

# MODELISATION NUMERIQUE THERMO-HYDRO-MECANIQUE DE L'OUVERTURE/FERMETURE D'UNE FISSURE DE DESSICCATION

## ***NUMERICAL THERMO-HYDRO-MECHANICAL MODELING OF THE OPENING / CLOSING OF A DESICCATION CRACK***

Richard Giot<sup>1</sup>, Stephen Hédan<sup>1</sup>, Philippe Cosenza<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Université de Poitiers, IC2MP-HydrASA, CNRS UMR7285, ENSI Poitiers, Poitiers, France

**RÉSUMÉ** – Le suivi sur plusieurs années d'un front de galerie de la station expérimentale de Tournemire par métrologie optique a mis en évidence la présence de fissures de dessiccation sensibles aux variations d'humidité relative dans la galerie. Afin de mettre en évidence une éventuelle relation entre l'ouverture et l'extension des fissures de dessiccation dans le massif rocheux, on recourt à des modélisations numériques couplées hydro-mécaniques.

**ABSTRACT** – The monitoring during several years of a gallery front of the Tournemire experimental station by optical metrology showed the presence of desiccation cracks sensitive to relative humidity variations in the gallery. In order to highlight a possible relationship between the opening and the extension of the desiccation cracks, we use coupled hydro-mechanical numerical modeling.

### **1. Introduction**

Les roches argileuses sont considérées comme le dispositif potentiel pour le stockage des déchets hautement radioactifs. Parmi les questions cruciales liées à l'évaluation de la sécurité à long terme de ces dépôts géologiques, l'étude de la zone endommagée (EDZ) est d'une importance particulière. Le creusement d'une galerie souterraine entraîne un endommagement du massif rocheux, au sein d'une zone appelée EDZ (Excavated Damage Zone), correspondant à une modification des propriétés (mécanique, hydrique, minéralogique) de la roche. Dans le cas du stockage, les caractéristiques favorables (ex : faible perméabilité) peuvent être modifiées localement. De nombreuses études se sont intéressées à la caractérisation de cette EDZ par des essais expérimentaux en laboratoire, *in situ*, mais aussi par des modélisations numériques. De plus, l'étendue de cette zone dans le massif n'est obtenue qu'après carottage et les résultats montrent que la forme et l'étendue de l'EDZ sont différentes suivant l'orientation des galeries par rapport aux contraintes horizontales régnant dans le massif (Armand et al. 2014). Parallèlement à ces travaux, des études ont montré que les fissures de dessiccation étaient présentes sur les parois et le front des galeries. L'ouverture/fermeture de ces fissures ont été analysées sur une période d'un an, montrant que ces dernières étaient sensibles à l'humidité relative au sein de la galerie. Ces données expérimentales, obtenues par métrologie optique, se limitent à l'ouverture des fissures de la roche argileuse, et aucune donnée sur la longueur des fissures dans le massif ne peut ainsi être obtenue. Ainsi l'étendue de l'EDZ au sein du massif reste inconnue.

Ce travail vise à comparer des données d'ouverture de fissures issues d'une analyse expérimentale à celles obtenues par modélisation numérique. Les données expérimentales ont été obtenues sur un front de galerie, excavée en 1996, de la station expérimentale de Tournemire (IRSN). Le début du suivi temporel des ouvertures de fissures était en Mars 2011, soit 15 ans après l'excavation de la galerie.

## 2. Suivi expérimental *in situ* de fissures de dessiccation

Les fractures associées à la désaturation du massif rocheux argileux ont été observées sur plusieurs fronts de galeries et dans plusieurs laboratoires de recherche souterrains, par exemple la plate-forme expérimentale de Tournemire (Matray et al. 2007) et le laboratoire du Mont Terri (Möri et al. 2010). Ce processus de fracturation hydrique est mis en évidence *in situ* par des fissures sub-horizontales espacées de plusieurs décimètres sur toutes les parois verticales en contact avec l'air ambiant. En hiver (état sec), les ouvertures de fissures peuvent atteindre quelques millimètres, en été (état humide) ces fissures sont fermées. Ces fissures induites par séchage sont parallèles aux plans de stratification. Les travaux de Hedan et al. (2014), ont mis en évidence la présence de fissures sub-verticales dont l'ouverture est du même ordre de grandeur que les fissures sub-horizontales, soit 500 microns au maximum (figure 1).

### 2.1. Méthode expérimentale

Le suivi temporel de l'ouverture des fissures de dessiccation a été mené par métrologie optique sur un cycle annuel. La technique utilisée est la corrélation d'images numériques (CIN). La température (T) et l'humidité relative (HR) ont été également mesurées par un capteur proche de la zone d'étude. Les variations de T et HR sont liées à une ventilation naturelle de la galerie. L'observation de localisations de déformations dans les géomatériaux et la détection des fissures dans les roches argileuses (Yang et al. 2015, Hedan et al. 2014) a été démontrée avec succès par CIN. Cette méthode a l'avantage d'être non-invasive et non destructive et elle permet d'extraire les champs de déplacement plan. Ces derniers permettent de mesurer localement l'ouverture des fissures, par différence des déplacements de part et d'autre de la fissure. Les valeurs présentées sur la figure 1 correspondent à l'ouverture moyenne calculée le long de la fissure et pour trois fissures sub-horizontales. Les ouvertures moyennes ont été tracées en fonction du temps (figure 1a) et en fonction de l'humidité relative (figure 1b).

### 2.2. Principaux résultats

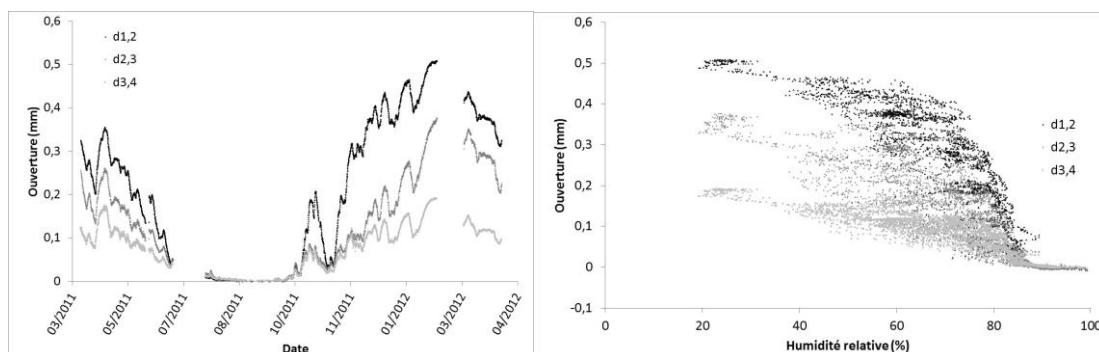


Figure 1. Ouvertures de trois fissures sub-horizontales en fonction de temps(a) et en fonction de l'humidité relative (b).

Les résultats présentés sur la figure 1 montrent que les fissures de dessiccation sont fermées pendant au moins trois mois, en période estivale. L'ouverture maximale des fissures sub-horizontales est visible en février 2012 et leur valeur est de l'ordre de 0,2 à 0,5 mm. Entre ces deux états, la figure 1b montre que l'ouverture maximale correspond à une faible humidité relative au sein de la galerie (environ 20%) et que les fissures sont fermées lorsque l'humidité relative est supérieure à 80-90%. Toutefois, la précision de mesure de l'ouverture est liée à la configuration du montage expérimental et à la CIN.

Dans notre cas, on estime que lorsque l'ouverture d'une fissure donnée est supérieure au 1/10 de pixel (soit 27  $\mu\text{m}$ ), la CIN détecte la présence de cette fissure.

### 3. Modélisation numérique des fissures de dessication

Dans ce travail, on essaye de mettre en évidence une relation entre l'ouverture des fissures mesurée *in situ* par méthode optique et la profondeur de pénétration de ces fissures dans le massif. Cette dernière grandeur n'étant pas accessible expérimentalement avec la méthode utilisée *in situ*, on procède par modélisation numérique. Les modélisations sont réalisées à l'aide du code aux éléments finis Code\_Aster (EDF), par une approche simplifiée dans un premier temps.

#### 3.1. Géométrie

Etant donné le rapport entre la longueur des fissures observées en paroi et leur ouverture, on considère ces fissures d'extension infinie. On s'intéressera par ailleurs à la « section courante » des fissures c'est-à-dire aux zones médianes éloignées des pointes et des zones de jonctions. Dans ces conditions, on considérera donc des modélisations en déformations planes, dans un plan perpendiculaire au front de la galerie et intersectant la fissure de manière transversale. On considère par ailleurs que le problème est symétrique par rapport au plan axial de la fissure. La géométrie considérée est représentée sur la figure 2. La frontière gauche de cette géométrie correspond au front de la galerie. La lèvre de la fissure, dont la longueur (ou pénétration) varie d'un calcul à l'autre, est située à gauche de la limite inférieure. On représente en bleu sur la figure 2 les frontières sur lesquelles seront imposées les conditions aux limites en termes d'humidité relative, et correspondant au front de la galerie et la lèvre de la fissure. Pour une même modélisation, la longueur de la fissure est fixée. On ne modélise pas la propagation d'une fissure, mais la réouverture/refermeture d'une fissure prédefinie. On considère que la fissure a été créée lors d'une phase antérieure (creusement) et qu'elle ne fait donc que se refermer et se rouvrir lors des sollicitations hydriques. Les dimensions du modèle sont fixées à 5 fois la longueur de la fissure, soit de 20 à 60 cm de côté selon le calcul.

Sur la figure 2, on représente également le maillage utilisé pour les modélisations. Il est constitué de 1281 nœuds et 400 éléments de type quadrangulaire à 8 nœuds. Les éléments sont dits P2P1 dans Code\_Aster, c'est-à-dire que l'on considère une interpolation quadratique pour les grandeurs mécaniques et linéaire pour les grandeurs hydrauliques, ce qui confère plus de stabilité aux calculs numériques. Le maillage est progressif, les éléments sont plus petits à proximité de la fissure qu'au sein du massif, ce qui permet un bon compromis entre temps de calcul et précision des résultats.

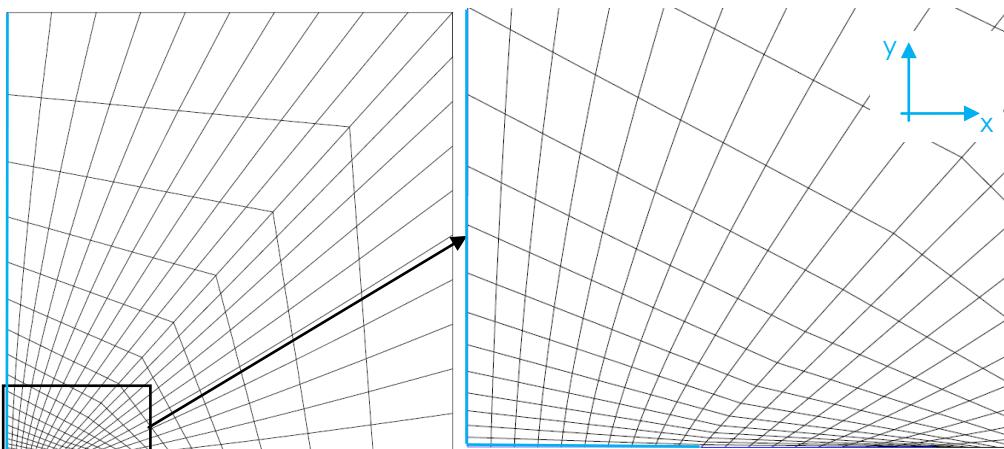


Figure 2. Géométrie et maillage entier (gauche) et zoom sur la fissure (droite)

### 3.2. Modèle

#### 3.2.1. Equations

Dans Code\_Aster, on considère une modélisation à une inconnue mécanique (champ de déplacement) et deux inconnues hydrauliques (pression de liquide  $p_l$  et pression de gaz  $p_g$ ) et une loi de comportement couplée pour un milieu poreux non saturé avec un liquide (l'eau) et du gaz (l'air) maintenu à pression atmosphérique. La pression capillaire  $p_c$  est définie comme la différence entre la pression de gaz et la pression de liquide.

Pour la roche argileuse, on considère une loi de comportement mécanique poro-élastique isotrope. Cette loi en conditions partiellement saturées (Coussy, 2004) s'écrit de manière incrémentale :

$$d\sigma_m = K_o d\epsilon_v + d\sigma_p ; d\sigma_p = -b(dp_g - S_l dp_c) \quad (1)$$

$$ds_{ij} = 2Gde_{ij} \quad (2)$$

$$d\sigma_{ij} = d\sigma'_{ij} + d\sigma_p \delta_{ij} \quad (3)$$

$$dm_l + dm_v = C_{le} d\epsilon_v + C_{lc} dp_c + C_{lg} dp_g \quad (4)$$

$$dm_a = C_{ge} d\epsilon_v + C_{gc} dp_c + C_{gg} dp_g \quad (5)$$

Dans ces équations,  $\sigma_m$ ,  $s$ ,  $\sigma'$ ,  $\epsilon_v$ ,  $m_i$ ,  $K_o$  et  $G$  désignent respectivement la contrainte moyenne totale, le tenseur déviateur des contraintes, le tenseur des contraintes effectives, la déformation volumique, le tenseur déviateur des déformations, l'apport de masse fluide des constituants, et les coefficients de compressibilité drainé et de cisaillement. La contrainte  $\sigma_p$  représente la contrainte mécanique due aux fluides saturant les pores, et  $S_l$  la saturation en liquide. 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.  $p_g$  et  $p_c$  désignent respectivement la pression de gaz et la pression capillaire.

En négligeant les effets de la gravité, la loi de Darcy généralisée pour la diffusion du liquide et du gaz, s'écrit :

$$\frac{\mathbf{w}_i}{\rho_i} = -\lambda_i \nabla \mathbf{p}_i \quad \lambda_i = \frac{k K_i^{rel} [S_l]}{\mu_i} \quad (6)$$

où  $k$  est la perméabilité intrinsèque, et  $\lambda_i$ ,  $w_i$ ,  $K_i^{rel}$  et  $\mu_i$  désignent respectivement la conductivité, le flux, la perméabilité relative et la viscosité dynamique du fluide  $i$ . La diffusion de la vapeur dans le gaz n'est pas prise en compte dans les modélisations présentées ici.

Les équations de conservation des masses d'eau et d'air sec, et de quantité de mouvement s'écrivent :

$$\frac{\partial}{\partial t} [m_l + m_v] = -\nabla \cdot [\mathbf{w}_l + \mathbf{w}_v] \quad \frac{\partial m_a}{\partial t} = -\nabla \cdot [\mathbf{w}_a] \quad \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} = 0 \quad (7)$$

Dans le cas d'un milieu partiellement saturé, il faut par ailleurs définir l'isotherme de sorption, qui donne la relation entre la pression capillaire et la saturation, ainsi que la fonction de perméabilité relative introduite dans l'équation (6). Dans les modélisations présentées ici, nous avons considéré les équations empiriques proposées par Vachaud-Vauclin (Vachaud et al. 1979) qui ont déjà démontré leur applicabilité aux roches argileuses (Giraud et al., 2009) :

$$S_l(p_c) = \frac{a_{vv}}{a_{vv} + \left(\frac{p_c}{10^4}\right)^{b_{vv}}} \quad (8)$$

$$K_l^{rel}(S_l) = \frac{1}{1 + (a_l^{rel}(1 - S_l))^{b_l^{rel}}} \quad K_g^{rel}(S_l) = 1 - S_l \quad (9)$$

Les paramètres  $a_{vv}$ ,  $b_{vv}$ ,  $a_l^{rel}$  et  $b_l^{rel}$  sont les paramètres des expressions empiriques de Vachaud-Vauclin et sont calibrés sur la base d'essais spécifiques. En l'absence de données expérimentales pour ces paramètres sur la roche considérée, nous avons sélectionné un jeu de paramètres établi sur des roches argileuses possédant des caractéristiques pétrographiques et pétrophysiques proches de celles des argilites de Tournemire (Giraud et al., 2009). Pour les autres paramètres de la loi de comportement poro-élastique, nous avons utilisé les valeurs proposées dans la littérature pour les argilites de Tournemire (Hédan et al., 2014)

### 3.2.2. Conditions aux limites

Sur les limites supérieure et inférieure du modèle, ainsi que sur la limite droite, nous imposons des déplacements verticaux et des flux d'eau et d'air nuls.

La limite gauche du modèle, correspondant au front de la galerie, et la lèvre supérieure de la fissure sont soumises aux conditions expérimentales *in situ*. Dans la plus grande partie des modélisations, ces bords sont libres et soumis à une pression mécanique nulle. En ce qui concerne la condition aux limites hydraulique sur ces bords, nous imposons une pression capillaire, calculée à partir de l'humidité relative mesurée au sein de la galerie *in situ*, via la relation de Kelvin :

$$p_c^{imp} = -\frac{\rho_l RT}{M_v} \ln[h_r^{imp}] \quad (10)$$

où  $h_r^{imp}$  est l'humidité relative mesurée en paroi de la galerie.

### 3.2.3. Conditions initiales et phasage

Les modélisations numériques sont réalisées en trois étapes.

La première étape consiste en l'imposition des contraintes initiales dans l'ensemble du domaine. Nous avons considéré l'état de contraintes *in situ* dans les argiles de Tournemire au niveau de la galerie expérimentale (Hédan et al., 2014), que nous avons recalculé dans le repère attaché à la fissure à l'aide d'un tenseur de rotation.

La deuxième étape consiste en l'annulation des efforts au front de la galerie et sur la lèvre de la fissure, ainsi que l'imposition progressive, sur ces mêmes frontières, d'une pression capillaire correspondant à l'humidité relative mesurée en galerie au début de la phase de suivi optique des fissures.

L'objectif de ces deux premières phases est de modéliser de manière très simplifiée la phase de creusement et les 15 années de ventilation avant suivi optique des fissures. On

amène ainsi le modèle à un état réaliste de contrainte et de pressions, proche des conditions expérimentales au début du suivi optique de la fissuration. À l'issue de ces deux étapes, on dispose d'une géométrie précise avec une fissure d'ouverture de l'ordre de celles mesurées *in situ au début du suivi optique*, avec des champs hydro-mécaniques statiquement admissibles, et une humidité relative correspondant à celle mesurée en début de suivi.

La troisième et dernière phase correspond à la phase de suivi optique de l'ouverture des fissures. Les limites correspondant à la paroi de la galerie et à la lèvre de la fissure sont soumises à une pression capillaire dont l'évolution est imposée par les valeurs d'humidité relative mesurées *in situ* dans la galerie expérimentale. La figure 3 illustre ce cycle d'humidité relative imposé. On compare l'évolution de l'ouverture calculée via les modélisations numériques et les ouvertures mesurées *in situ*. Afin de reproduire au mieux l'évolution des ouvertures expérimentales, on ajuste la profondeur de pénétration de la fissure au sein du massif (i.e. la longueur de la fissure dans le modèle). On procède ainsi à une identification par approche directe de la profondeur de pénétration des fissures dans le massif, en effectuant un certain nombre de modélisations dans lesquelles on fait varier la longueur (ou pénétration) de la fissure.

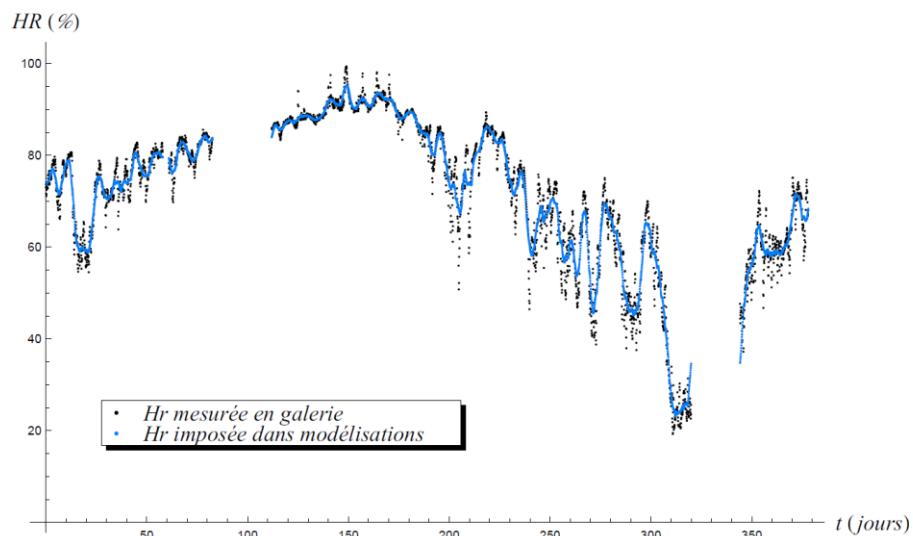


Figure 3. Humidité relative imposée en paroi de galerie et sur la lèvre de fissure.

### 3.3. Résultats et discussions

On donne sur les figures 4 et 5 les principaux résultats des modélisations numériques, relatifs à l'ouverture des fissures. La figure 4 représente l'évolution de l'ouverture des 3 fissures présentées en partie 2 en fonction du temps tandis que la figure 5 donne l'évolution de ces ouvertures en fonction de l'humidité relative.

On constate que les modélisations numériques fournissent des résultats qualitativement proches des résultats expérimentaux. Néanmoins, elles surestiment les ouvertures maximales des fissures par rapport aux résultats expérimentaux. Une explication possible se trouve dans l'isotherme de sorption et la perméabilité relative considérés dans les modélisations numériques. En effet, comme indiqué précédemment, nous manquons d'informations précises, pour le matériau considéré, sur ces expressions. Pour améliorer la prédiction des modélisations numériques, il est donc nécessaire, soit d'obtenir des informations expérimentales sur ces paramètres, soit de procéder à un recalage de ces paramètres à partir des données d'ouverture mesurées. Il s'agirait alors de procéder à une analyse inverse plus complète des résultats expérimentaux, que nous n'avons pas encore menée.

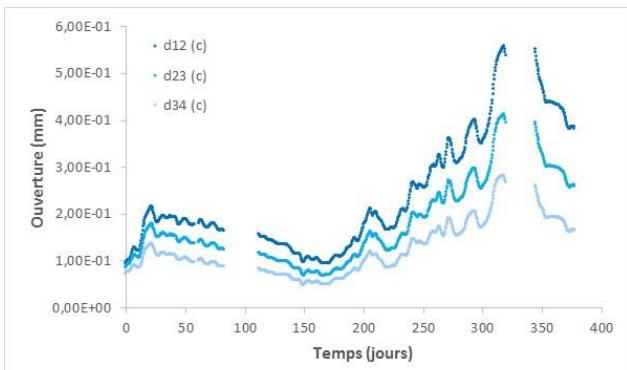


Figure 4. Évolution de l'ouverture des fissures en fonction du temps.

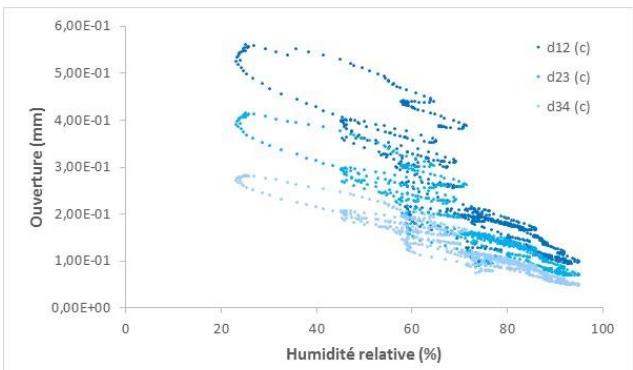


Figure 5. Évolution de l'ouverture des fissures en fonction de l'humidité relative.

Par ailleurs, à partir du recalage des ouvertures mesurées et calculées, les pénétrations des fissures d12, d23 et d34 seraient respectivement de l'ordre de 12 cm, 7 cm et 4 cm. Ces estimations sont cohérentes avec les résultats apportés par la géophysique. Des campagnes de sismique réfraction haute résolution et de tomographie électrique réalisées sur le même site ont montré que l'épaisseur de la zone endommagée sur les parements variait entre 15 et 35 cm (Cabrera et al., 2001 ; Okay, 2011).

On donne, sur la figure 6 la comparaison des évolutions des ouvertures calculées et mesurées pour les trois fissures d12, d23 et d34 respectivement.

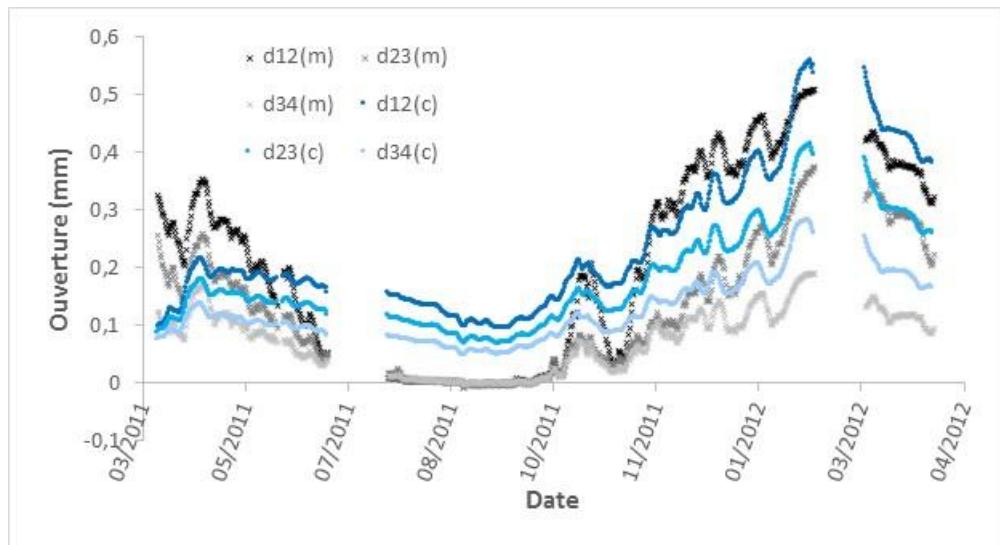


Figure 6. Comparaison des ouvertures calculées (c) et mesurées (m).

#### 4. Conclusion

Dans cette étude, nous avons montré la relation entre ouverture des fissures de dessication en paroi des galeries en massif rocheux argileux et profondeur de pénétration dans le massif, par comparaison de mesures optiques in situ et des résultats de modélisations numériques hydro-mécaniques simplifiées. Ces premiers résultats restent assez qualitatifs, et de nombreuses perspectives existent pour améliorer l'ajustement des données mesurées in situ et calculées par modélisations numériques, et ce afin d'améliorer la connaissance de la relation entre ouverture et pénétration.

À court terme, il serait nécessaire de prendre en compte l'anisotropie du comportement hydro-mécanique de l'argile de Tournemire. Cela nécessitera la mise en place de

modélisations numériques 3D. On pourra également améliorer la prise en compte du creusement et des 15 années de ventilation avant suivi optique des fissures.

À moyen terme, il s'agirait d'identifier conjointement la profondeur de pénétration de la fissure dans le massif et les paramètres de l'isotherme de sorption et de la perméabilité relative pour reproduire à la fois l'ouverture en début de suivi et son évolution précise au cours des cycles d'humidité relative. Ceci consistera en la résolution d'un problème inverse sur les paramètres de l'isotherme de sorption et de la perméabilité relative. Jusqu'à présent, nous n'avons pas cherché à reproduire précisément l'ouverture en début de suivi du fait de l'approche simplifiée considérée pour la modélisation des phases avant suivi optique.

Enfin, à plus long terme, l'idée serait de prendre en compte la propagation des fissures de dessication, ou du moins de mettre en évidence cette propagation ou non des fissures en cours de séchage/imbibition. Les modélisations nécessiteront l'utilisation d'un modèle HM-XFEM en cours de développement au sein du Code\_Aster (Faivre et al. 2016). Les développements en cours sur ce modèle concernent l'introduction de l'anisotropie et du la prise en compte du domaine partiellement saturé.

## 5. Références bibliographiques

- Armand G., Leveau F., Nussbaum C., de La Vaissiere R., Noiret A., Jaeggi D., Landrein P. & Righini C. (2014). Geometry and Properties of the Excavation-Induced Fractures at the Meuse/Haute-Marne URL Drifts. *Rock Mech and Rock Eng*, vol. 47, n°1, pp. 21-41.
- Cabrera J., Volant Ph., Baker C., Pettit W., Young, R.P., (1999). Structural and geophysical investigations of the EDZ in indurated argillaceous media: the tunnel and the galleries of the IPSN Tournemire Site, France. *Proc. of the 37th US Rock Mechanics Symp.*, Vail, USA, pp. 957-964.
- Coussy O. (2004). *Poromechanics*, John Wiley and Sons, Chichester.
- Faivre M., Paul B., Golfier F., Giot R., Massin P., Colombo D. (2016). 2D coupled HM-XFEM modeling with cohesive zone model and applications to fluid-driven fracture network. *Eng Fract Mech*, vol. 159, pp. 115-143.
- Giraud A., Giot R., Homand F. (2009). Poromechanical modelling and inverse approach of drying tests on weakly permeable porous rocks. *Transport Porous Med*, vol. 76, n°1, pp. 45-66.
- Okay G. (2011). Caractérisation des hétérogénéités texturales et hydriques des géomatériaux argileux par la méthode de Polarisation Provoquée: Application à l'EDZ de la station expérimentale de Tournemire. Thèse de l'Université Pierre et Marie Curie, Paris.
- Hedan S., Fauchille A.L., Valle V., Cabrera J., Cosenza P. (2014). One year monitoring of dessication cracks in Tournemire argillite using digital image correlation. *Int J Rock Mech Min*, vol. 68, pp. 22-35.
- Matray JM, Savoye S, Cabrera J. (2007), Desaturation and structure relationships around drifts excavated in the well-compacted Tournemire's argillite, *Eng Geol*, 90, 1-16.
- Möri A., Bossart P., Matray J.M., Franck E., Fatmi H., Ababou R. (2010). Mont Terri Project: cyclic deformations in the Opalinus Clay, In: proceedings of the International Meeting of Clay in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinements, Nantes, 103-124.
- Vachaud G., Khanji D., Vauclin M. (1979). Experimental and numerical study of a transient two-dimensional unsaturated-saturated water table recharge problem. *Water Resour. Res.*, vol. 15, n°5, pp. 1089–1101.
- Yang D, Bornert M, Chancholle, Wang L, Valli P, Gatmiri B, (2011). Experimental investigation of the delayed behavior of unsaturated argillaceous rocks by means of Digital Image Correlation techniques, *App Clay Sci*, 54, 53-62.