



Modélisation numérique des interactions hydro-mécaniques entre fissures de dessiccation dans une roche argileuse

Richard Giot, Stephen Hedan, Kassem Nejme, Philippe Cosenza

► To cite this version:

Richard Giot, Stephen Hedan, Kassem Nejme, Philippe Cosenza. Modélisation numérique des interactions hydro-mécaniques entre fissures de dessiccation dans une roche argileuse. 11èmes journées nationales de géotechnique et de géologie de l'ingénieur, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon [INSA Lyon], CFMS, CFMR, CFGI, Jun 2022, Lyon, France. hal-03719852

HAL Id: hal-03719852

<https://hal.science/hal-03719852>

Submitted on 11 Jul 2022

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.

MODELISATION NUMERIQUE DES INTERACTIONS HYDRO-MECANQUES ENTRE FISSURES DE DESSICCATION DANS UNE ROCHE ARGILEUSE

NUMERICAL MODELING OF HYDRO-MECHANICAL INTERACTIONS BETWEEN DESICCATION CRACKS IN AN ARGILLACEOUS ROCK

Richard GIOT¹, Stephen HEDAN¹, Philippe COSENZA¹, Kassem NEJMEH¹

¹UMR 7285 IC2MP, CNRS, Université de Poitiers, ENSI Poitiers, France

RÉSUMÉ – Cette communication présente une modélisation 3D par éléments finis des interactions hydromécaniques en condition non saturée entre fissures de dessiccation d'une roche argileuse. Cette modélisation couplée à une procédure d'inversion de type Monte Carlo a permis d'estimer les profondeurs de propagation des fissures dans le massif rocheux et les paramètres des équations de Van Genuchten Mualem.

ABSTRACT – This paper presents a 3D finite element modeling of hydromechanical interactions in unsaturated condition between desiccation cracks in an argillaceous rock. This modeling coupled with a Monte Carlo-type inversion procedure made it possible to estimate the propagation depths of cracks in the rock mass and the parameters of the Van Genuchten Mualem equations.

1. Introduction

Les roches argileuses sont actuellement étudiées pour le stockage en formations géologiques profondes de déchets radioactifs de haute activité. La sûreté à long terme d'un tel stockage repose en partie sur la sûreté de la zone dite endommagée en paroi des ouvrages souterrains. En effet, l'excavation d'ouvrages souterrains induit l'apparition d'une zone dans laquelle des modifications significatives des propriétés mécaniques, hydrauliques et minéralogiques de la roche argileuse sont observées. Cette zone endommagée pourrait constituer un chemin préférentiel pour la fuite de radionucléides vers la surface.

La zone endommagée dans le massif rocheux est souvent caractérisée après excavation et les résultats montrent que sa forme et son étendue diffèrent suivant l'orientation des galeries par rapport aux directions des contraintes principales initiales dans le massif rocheux. En outre, des études expérimentales ont montré que des fissures de dessiccation se développent sur les parois et le front des galeries dans les massifs rocheux argileux (Cabrera et al. 1999).

L'ouverture et la fermeture de ces fissures de dessiccation ont été investiguées in situ en galerie et les résultats obtenus ont montré qu'elles étaient sensibles aux variations d'humidité relative dans la galerie (Hédan et al. 2014). Ces données expérimentales ont été acquises par métrologie optique, et se sont donc limitées à la quantification d'ouverture de fissures observées au front du massif rocheux argileux. Aucune donnée concernant la propagation des fissures dans la masse rocheuse n'a pu être obtenue. En conséquence, l'étendue de la zone endommagée et, en corolaire, celle des fissures de dessiccation dans la masse rocheuse restent inconnues par ce moyen.

Le présent travail vise à comparer les données d'ouverture de fissure acquises par méthode optique (Hédan et al. 2014) avec celles acquises par modélisation numérique, en

tenant compte de l'influence de la propagation de fissure, qui est un paramètre inaccessible par la méthode expérimentale utilisée. De cette comparaison, par une analyse inverse, il est possible d'évaluer la propagation des fissures dans le massif rocheux. Par ailleurs, divers auteurs ont montré que lorsque plusieurs fissures se développent, leur interaction mutuelle peut affecter également leur propagation, entraînant la déviation et l'arrêt de certaines d'entre elles (Paul et al., 2018). La plupart de ces études sont numériques et ont été réalisées dans le cadre de la fracturation hydraulique. Ainsi, le présent travail porte sur trois fissures fermées observées sur la paroi de la galerie de la station expérimentale de Tournemire afin de rendre compte des possibles interactions mutuelles entre ces fissures.

2. Suivi in situ des fissures de dessiccation

Des fissures induites par la désaturation des massifs argileux ont été observées sur des parois dans plusieurs laboratoires souterrains de recherche, comme la station expérimentale de Tournemire (Cabrera et al. 1999) et le laboratoire du Mont Terri (Möri et al., 2010). Cette fissuration hydrique se traduit notamment in situ par des fissures de dessiccation principalement parallèles à la stratification, bien que des fissures perpendiculaires puissent être aussi détectées. En hiver, qui correspond à l'état sec, l'ouverture des fissures peut atteindre plusieurs millimètres, tandis qu'en été, qui correspond à l'état humide, les fissures sont fermées. Au cours d'une expérimentation conduite sur un front de galerie de la station expérimentale de Tournemire de l'IRSN (Institut de Radioprotection de Sûreté Nucléaire), des ouvertures de fissures de l'ordre de 500 microns au maximum ont été mesurées par métrologie optique i.e., par corrélation d'images numériques (CIN) (Hédan et al., 2014).

2.1. Méthode expérimentale

De nombreux travaux ont montré que la CIN était capable de non seulement quantifier les déformations dans les géomatériaux mais aussi de détecter des fissures dans les roches argileuses (Hédan et al. 2014). Cette méthode non invasive et non destructive permet à la fois d'extraire les champs de déplacements plans et également de mesurer localement l'ouverture de fissures, i.e., par différence des déplacements des deux lèvres de chaque fissure.

Le suivi expérimental des ouvertures de fissures de dessiccation à la station expérimentale de Tournemire par CIN a débuté en mars 2011, quinze ans après le creusement de la galerie 1996. Il a été réalisé sur un cycle complet d'un an. Au cours de cet essai, la température (T) et de l'humidité relative (HR) ont été mesurées par un capteur proche de la zone d'étude (Figure 1).

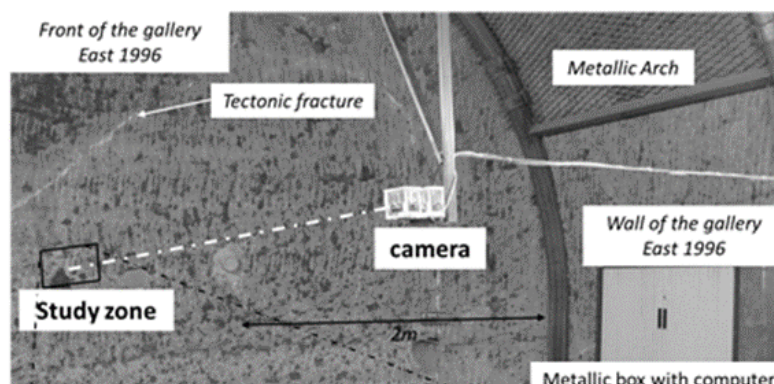


Figure 1. Dispositif expérimental utilisé pour le suivi optique des fissures de dessiccation sur une paroi de la galerie 1996 de la station expérimentale de Tournemire.

2.2. Résultats expérimentaux

La figure 2 présente les valeurs d'HR mesurées dans la galerie lors du suivi annuel des ouvertures de fissures. Cette figure présente notamment deux courbes, en noir et gris, correspondant respectivement aux évolutions des valeurs d'HR brutes mesurées à l'intérieur de la galerie, et des valeurs lissées considérées dans la modélisation numérique présentée dans la suite. La figure 2 montre également l'ouverture de deux fissures horizontales (courbes bleues).

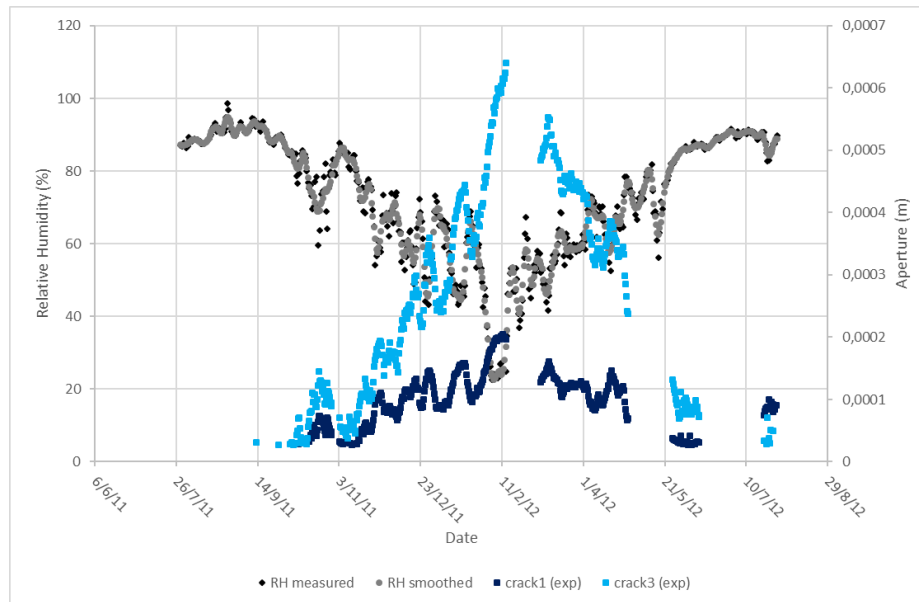


Figure 2 Evolution de l'humidité relative (HR) (en noir et gris) et des ouvertures de deux fissures (courbes bleues) mesurées in situ.

La figure 2 montre que les fissures de dessiccation étaient fermées pendant au moins trois mois en été, ce qui correspond à une HR supérieure à 80-90%. Les ouvertures maximales des fissures subhorizontales ont été observées en février 2012 et leurs valeurs ont varié entre 0,2 et 0,65 mm. Cette ouverture maximale correspond à une faible valeur d'HR dans la galerie (environ 20 %). La précision de mesure de l'ouverture est liée à la configuration du montage expérimental et de la CIN. La CIN détecte en théorie la présence d'une fissure lorsque son ouverture est supérieure à 1/10 de pixel, soit dans notre cas, 27 μm .

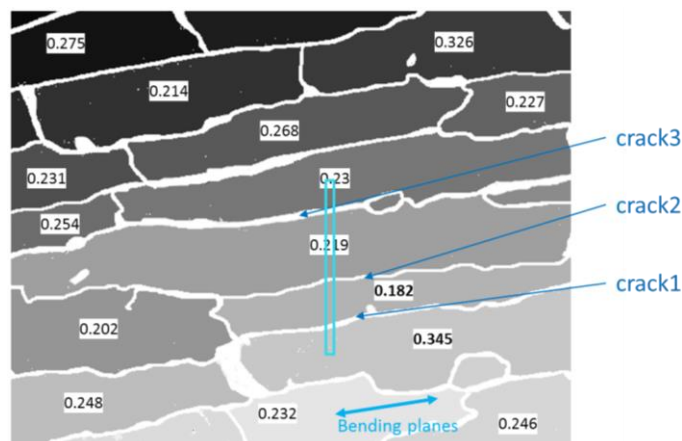


Figure 3. Déformation et fissures de dessiccation observées en paroi de la galerie 1996 de la station expérimentale de Tournemire. Les nombres donnés dans chaque bloc fissuré correspondent aux valeurs du rapport d'anisotropie, déformation horizontale sur déformation verticale.

La figure 3 montre les blocs fissurés par dessiccation et leur déformation au niveau de la zone d'étude de la paroi de la galerie 1996. Les déformations ont été calculées entre deux états hydriques extrêmes soit un écart d'HR de 73,7 % et un écart de T de 7,2°C. Le nombre dans chaque bloc dans la figure 3 est le rapport d'anisotropie de déformation i.e., le rapport déformation horizontale sur déformation verticale. Dans ce qui suit, afin d'étudier les effets des interactions entre fissures voisines, nous nous concentrerons sur la modélisation numérique de trois fissures indiquées sur la figure 3. L'évolution temporelle de l'ouverture des fissures 1 et 3 (crack1 et crack3) est fournie sur la figure 2. L'évolution de l'ouverture de la fissure 2 (crack2) n'est pas disponible à l'heure où cette communication est écrite.

3. Modélisation numérique des fissures de dessiccation en interaction

Dans ce travail, nous utilisons la modélisation numérique pour estimer la profondeur de propagation des fissures dans la masse rocheuse, car cette profondeur ne peut pas être obtenue directement avec la CIN. La modélisation numérique est réalisée avec le code éléments finis Code_Aster (EDF) avec des hypothèses simplificatrices (Giot et al. 2019). L'approche utilisée ici pour identifier la profondeur de propagation de la fissure est une méthode de recherche inverse de type Monte Carlo (Giot et al., 2005).

2.1. Géométrie

Afin de rendre compte des interactions entre fissures, nous avons considéré la distribution spatiale des 3 fissures de dessiccation donnée sur la figure 3. Nous avons utilisé un modèle 3D afin de pouvoir prendre en compte l'anisotropie de la roche, même si dans la modélisation numérique présentée ici, nous nous sommes limités dans une première approche au cas isotrope. Compte tenu du rapport entre la longueur des fissures observées au front de la galerie et leur ouverture, nous avons considéré ces fissures d'extension latérale infinie dans le plan défini par le front de galerie. Ainsi, la géométrie considérée dans notre modélisation numérique est constituée d'un mince bloc 3D normal au front de la galerie (Figure 4). La figure 4 montre également un exemple de géométrie et de maillage considéré dans notre modélisation numérique. La frontière à gauche, en bleu turquoise, correspond au rectangle bleu turquoise de la figure 3 et donc à l'intersection avec le front de la galerie. Les plans bleu foncé correspondent aux lèvres des 3 fissures considérées. Le maillage est progressif, les éléments sont plus petits près des fissures que dans le massif rocheux, permettant un compromis entre temps de calcul et précision des résultats.

Les frontières sur lesquelles les conditions aux limites sont imposées en ce qui concerne l'humidité relative, correspondant au front de la galerie et aux lèvres des fissures, sont les plans en bleu turquoise et en bleu dans la figure 4. Pour une modélisation donnée, les profondeurs de propagation des fissures sont fixées. Nous ne modélisons pas la propagation des fissures, mais la réouverture/refermeture de fissures existantes. On suppose ainsi que les fissures ont été créées lors de l'excavation de la galerie et ont pu se propager durant les premières années de la ventilation de cette dernière. En conséquence, dans notre modélisation, ces fissures ne peuvent que se fermer et se réouvrir lors de variations de HR. La longueur du modèle est fixée à 5 fois la longueur de pénétration dans le massif de la plus longue des fissures. Compte tenu de ce dernier critère, nous avons donc considéré plusieurs géométries et maillages, correspondant à différentes longueurs de fissure dans le massif, afin de quantifier au mieux les profondeurs de propagation des trois fissures considérées.

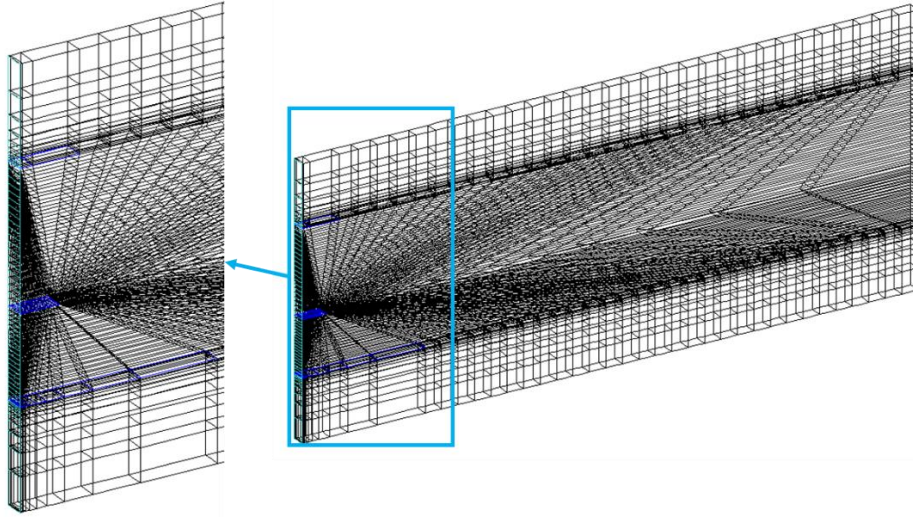


Figure 4. Géométrie et maillage du modèle. Trois fissures horizontales sont indiquées en bleu.

2.2. Modèle théorique

Dans le Code_Aster, nous avons considéré une modélisation avec une inconnue mécanique (champ de déplacement) et deux inconnues hydrauliques (pression de liquide et pression de gaz) et une loi de comportement couplée pour un milieu poreux partiellement saturé avec un liquide (eau) et un gaz (air), ce dernier étant maintenu à la pression atmosphérique. La pression capillaire est définie comme la différence entre la pression du gaz et la pression du liquide. Dans une première approche, nous avons considéré une loi de comportement mécanique poroélastique isotrope (Coussy, 2004) :

$$d\sigma_m = K_O d\varepsilon_v + d\sigma_p \quad (1)$$

$$d\sigma_p = -b(dp_g - S dp_c) \quad (2)$$

$$ds_{ij} = 2G de_{ij} \quad (3)$$

$$d\sigma_{ij} = d\sigma'_{ij} + d\sigma_p \delta_{ij} \quad (4)$$

$$dm_l + dm_v = C_{le} d\varepsilon_v + C_{lc} dp_c + C_{lg} \quad (5)$$

$$dm_a = C_{ge} d\varepsilon_v + C_{gc} dp_c + C_{gg} dp_g \quad (6)$$

σ_m , s , σ' , ε_v , e , m_i , K_O et G sont respectivement la contrainte moyenne totale, le tenseur des contraintes déviatoriques, le tenseur des contraintes effectives, la déformation volumique, le tenseur des déformations déviatoriques, le contenu massique du fluide des constituants, et les coefficients de compressibilité drainée et de cisaillement. La contrainte σ_p représente la contrainte mécanique due aux fluides saturant les pores, et S le degré de saturation en eau. Les paramètres de couplage C_{ij} sont fonctions de la saturation et de sa dérivée par rapport à la pression capillaire, ainsi que des pressions partielles (Giot et al., 2019). En négligeant les effets de la gravité, la loi de Darcy généralisée pour la diffusion de l'eau et du gaz s'écrit :

$$\frac{w_i}{\rho_i} = -\lambda_i \nabla p_i \quad \lambda_i = \frac{k k_r^i [S]}{\mu_i} \quad (7)$$

k est la perméabilité intrinsèque, λ_i , w_i , k_r^i , ρ et μ représentent respectivement la conductivité hydraulique, le flux hydraulique, la perméabilité relative, la densité et la viscosité dynamique du fluide i . Les équations de conservation des masses d'eau et d'air sec, ainsi que la conservation du moment sont également prises en compte. Dans le cas d'un milieu partiellement saturé, deux fonctions de première importance sont les isothermes de sorption, qui donnent la relation entre la pression capillaire et le degré de saturation, et la

fonction de la perméabilité relative. Dans la modélisation présentée ici, nous avons examiné les équations empiriques proposées par Van Genuchten et Mualem qui ont déjà démontré leur pertinence pour les roches argileuses (Guillon et al., 2012):

$$S_{we} = \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{p_c}{p_r}\right)^n\right]^{1-\frac{1}{n}}} \quad S_{wr} = \frac{S - S_{wr}}{1 - S_{wr}} \quad (8)$$

(9)

$$k_r^w = \sqrt{S_{we}} \left[1 - (1 - S_{we})^{(1-\frac{1}{n})}\right]^2 \quad (10)$$

$$k_r^g = \sqrt{1 - S_{we}} (1 - S_{we})^{2(1-\frac{1}{n})} \quad (11)$$

S , p_c , k_r^w and k_r^g sont respectivement le degré de saturation en eau, la pression capillaire, la perméabilité relative à l'eau et la perméabilité relative à l'air. n , S_{wr} (saturation résiduelle en eau) et p_r sont les paramètres d'expressions empiriques de Van Genuchten Mualem et sont calibrés à partir de tests spécifiques. Pour l'argilite de Tournemire, nous avons considéré comme premier jeu de paramètres les valeurs proposées par Millard et Rejeb (2008). Les autres paramètres de la loi de comportement poro-élastique ont été fixés aux valeurs proposées dans la littérature pour les argilites de Tournemire (Hédan et al., 2014).

2.2. Conditions aux limites, conditions initiales et phasage

En ce qui concerne les conditions aux limites, sur les frontières supérieure, inférieure et droite du modèle, nous définissons des déplacements normaux nuls et des flux d'eau et d'air nuls. La frontière gauche du modèle, correspondant au front de la galerie, ainsi que les lèvres de la fissure, sont soumises aux conditions expérimentales mesurées in situ. Hormis la phase de modélisation de l'excavation de la galerie, ces frontières sont libres de contrainte. Concernant la condition aux limites hydrauliques sur ces frontières, nous imposons une pression capillaire, calculée à partir de l'humidité relative mesurée dans la galerie in situ (voir figure 2), via la relation de Kelvin.

La modélisation numérique comprend trois étapes. La première étape vise à imposer des contraintes initiales dans l'ensemble du domaine, déduites de Cabrera et al. (1999). La deuxième étape consiste en une modélisation simplifiée de l'excavation et des 15 premières années de ventilation avant le suivi optique des ouvertures de fissures. Le but de ces deux premières étapes est d'obtenir un état de contrainte et de pression réaliste, proche des conditions expérimentales au début du suivi optique des fissures.

La dernière phase correspond à la modélisation du cycle de ventilation lors du suivi optique des ouvertures de fissures. Les frontières correspondant à la paroi de la galerie et aux lèvres des fissures sont soumises à une pression capillaire dont l'évolution est donnée par les valeurs d'humidité relative mesurées in situ dans la galerie expérimentale. La figure 2 fournit le cycle d'humidité relative imposée, qui a été lissé par rapport au cycle expérimental, afin d'assurer la stabilité numérique des calculs. Notre objectif ici est de faire coïncider l'évolution de l'ouverture calculée par modélisation numérique et celle associée aux ouvertures mesurées in situ. Pour cela, nous ajustons les profondeurs de propagation des fissures dans le massif rocheux, ainsi que les paramètres des relations de Van Genuchten Mualem. De cette façon, nous réalisons une identification de la profondeur de propagation des fissures dans le massif rocheux, ainsi que des paramètres de Van Genuchten, par une approche directe consistant à effectuer un certain nombre de modélisations numériques dans lesquelles les longueurs (de propagation) des fissures sont modifiées, jusqu'à atteindre un bon ajustement entre l'ouverture expérimentale et l'ouverture numérique de la fissure. En pratique, cette approche par essais/erreurs consiste à effectuer

plusieurs dizaines d'essais i.e., plusieurs dizaines de calculs. D'un calcul à l'autre, les longueurs de propagation varient, mais lors d'un calcul donné, ces longueurs sont figées puisque l'on ne considère pas le processus de propagation lui-même. On notera que cette approche ne garantit pas complètement l'unicité du résultat obtenu.

4. Résultats et discussion

La figure 5 donne la comparaison entre les ouvertures expérimentales des fissures 1 et 3 (le suivi temporel mesuré n'est pas disponible pour la fissure 2 ; seule l'évolution modélisée de cette dernière est indiquée sur la figure 5) et les ouvertures calculées par calcul par éléments finis, pour le meilleur ajustement trouvé.

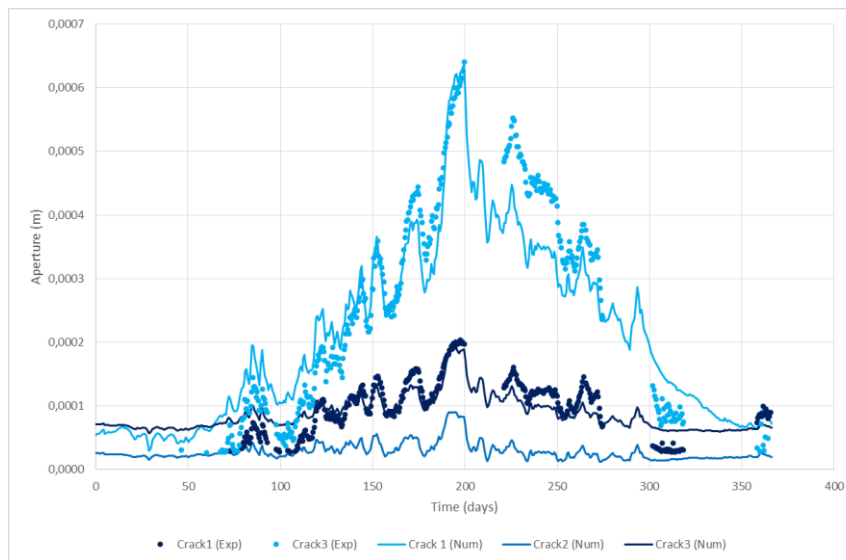


Figure. 5 Comparaison entre ouvertures expérimentales de fissures et ouvertures calculées numériquement.

On peut voir que, bien que plusieurs hypothèses simplificatrices aient été prises en compte, il est possible de trouver un bon ajustement entre les ouvertures expérimentales et numériques pour les fissures 1 et 3. Néanmoins, des écarts existent et l'ajustement est meilleur dans la phase de séchage (ouverture des fissures) que dans la phase d'imbibition (fermeture des fissures). Ceci est essentiellement dû à l'isotherme de sorption. Les expressions proposées par Van Genuchten et Mualem ont surtout prouvé leur efficacité pour de faibles variations d'HR alors que dans l'expérimentation considérée ici, l'HR varie entre 20 et 100 %. Guillon et al. (2011) a montré qu'il est difficile de trouver un ensemble de paramètres des expressions de Van Genuchten et Mualem qui corresponde correctement à l'ensemble des variations de masse expérimentales mesurées lors des essais de séchage en considérant une large gamme d'HR. Nos résultats semblent confirmer les résultats de Guillon et al. (2011), ce qui signifie que ces expressions empiriques ne sont pas en mesure de capturer la physique complète du séchage et de l'imbibition sur une large plage d'HR.

Avec l'ensemble des paramètres inversés pour l'isotherme de sorption et la perméabilité relative ($m=1,05$, $S_{wr}=0,2$, $p_r=360$ MPa), on peut conclure que l'étendue de la zone désaturée est très limitée dans le massif rocheux, à quelques centimètres autour des galeries. Pour atteindre une désaturation significative, il faut considérer une valeur assez élevée de pression capillaire, qui ne peut se trouver qu'à proximité des galeries.

Enfin, le meilleur ajustement, représenté sur la figure 5, correspond à des profondeurs de propagation de 4 cm, 0,5 cm et 0,5 cm respectivement pour les fissures 1, 2 et 3. A titre

de comparaison, une approche similaire limitée à l'étude d'une seule fissure a fourni des valeurs allant de 4 à 12 cm (Giot et al., 2019). Même si les résultats obtenus dans le présent travail avec trois fissures en interaction sont dans une plage inférieure, il apparaît donc que négliger les interactions des fissures entraîne une surestimation des profondeurs de pénétration des fissures.

5. Conclusion

Une modélisation par éléments finis hydromécanique totalement couplée en milieu partiellement saturé associée à une méthode d'identification de type Monte-Carlo permet d'ajuster convenablement des valeurs d'ouverture expérimentale de fissures de dessiccation obtenues par un suivi optique sur un front de galerie, au cours d'un cycle de ventilation d'un an (séchage et imbibition). Nous avons modélisé trois fissures, permettant de rendre compte de l'interaction potentielle entre elles.

Même si l'ajustement n'est pas parfait, les résultats obtenus sont encourageants et permettent d'envisager plusieurs perspectives pour de futurs travaux. Les perspectives les plus naturelles sont d'une part la prise en compte de la propagation des fissures dans la modélisation du processus de dessiccation et d'autre part, il apparaît judicieux de considérer le comportement anisotrope (isotrope transverse) de la roche argileuse.

6. Références bibliographiques

- Cabrera J, Volant Ph, Baker C, Pettit W, Young RP (1999). Structural and geophysical investigations of the EDZ in indurated argillaceous media: the tunnel and the galleries of the IPSN Tournemire Site, France. Proceedings of the 37th US Rock Mechanics Symposium, Vail, USA, 6th 9th June 1999, pp. 957-964.
- Coussy O (2004). Poromechanics. John Wiley and Sons, Chichester.
- Giot R, Giraud A, Homand F (2005) Three-Dimensional modelling of stress relaxation tests with finite element in anisotropic clayey medium: direct problem and back analysis. *Geotechnical and Geological Engineering* 24:919-947.
- Giot R, Hédan S, Cosenza P (2019) Hydro-mechanical numerical modelling of the opening and closing of desiccation cracks in claystone. *Computational & Geoenvironmental Geomechanics for Underground and Subsurface Structures (COGGUS2)*, Nancy, France, 12th-14th February 2019.
- Guillon T, Giot R, Giraud A, Armand G (2012) Response of Callovo-Oxfordian claystone during drying tests. *Acta Geotechnica* 7:313-332.
- Hedan S, Fauchille AL, Valle V, Cabrera J, Cosenza P (2014) One-year monitoring of desiccation cracks in Tournemire argillite using digital image correlation. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 68:22-35.
- Millard A, Rejeb A (2008) Simulation of Short Term and Long Term Responses of the Tournemire Argillite in a Mine-by-test Experiment. Proceedings of the 12th International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG), Goa, India, 1st-6th October 2008, 555-560.
- Möri A, Bossart P, Matray JM, Franck E, Fatmi H, Ababou R (2010) Mont Terri Project: cyclic deformations in the Opalinus Clay. Proceedings of the International Meeting of Clay in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinements, Nantes, France, 29th March – 1st April 2010, 103-124.
- Paul B, Faivre M, Massin P, Giot R, Colombo D, Golfier F, Martin A (2018) 3D coupled HM–XFEM modeling with cohesive zone model and applications to non-planar hydraulic fracture propagation and multiple hydraulic fractures interference. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 342:321–353.