CARACTERISATION DU COMPORTEMENT EN MODE MIXTE DES FISSURES DE DESSICCATION PAR METHODE NON INVASIVE

BEHAVIOR IN MIXED MODE OF DESICCATION CRACKS BY NON INVASIVE METHOD

Stephen HEDAN¹, valéry VALLE², Philippe COSENZA¹

¹ Université de Poitiers, IC2MP-HydrASA, CNRS UMR7285, ENSI Poitiers, France. ² Université de Poitiers, Institut PPRIME CNRS UPR 3346 Futuroscope Chasseneuil, France

1. **RÉSUMÉ –** La corrélation d'images numériques adaptée au milieu fracturé (H-DIC) a été mise en œuvre sur une série d'images enregistrant le front d'une galerie du laboratoire souterrain de Tournemire (IRSN, France) sur une période d'un an. L'analyse de ces images a permis de confirmer la présence de deux types de fissures parallèles et perpendiculaires à la stratification de la roche argileuse. L'algorithme utilisé et adapté au milieu fissuré permet de détecter automatiquement, sans intervention d'un utilisateur, si une fissure est présente en chaque pixel de l'image. De plus, cet outil permet d'extraire quantitativement et séparément l'ouverture locale et le glissement local entre les lèvres de la fissure. Cette étape a été répétée sur toutes les images de la période et les résultats ont été comparés à la température et l'humidité relative de la galerie. Les résultats montrent clairement que les amplitudes d'ouverture et de glissement sont du même ordre de grandeur (de l'ordre de 1mm). Après un cycle annuel d'analyse, les résultats montrent aussi que les fissures se referment complétement. Sur certaines d'entre elles, un phénomène d'hystérèse est observé entre les périodes de désaturation et de saturation du massif. Le comportement de ses fissures est principalement un mode mixte (ouverture + glissement) avec un mode d'ouverture prépondérant. Ces nouvelles grandeurs cinématiques permettent aussi d'accéder à la surface totale de fissures sur la zone d'intérêt et les résultats montrent que cette dernière n'est pas maximale lorsque le nombre de pixels fissurés est maximal.

ABSTRACT - The digital image correlation adapted to the fractured medium (H-DIC) was used on a series of images monitoring a gallery front of the experimental station of Tournemire (IRSN, France) and over a period of one year. Analysis of these images confirmed the presence of two types of cracks parallel and perpendicular to the stratification of the clay rock. The algorithm used and adapted to the cracked medium makes it possible to detect automatically, without user intervention, if a crack is present in each pixel of the image. Moreover, this tool allows to extract and to quantify separately the local opening and the local slip of each crack. This step was repeated on all images of the period and the results were compared with the temperature and relative humidity of the gallery. The results clearly show that the opening and sliding amplitudes are of the same order of magnitude (on the order of 1mm). After an annual analysis cycle, the results also show that the cracks close completely. In some of them, a phenomenon of hysteresis is observed between the periods of desaturation and saturation of the medium. The cracks behavior is mainly a mixed mode (opening + sliding) with a predominant opening mode. These new kinematic data also allow access to the total surface of cracks and the results show that the latter is not maximum when the number of cracked pixels is maximum.

2. Introduction

Les roches argileuses sont actuellement considérées pour le stockage des déchets hautement radioactifs en formations géologiques profondes. Parmi les guestions cruciales liées à l'évaluation de la sécurité à long terme de ces dépôts géologiques, l'étude de la zone endommagée (EDZ) autour des ouvrages est d'une importance particulière. L'ouverture et l'extension de l'EDZ sont régies par de nombreux paramètres (Blümling et al., 2007) : les propriétés du matériau de la roche (exemple : anisotropie du matériau), le champ de contrainte initial, l'existence de zones de fractures naturelles dans le massif rocheux, la géométrie de la galerie, et l'état hydrigue existant dans la galerie. Selon Rejeb et al.,2003 et Rejeb et al., 2006, l'état de contraintes est σ_V =3.8±0,4MPa, σ_H =4±2MPa et $\sigma_{\rm h}$ =2,1±1MPa et l'orientation de la galerie d'étude est de l'ordre de 70,8° par rapport à la contrainte horizontale majeure $\sigma_{\rm H}$. Ce contact air/roche, la géométrie de la galerie, ainsi que son creusement tendent à modifier les propriétés de la roche et à générer une fracturation. Une partie de cette fracturation est sensible au phénomène de saturation/désaturation due aux variations saisonnières dans les galeries de la station expérimentale de Tournemire (7<T<22°C; 19,3<RH<99,3%). En ce qui concerne le comportement mécanique des fissures de dessiccation apparues sur les parois des galeries, peu d'études expérimentales se sont intéressées à leurs comportements et plus particulièrement à la cinétique. Dans la littérature et en conditions in-situ, Hedan et al., 2014 ont démontré la présence de fissures parallèles et perpendiculaires à la stratification de la roche en paroi de galerie. Leurs travaux se sont aussi concentrés sur la mesure temporelle de leurs ouvertures. L'amélioration et l'enrichissement des algorithmes de corrélation d'images numériques apportent maintenant de nouveaux paramètres portant spécifiquement sur le comportement des fissures. On peut citer le glissement, l'orientation de la fissure et le mode de rupture dominant.

Ce travail fait suite aux travaux de Hédan et al., 2018 sur l'anisotropie des déformations hydromécaniques. Ces derniers ont mis en évidence que (i) les fissures de dessiccation délimitées des blocs ne présentant pas de fissures apparentes à cette échelle, et (ii) que le rapport entre les déformations hydromécaniques dans les directions parallèles et perpendiculaires à la stratification varie spatialement entre 2,84 et 5,42. Ces résultats sur les fissures de dessiccation et sur les déformations hydromécaniques mesurées permettent d'interpréter le comportement d'une roche argileuse lors d'une phase de dessiccation par le modèle conceptuel de la figure 1.

En effet, les résultats expérimentaux ont montré une diversité de dimensions de blocs et une variation significative de déformations de retrait entre ces blocs. Ces deux phénomènes peuvent expliquer partiellement l'hétérogénéité d'ouverture des fissures de dessiccation observées alors que la sollicitation hydromécanique peut être considérée comme homogène sur la surface étudiée.

Pour illustrer et confirmer les variations d'ouverture de fissure observées expérimentalement, le modèle conceptuel se compose de trois blocs de dimensions et de réponses mécaniques (i.e. déformations mécaniques) différentes. Son analyse permet d'étudier le comportement aux interfaces des blocs s'apparentant à des fissures de fissures de dessiccation observées sur un front rocheux argileux (Hédan et al. 2014). Pour illustrer les résultats sur le comportement des fissures, chaque bloc est soumis à un retrait isotrope différent (déformation ε =0,03, 0,04, 0,05) et à une translation de solide rigide différente (imp_disp = 0,2, 0,3, 0,4) suivant les directions x_0 et y_0 (figure 1.a). Ce couplage déformations/translations génèrent des sauts (mode d'ouverture) et des glissements (mode de cisaillement) aux interfaces des blocs. La figure 1.b présente l'ouverture (o) et le glissement (s) mesurés à l'interface des blocs 1/3 et 2/3.

Le long des blocs 1/3 et 2/3, l'ouverture est constante et un saut brusque de l'ouverture à l'interface de ces deux blocs est observé. Contrairement à l'ouverture, la valeur du

glissement évolue de façon monotone le long des blocs et dont la pente est liée aux retraits imposés. Comme pour l'ouverture, un saut du glissement à l'interface entre les blocs est visible.

Ce modèle conceptuel simplifié confirme que des dimensions de blocs, des déformations et des translations de solide rigide différentes induisent un phénomène d'ouverture de fissure facilement observable à l'œil ou sur les images car générant des pixels 'sombres' voire 'noires', ainsi qu'un phénomène de glissement ou de cisaillement (mode II ou mode III) impossible à visualiser et à considérer sans des outils métrologiques adaptés (exemple : H-DIC , Valle et al., 2015). L'apport d'H-DIC à la compréhension du comportement des fissures de dessiccation permet de mesurer ces deux phénomènes localement (c-a-d pour chaque sous-domaine interceptant une discontinuité) et permet aussi les quantifier indépendamment et automatiquement, car ces deux grandeurs sont introduits explicitement dans l'algorithme de corrélation.

L'objectif de l'étude est de quantifier le comportement hydromécanique des fissures de dessiccation sur une période de plus d'un an. La zone d'étude sera soumise à des variations climatiques saisonnières naturelles (RH et T), induisant des mouvements des lèvres des fissures. Ces champs expérimentaux ont été obtenus sur une région d'intérêt (ROI) de 34,4 x 27,5 cm² du front de la galerie EST1996 de la station expérimentale de Tournemire.



figure 1 : (a) Modèle conceptuel composé de trois blocs soumis à un retrait isotrope (ε=0.03-0.05) et à des mouvements de solides rigides (imp_disp=-0.2-0.4) et (b) les valeurs d'ouverture et de glissement aux frontières des blocs suivant la direction (x0, y0=0.).

3. Résultats expérimentaux

L'analyse des images au moyen d'H-DIC permet d'ajouter aux champs de déplacements (u,v) et des petites déformations (ε_{xx} , ε_{xy} , ε_{yy}) obtenus par différences finies, quatre nouveaux champs appelés (figure 2) :

- o exprimant le déplacement local perpendiculaire aux lèvres des fissures en mode l, on parlera aussi d'ouverture de fissure ou de mode l,
- s exprimant le déplacement local tangent aux lèvres des fissures, on utilisera le terme de cisaillement ou de glissement (mode II ou III en mécanique de la rupture),

- α (tan⁻¹(*o*/*s*)) expriment l'angle entre la norme n (= $\sqrt{o^2 + s^2}$) du déplacement des lèvres et la droite matérialisant la fissure dans le sous-domaine,
- θ exprimant l'angle entre la droite matérialisant la fissure dans le repère du sous-domaine.

 α caractérise le mode de fracturation (mode I, II ou mixte). En effet si $\alpha = \pi/2$, le mode de fracturation correspond à un mode I ou mode d'ouverture en mécanique de la rupture. Si $\alpha = 0$ ou π , on parlera de mode de cisaillement pur ou mode II ou III. Lorsque $0 < \alpha < \pi/2$ ou $\pi/2 < \alpha < \pi$, le terme de mode mixte est utilisé avec :

- une dominance du mode d'ouverture, si $\frac{\pi}{4} < \alpha < \frac{\pi}{2}$ ou $\frac{\pi}{2} < \alpha < \frac{3\pi}{4}$,
- une dominance du mode de glissement, si $0 < \alpha < \frac{\pi}{4}$ ou $\frac{3\pi}{4} < \alpha < \pi$.



figure 2 : champs des composantes o et s et des angles α et θ obtenus sur un front de galerie de la station expérimentale de Tournemire. Etat proche d'un état extrême (Δ RH=73.71%, Δ T=7.22°C).

3.1. Fissures sub-horizontales

Cette partie présente le comportement (ouverture, glissement, orientation) des fissures sub-horizontales, c'est-à-dire les fissures parallèles aux plans de stratification. Pour cela

les fissures de sub-horizontales ont été dissocié en fonction des valeurs locales de l'angle θ_H (figure 2). Dans un second temps, les fissures ont été sous-échantillonnées en veillant à limiter la valeur de l'écart-type sur la composante de glissement. Ainsi, une fissure sub-horizontale a été fractionnée en plusieurs sous-fissures (de SH1 à SH23) de longueur différente. Pour chaque sous-fissure (SH) identifiée et pour chaque état déformé, l'ouverture moyenne (o), le glissement moyen (s) ainsi que les écarts-types ont été calculés. Le mode de rupture est commenté au moyen de l'angle α (figure 2).

L'ensemble de ces résultats permet de tracer l'évolution du glissement (s) et de l'angle (α) par rapport l'ouverture (o), pour chaque sous-fissure (SH) et sur un cycle d'un an et ainsi de confirmer que les six fissures sub-horizontales (SH1,SH2,SH3,SH7,SH8,SH23) choisies présentent des différents comportements en termes d'ouverture maximale, de glissement maximal et de mode de rupture dominant (figure 3). L'ouverture a lieu pendant les phases de désaturation du massif rocheux et la fermeture pendant les phase de resaturation. Cette figure permet de constater des hystérèses entre l'ouverture et la fermeture des lèvres (SH1, SH2, SH23 sur la figure 3.b,e,g). Pour d'autres fissures (SH3, SH7, SH8), ce phénomène d'hystérèse n'est pas observable (figure 3.a,d).

Les hystérèses observées sur les tracés o-s (flèches bleues sur la figure 3) et o- α montrent clairement des différences entre les rapports ouverture/glissement lors des phases de désaturation et de resaturation du massif rocheux.





Ces hystérèses apparaissent principalement pour les grandes ouvertures et peuvent être dues principalement à deux phénomènes différents :

- des déformations hydromécaniques induites par la déformation des minéraux argileux gonflants et due à la déformation du réseau poreux. Elles seraient d'intensité différente entre les phases de désaturation et de saturation (effets bouteille « d'encre »),
- mouvements/translations entre les blocs et différés entre les phases de désaturation et de saturation.

Pour l'argilite de Tournemire, les argiles représentent 25 à 50% (en pourcentages massiques) des minéraux et dans cette phase argileuse, les interstratifiés illite/smectite varient entre 5 à 25% (Fauchille 2015). Pham et al., 2007 ont montré que les déformations présentaient une hystérésis pendant une phase de désaturation/saturation et ceux dans les directions parallèles et perpendiculaires à la stratification. Ces travaux permettent d'argumenter que les hystérésis observées entre l'ouverture et le glissement peuvent être due aux déformations hydriques de la roche.

Autre particularité observée, c'est le changement de signe des composantes s_{max} pour les sous-fissures sub-horizontales SH2 et SH20 (non présentée ici) qui sont connectées à une fissure sub-verticale, mais leur valeur s_{max} passent de -0,41mm à 0,13 mm.

Ceci étaye la possible présence de mouvements de blocs, parallèles au plan de stratification. Ces glissements s'ajoutent au glissement induit par la déformation des blocs.

3.2. Aire fracturée (CA)

Cette fracturation composée de fissures sub-horizontales et sub-verticales entraîne une modification des propriétés du matériau en termes hydromécanique (endommagement) mais aussi de perméabilité à l'eau et au gaz [5,43]. Il est proposé dans cette partie de mesurer l'aire fracturée (*CA*) pour chaque état déformé analysé (*t*) en utilisant l'équation 1. Pour cela, l'ouverture locale est convertie en millimètre ($o(x, y).\gamma$), puis l'aire fracturée locale est obtenue en multipliant cette ouverture locale avec la longueur unitaire du pixel (1 pixel=1* γ en mm). Ces deux étapes sont répétés pour chaque pixel fracturé et pour chaque état déformé (t).

$$CA(t) = \sum_{i=0}^{N} o(x, y, t). \gamma^{2}$$
 (1)

avec γ le grandissement (=0,269mm.pixel⁻¹), et *o* la valeur locale de l'ouverture des fissures de dessiccation.



figure 4 : log CA en fonction du nombre de sous-domaines fracturés N(t).

L'analyse de la figure 4 permet d'observer cinq résultats marquants :

- L'aire fracturée (*CA*) augmente 'linéairement' avec le nombre de pixels fracturés, jusqu'à un nombre maximal de sous-domaines fracturés (*N_{max}*=12193).
- Malgré un nombre maximal de sous-domaines fracturés, l'aire fracturée (*CA*) n'est que 227,5mm², traduisant la présence d'une grande quantité de sous-domaine fissuré, mais dont l'ouverture locale est faible. On parle alors de fissures (mineures, et majeures) ayant une petite ouverture. La porosité de surface des fissures (φ_{fissure}=CA/ROI) correspond à 0,29%.
- Une fois toutes les fissures ouvertures, il s'ensuit une période ouverture/fermeture en fonction de l'hygrométrie dans la galerie, jusqu'à une aire facturée maximale (*CA_{max}*) de 595,8mm² obtenue pour des écarts d'humidité relative et de température maximales (ΔHR=72,7% et ΔT=7,9°C) (figure 4).
- A cet instant, le nombre de sous-domaines fracturés n'est plus que 9444, soit une diminution d'environ 2750 sous-domaines pour lequels H-DIC ne détecte pas de fissures parce que l'ouverture est inférieure à la résolution ou bien parce que les fissures sont refermées. Ceci peut être interprété par une dominance des fissures 'majeures' a s'ouvrir préférentiellement et d'avantage au détriment des mineures qui se referment. La différence entre les 'majeures' et les 'mineures' est peut-être leur pénétration/profondeur dans le massif rocheux. A cet état extrême de chargement, la porosité de surface des fissures (*\phi_{fissure*) correspond à 0,75%.
- Une fois l'aire fracturée maximale atteint, il s'ensuit une nouvelle période ouverture/fermeture en fonction de l'hygrométrie dans la galerie, jusqu'à une fermeture complète et à retour à un état déformé proche de l'état initial (CA≈0).

4. Conclusions

Cette étude du comportement hydromécanique d'une roche argileuse (argilite de Tournemire) a été réalisée au travers le développement et l'utilisation d'un algorithme de

corrélation d'images numériques adapté au milieu fracturé. Cette approche est non invasive, sans contact et spatialisant l'information (mesures de champs). Cette avancée a permis de découpler et d'étudier le comportement mécanique (déplacements et déformations) de la phase solide et du comportement des fissures de dessiccation (ouverture et glissement). Ces nouveaux résultats ont aussi permis d'apporter des réponses sur l'aire fracturée du milieu et de la porosité surfacique de fissures. L'ensemble de ces nouveaux résultats expérimentaux mettent en avant les progrès et les avancées effectuées sur la compréhension hydromécanique d'une roche argileuse à l'échelle pluricentrimétrique.

5. Références bibliographiques

- Blümling, P., Bernier F., Lebon P., and Derek Martin C. (2007) The Excavation Damaged Zone in Clay Formations Time-Dependent Behaviour and Influence on Performance Assessment'. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, Clay in natural and engineered barriers for radioactive waste confinement - Part 2, 32, vol 8–14: 588–99..
- Fauchille A.-L. (2015). Déterminismes microstructuraux et minéralogiques de la fissuration hydrique dans les argilites de Tournemire: apports couples de la pétrographie quantitative et de la correlation d'images numériques, thèse de doctorat, Université de Poitiers.
- Hédan S., Anne-Laure Fauchille A.-L., Valle V., Cabrera J., Cosenza P. (2014) One-Year Monitoring of Desiccation Cracks in Tournemire Argillite Using Digital Image Correlation. IJRMMS 68, pp. 22–35.
- Hédan, S., Valle, V., Cabrera J., Cosenza P. A new approach to quantify the anisotropy of hydromechanical strains in clay-rock at the gallery scale. IJRMMS, vol 111,pp. 45-53.
- Pham, Q. T., F. Vales, L. Malinsky, D. Nguyen Minh, and H. Gharbi. 2007) Effects of Desaturation–Resaturation on Mudstone. Physics and Chemistry of the Earth, vol 32, pp. 646–55.
- Rejeb A, Tijani M. (2003) Champ de contrainte dans les argilites de Tournemire. Mesures in situ et interprétation. Rev Fr Géotechnique:75–84.
- Rejeb A, Cabrera J. (2006) Time-dependent evolution of the excavation damaged zone in the argillaceous Tournemire site, Conference: Eurosafe 2006.
- Valle V, Hedan S, Cosenza P, Fauchille AL, Berdjane M. (2015) Digital Image Correlation Development for the Study of Materials Including Multiple Crossing Cracks. Exp Mech vol 55,pp. 379–91.