Raynaud *et al.* (1989); Desrues *et al.* (1996); Otani *et al.* (2002)).

Nous avons utilisé pour cette étude les ressources de rayonnement X de l'ESRF (European Synchrotron Radiation Facility). La méthode d'imagerie employée est une méthode de microtomographie ultra-rapide (Di Michiel *et al.* (2005)) rendue possible par la haute luminosité du faisceau. Nous avons pu ainsi associer une haute résolution (micrométrique) et une très bonne rapidité de mesure. Ces deux facteurs sont importants car, d'une part, les structures de localisation dans la roche argileuse étudiée sont très fines, et d'autre part, pendant l'imagerie de l'échantillon, nous devons stopper le raccourcissement de l'échantillon, et il se produit un phénomène de relaxation qui est d'autant plus faible que la mesure est rapide. Nous présentons ici une courte sélection de résultats obtenus. Le lecteur intéressé pourra trouver plus de renseignements dans le mémoire de thèse de Lenoir (2006) et les articles de Viggiani *et al.* (2004) et Bésuelle *et al.* (2006). Nous montrons aussi que l'association de la tomographie RX avec des méthodes de corrélation d'images volumiques permet dans les géomatériaux d'augmenter considérablement la richesse des observations (Lenoir *et al.* (2007)).

## 2 Matériau étudié et dispositif expérimental

Le matériau est l'argilite du callovo-oxfordien, extraite pour l'ANDRA depuis son laboratoire de recherche souterrain Meuse/Haute Marne à Bure. La roche provient des profondeurs entre 476 et 479 m, depuis les forages EST212 et EST361. Cette formation géologique du Jurassique, d'une épaisseur d'environ 130 m, est étudiée dans l'éventualité de stockage de déchets radioactifs en profondeur. Le matériau a une perméabilité initiale très faible, de l'ordre de  $10^{-20}$  à  $10^{-22}$  m<sup>2</sup>, et une résistance uniaxiale de l'ordre de 20 à 30 MPa (Escofier *et al.* (2005); Fabre *et al.* (2006)). Sa teneur en eau est d'environ 6% et sa teneur en argile de 40 à 45%, les autres minéraux étant essentiellement de la calcite et du quartz. Les échantillons, d'un diamètre de 10 mm et d'une hauteur de 20 mm, ont été préparés, à partir des carottes de forage, à l'aide d'une scie à fil diamanté, dans le but de minimiser les perturbations induites par la préparation. La petite taille des échantillons se justifie par le champ de mesure de la ligne synchrotron utilisée, mais reste tout à fait acceptable au regard de la granulométrie très fine de la roche. On note cependant quelques filons de calcite dans la roche, de longueur millimétrique, qui correspondent très certainement à des bioturbations au moment du dépôt sédimentaire.

Les expériences ont été menées au synchrotron de troisième génération ESRF à Grenoble, sur la ligne à haute énergie ID15A. La gamme d'énergie de rayons X sélectionnée est de 50 à 70 KeV et le faisceau était filtré par une série de plaques en polymère pour éviter les artefacts de durcissement de faisceau. L'échantillon d'argilite était placé dans une cellule de confinement en polycarbonate, transparente aux rayons X. Le dispositif d'essai, incluant cellule de confinement et système de chargement axial, était placé sur un dispositif de rotation (d'axe parallèle à l'axe de l'échantillon) et de translation pour faire l'acquisition des radiographies sous les différents angles requis, à savoir 1200 radiographies réparties sur un angle de 180°. Le détecteur numérique avait une résolution de  $14 \times 14 \mu\text{m}^2$  (optique de grossissement 1) et le faisceau une épaisseur de 3,65 mm, cela autorisait un enregistrement de 261 coupes simultanément. Le temps requis pour l'acquisition complète des 261 coupes était d'environ 2,5 min, et le temps d'acquisition pour la totalité de l'échantillon d'environ 15 min, avec une taille de voxel de  $14 \times 14 \times 14 \mu\text{m}^3$ .

Le cylindre d'argilite était soumis à la fois à une pression latérale, exercée par un fluide autour de l'échantillon, lui même enveloppé d'une membrane étanche, et pouvant atteindre

10 MPa, et une charge axiale exercée par un piston contrôlé en déplacement, pouvant exercer jusqu'à 7,5 kN. Chaque essai se décompose en deux étapes, une première de chargement isotrope jusqu'à la pression de confinement requise, une seconde étape pendant laquelle la pression de confinement reste constante et où l'on impose le raccourcissement axial de l'échantillon, jusqu'à la rupture par localisation de la déformation. L'essai présenté ici a été effectué à la pression de confinement de 10 MPa et la vitesse de chargement axiale de  $3 \mu\text{m.mn}^{-1}$ , soit une vitesse de déformation de  $2,5.10^{-6} \text{ s}^{-1}$ .

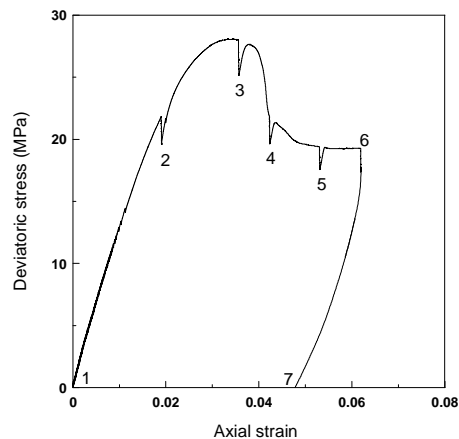


FIG. 1 – Evolution de la contrainte déviatorique en fonction de la déformation axiale. Les indices 1 à 7 repèrent les images tomographiques réalisées pendant l'essai.

### 3 Résultats expérimentaux

L'évolution de la contrainte déviatorique (différence entre la contrainte axiale et la contrainte latérale de confinement) est tracée en fonction de la déformation axiale de l'échantillon sur la figure 1 (la déformation de raccourcissement et la contrainte de compression sont considérées positives). Les images tomographiques ont été réalisées tout au long de l'essai, les deux premières (indice 0 et 1) avant et juste après avoir appliqué le confinement, puis pendant l'étape de chargement et déchargement axial (indice 2 à 7 sur la figure), et enfin après le déconfinement de l'échantillon (indice 8). Pendant le temps nécessaire pour scanner l'échantillon, une légère relaxation se produit, ce qui explique les décharges partielles de l'échantillon à ces moments. Lors de l'essai, le déviateur augmente assez linéairement jusqu'à l'indice 2, puis atteint un pic à 28 MPa vers l'indice 3, et enfin décroît pour atteindre une valeur résiduelle de 19 MPa vers l'indice 5. L'observation externe de l'échantillon à la fin de l'essai indique qu'une bande de cisaillement s'est formée durant l'essai.

Nous montrons à présent la reconstruction tomographique d'une coupe aux différentes étapes de chargement (Fig. 3). Cette coupe est perpendiculaire à l'axe de l'échantillon et sa hauteur varie au cours de l'essai pour prendre en compte le raccourcissement de l'échantillon. L'échelle de gris est telle qu'une zone où la porosité augmente entre deux étapes apparaît comme une zone qui s'assombrit, la mesure étant sensible à la déformation volumique (variation de densité massique). La localisation devient visible sur la coupe à l'étape 4, soit après le pic de contrainte. Elle apparaît comme une zone étroite dilatante (épaisseur 2-3 pixels soit 30-40  $\mu\text{m}$ ) dans la partie en haut à gauche de la coupe suivant une orientation NE-SO. Dans la suite de l'essai, la bande devient de mieux en mieux visible, avec une épaisseur qui atteint environ 60  $\mu\text{m}$  à l'étape 7, plus particulièrement dans la zone externe de l'échantillon. Un rejet de la bande est égale-

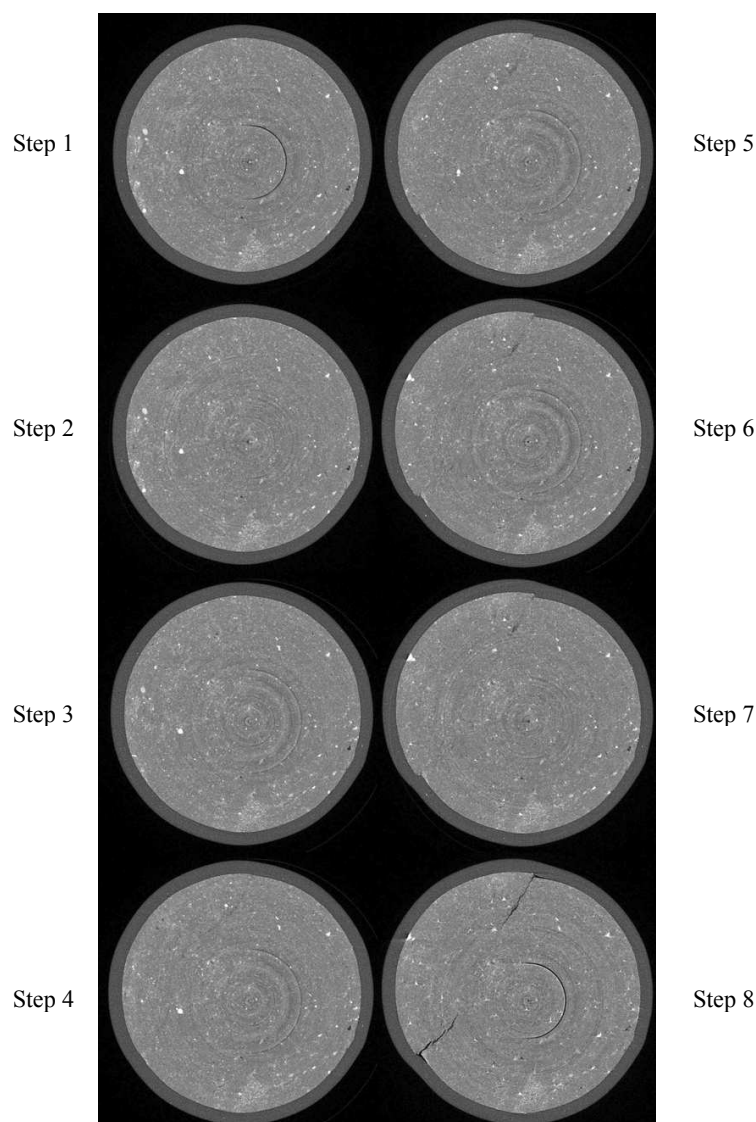


FIG. 2 – Suivi d'une coupe tomographique perpendiculaire à l'axe de l'échantillon aux différentes étapes de l'essai.

ment observable sur le pourtour de l'échantillon, ce rejet est dû à l'inclinaison de la bande par rapport à l'axe de l'échantillon. Lors du retrait de la pression de confinement autour de l'échantillon (étape 8), la bande s'ouvre sous forme d'une fissure, bien que dans la partie centrale de l'échantillon, aucune trace de localisation ne soit visible.

Des observations plus approfondies ont été menées, que nous ne détaillons pas ici. Il a pu être observé, en suivant la géométrie des filons de calcite naturellement présents dans la roche, que des zones de fort cisaillement existaient dans l'échantillon, même au cœur de celui-ci, alors que cela était peu ou pas visible en terme de variation de niveau de gris sur les images tomographiques. En d'autres termes, il existe des zones de localisation du cisaillement, sans ou avec peu de variation de volume et qui de ce fait ne peuvent être visualisées par une simple observation des images. Nous avons alors associé aux images tomographiques une technique de corrélation d'image numérique en volume. La méthode utilisée est exposée en détail par Bornert *et al.* (2004); Lenoir *et al.* (2007) et des résultats sont également accessibles dans Bésuelle *et al.*

(2006) et Hall *et al.* (2007). Cette méthode permet, par comparaison de deux images prises à deux états de chargement de mesurer le champ de déplacement incrémental puis de déformation. Nous présentons sur la figure 3 le champ de l'incrément du deuxième invariant de la déformation, entre les étapes 2 et 3 (avant le pic de contrainte) et les étapes 3 et 4 (juste après le pic). On peut voir que la localisation s'initie avant le pic de contrainte, vers l'une des extrémités de l'échantillon, alors que cela n'est pas visible sur les coupes tomographiques. Après le pic, la localisation est entièrement propagée au travers de l'échantillon, et une seconde bande est également visible.

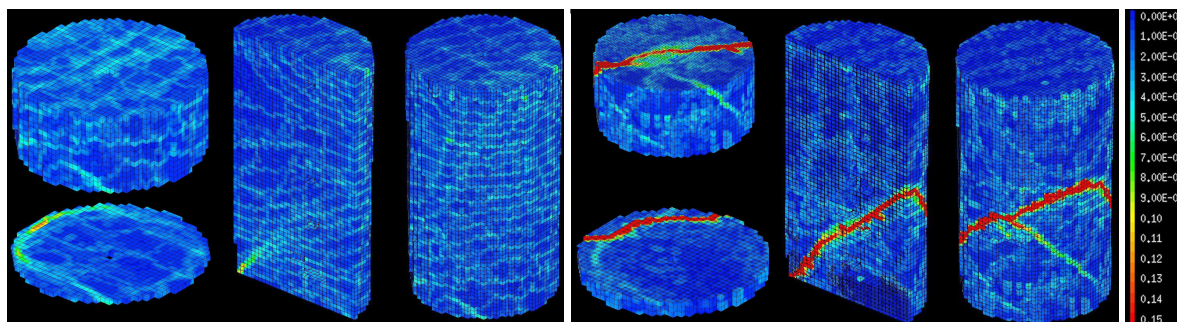


FIG. 3 – Champs de l'incrément de cisaillement (deuxième invariant de la déformation) dans l'échantillon entre les étapes (à gauche) 2 et 3, et (à droite) 3 et 4.

#### 4 Conclusions

Un dispositif de chargement mécanique a été développé spécifiquement pour étudier la déformation et la rupture des roches, afin d'être utilisé *in situ* avec une source à rayons X. L'imagerie en microtomographie a été effectuée sur une ligne de lumière synchrotron à haute énergie, combinant haute résolution et rapidité d'acquisition des images. Les reconstructions 3D des images ont permis de révéler les zones de variation de volume induites par la localisation. Cette simple observation n'étant par contre pas sensible au cisaillement dans les bandes, une méthode de corrélation d'image en volume a été effectuée. Le champ de déformation a ainsi pu être calculé à différents stades du chargement. Il est montré que la localisation s'initie avant le pic de contrainte, et se propage entièrement au travers de l'échantillon après le pic de contrainte.

L'association de la tomographie RX et des méthodes de corrélation d'images ouvre des perspectives très riches pour l'étude des géomatériaux. La corrélation nécessite cependant l'existence d'une texture naturelle du matériau, puisqu'on ne peut y mettre des marqueurs. Cela est heureusement souvent le cas du fait de l'hétérogénéité de ces matériaux à petite échelle.

#### Références

- Baruchel, J., Buffière, J.Y., Maire, E., Merle, P., Peix, G. 2000 Tomography in Materials Science. Hermès, Paris.
- Bésuelle, P., Viggiani, G., Lenoir, N., Desrues, J., Bornert, M. 2006 X-ray micro CT for studying strain localization in clay rocks under triaxial compression. *In Advances in X-ray tomography for geomaterials (Proc. Int. Workshop, GeoX 2006, Grenoble & Aussois, France, october 4-7, 2006)* (J. Desrues, G. Viggiani and P. Bésuelle, eds.) pp. 35-52, ISTE Ltd, Londres.

- Bornert, M., Chaix, J.M., Doumalin, P., Dupré, J.C., Fournel, T., Jeulin, D., Maire, E., Moreaud, M., Moulinec, H. 2004 Mesure tridimensionnelle de champs cinématiques par imagerie volumique pour l'analyse des matériaux et des structures. *Instrumentation, Mesure, Métrologie* **4** 43-88
- Desrues, J., Chambon, R., Mokni, M., Mazerolle, F. 1996 Void ratio evolution inside shear bands in triaxial sand specimens studied by computed tomography. *Géotechnique* **46** 529-546
- Di Michiel, M., Merino, J.M., Fernandez-Carreiras, D., Buslaps, T., Honkimäki, V., Falus, P., Martins, T., Svensson, O. 2005 Fast microtomography using high energy synchrotron radiation. *Rev. Sci. Instruments* **76** 043702
- Escoffier, S., Homand, F., Giraud, A., Hoteit, N., Su, K. 2005 Under stress permeability determination of the Meuse/Haute-Marne mudstone. *Engineering Geology* **81** 329-340
- Fabre, G., Pellet, F. 2006 Creep and time-dependent damage in argillaceous rocks. *Int. J. Rock Mech. Mining Sci.* **43** 950-960
- Hall, S.A., Pannier, Y., Bornert, M., Desrues, J., Viggiani, G. 2007 Deux approches de la corrélation 3D d'images volumiques comparées sur des données de tomographie à rayons X. *In recueil d'actes CFM'07, ce volume.*
- Lenoir, N. 2006 Comportement mécanique et rupture dans les roches argileuses étudiés par tomographie à rayons X. *Thèse de doctorat, Université J. Fourier, Grenoble*  
<http://tel.ccsd.cnrs.fr/tel-00011996>
- Lenoir, N., Bornert, M., Desrues, J., Bésuelle, P., Viggiani, G. 2007 Volumetric digital image correlation applied to X-ray microtomography images from triaxial compression tests on argillaceous rock. *Strain* (in print).
- Otani, J., Mukunoki, T., Obara, Y. 2002 Characterization of failure in sand under triaxial compression using an industrial X-ray scanner. *Int. J. Phys. Model. Geotechnics* **1** 15-22
- Raynaud, S., Fabre, D., Mazerolle, F., Géraud, Y., Latière, H.J. 1989 Analysis of the internal structure of rocks and characterization of mechanical deformation by a non-destructive method : X-ray tomodensitometry. *Tectonophysics* **159** 149-159
- Viggiani, G., Lenoir, N., Bésuelle, P., Di Michiel, M., Marelli, S., Desrues, J., Kretschmer, M. 2004 X-ray microtomography for studying localized deformation in fine-grained geomaterials under triaxial compression. *C.R.A.S. Mécanique* **332** 819-826