

Initiation et propagation de fissures dans une roche argileuse sous pression de gaz : étude expérimentale et numérique

Romain RODRIGUES DE AMORIM

Université de Pau et des Pays de l'Adour, E2S UPPA, SIAME, Anglet, France

RESUME Dans le cadre du projet Cigéo pour le stockage des déchets radioactifs en couche géologique profonde, l'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs a mené de nombreuses études pour caractériser le comportement de l'argilite soumise à une augmentation de la pression liée à une production de gaz par corrosion et radiolyse au sein des alvéoles de stockage. Dans cette thèse, l'initiation et, surtout, la propagation des fissures ainsi créées sont étudiées expérimentalement à l'échelle centimétrique afin de développer un modèle numérique utilisable à l'échelle du site Cigéo et ainsi améliorer les représentations existantes. Pour observer le chemin de propagation des fissures générées par l'augmentation de pression à l'échelle d'un échantillon, le choix s'est porté sur la tomographie à rayons X. Il s'agit d'une technologie permettant de voir à l'intérieur de matériaux opaques mais nécessitant des temps d'acquisition longs au regard de la vitesse de propagation de la fracture. Un protocole expérimental inédit a alors été développé à l'aide d'un modèle numérique basé sur la mécanique linéaire de la rupture pour obtenir une maîtrise optimale de la fissuration et permettre son observation. L'orientation du litage, le degré de saturation et le type de fluide utilisé sont les paramètres étudiés. Les images tomographiques ont aussi servi à caractériser la forme et la distribution des inclusions de pyrite dans l'argilite.

Mots-clés Fracturation, Azote, Argilite, Tomographie à rayons X, Dispositif expérimental

I. INTRODUCTION

Dans le cadre du projet Cigéo pour le stockage des déchets radioactifs en couche géologique profonde, l'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (Andra) a mené de nombreuses études pour caractériser le comportement de l'argilite du Callovo-Oxfordien (Cox) entourant le futur site de stockage pour garantir son confinement sur de très longues périodes de temps. La présence de métaux (fer) dans les composants du stockage comme les alvéoles et des conteneurs de déchets de haute-activité vitrifiés conduit à la production de gaz principalement par corrosion et radiolyse. La compréhension des mécanismes de migration des gaz produits au sein du stockage et au travers de l'argilite est un des phénomènes à prendre en compte pour évaluer la performance du stockage géologique. En effet, si le taux de production de gaz dépasse le taux de diffusion du gaz dissous dans l'eau interstitielle de la roche hôte et des barrières ouvragées, une phase gazeuse se formera et s'accumulera jusqu'à ce que l'augmentation de pression associée soit suffisamment importante pour surmonter la pression hydraulique et la résistance capillaire de l'argilite pour atteindre un régime d'écoulement biphasique puis possiblement atteindre le seuil de contrainte mineure et donc initier et propager une fracture dans la roche. C'est pourquoi, l'Andra a développé

trois axes de recherche sur le comportement du gaz à haute pression : (i) des essais d'injection de gaz *in situ* dans la roche hôte menés au Laboratoire Souterrain de Meuse/Haute-Marne (de La Vaissière et al., 2019), (ii) des essais d'injection de gaz sur échantillon de roche et (iii) le développement d'outils de simulation numérique. Le travail de recherche présenté dans ce papier s'inscrit dans le deuxième et troisième axe de recherche. L'initiation et, surtout, la propagation des fissures ainsi créées sont étudiées expérimentalement afin de compléter un modèle numérique d'endommagement précédemment développé au sein de la même équipe (Wang et al., 2021) pour simuler le comportement du Cox à l'échelle des tunnels de l'ouvrage Cigéo, et améliorer les représentations existantes.

Si l'initiation de fissures par fracturation hydraulique ne présente pas de difficultés techniques, l'étude de la propagation n'est que peu documentée : seuls des essais sur matériaux transparents ou à l'aide de capteurs acoustiques sont disponibles (Alpern et al., 2012 et Hou et al., 2016). Pour observer la propagation dans un tomographe à rayons X, une étude numérique basée sur la mécanique linéaire de la rupture a été nécessaire pour définir un protocole expérimental ainsi que pour sélectionner les paramètres géométriques de l'échantillon et de son confinement. Pour les essais hors tomographe, des jauges de déformations ont aussi été utilisées.

II. DEVELOPPEMENT DU PROTOCOLE EXPERIMENTAL

A. Développement numérique

Pour permettre l'étude de la fissuration, phénomène particulièrement instable lors d'essais classiques de fracturation hydraulique, à l'aide d'un tomographe, il a fallu ralentir l'évolution de la fissure. Le processus de stabilité consiste à avoir une relation biunivoque entre la pression exercée et la longueur de fissure. Pour réussir cet objectif, nous reprenons l'idée utilisée pour l'essai P.I.E.D. (Mazars and Berthaud, 1989) qui consiste en un apport de rigidité sur la structure testée. Dans le cas d'un échantillon cylindrique, de rayon et de hauteur 40 mm, soumis à une injection dans un trou central, il faut un ajout de raideur orthoradiale. Pour vérifier la faisabilité de la stabilisation, l'échantillon a été modélisé sous Cast3m, voir Fig. 1.a, en utilisant le principe de la mécanique linéaire de la rupture (Rice, 1968). Le chemin de fissuration est discrétisé régulièrement en n points (le nombre de points n'a d'impact que sur le lissage de la courbe) tel que sur la Fig. 1.b. L'énergie de fissuration en pointe de fissure, au point i , due à la pression d'injection est comparée à l'énergie de fissuration critique, si le critère est rempli la fissure s'ouvre jusqu'au point $i+1$. Les résultats présentent une faible sensibilité ($\leq 2\%$) à la taille des mailles : le maillage utilisé présente des mailles 0.15 mm pour les plus grosses avec un raffinement à 0.03 mm autour de la pointe de fissure. Le COx est considéré homogène isotrope avec un module d'Young valant 5 GPa, un coefficient de poisson valant 0.3 et une énergie critique de fissuration valant 13.8 J/m² (Abdulmajid, 2020).

Pour augmenter la rigidité orthoradiale, différentes solutions industrielles ont été étudiées :

- Assemblage fretté
- Assemblage par clavettes coniques
- Assemblage par enroulement filamentaire

Le frettage n'étant pas compatible avec le COx à cause des températures nécessaires à sa mise en place et les clavettes coniques présentant trop d'épaisseur d'acier pour une utilisation dans un tomographe à rayons X, c'est l'enroulement filamentaire par des bandes de fibres de carbone imprégnées de résine époxy qui a finalement été retenu et modélisé. La coque composite est considérée homogène orthotrope de modules d'Young 123 GPa et 3 GPa obtenus expérimentalement. Les premières simulations d'injection avec la coque permettent d'obtenir la Fig. 2 où l'on observe une remontée de la courbe pression-longueur de fissure à partir 13 mm. Pour contourner la zone instable présente jusqu'à 13 mm, une double-entaille de 8.5 mm est découpée, de part et d'autre, du trou d'injection.

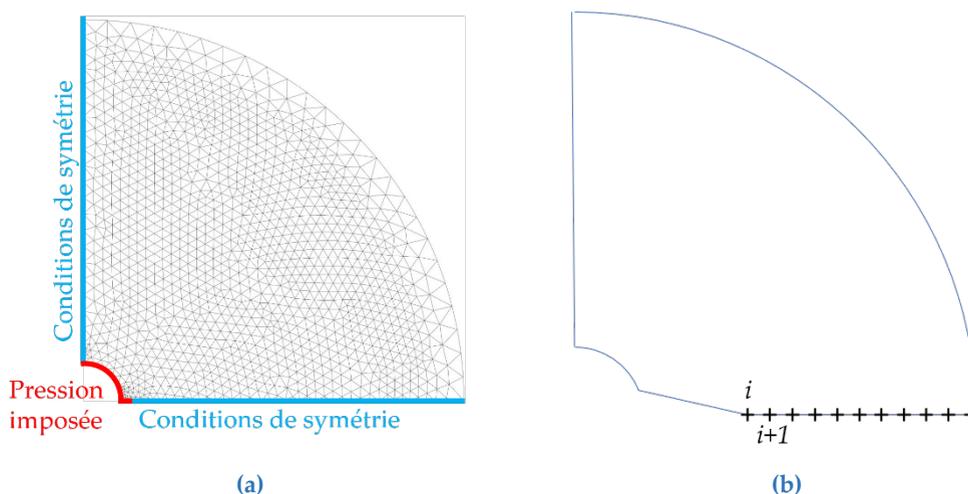


FIGURE 1. (a) Maillage et conditions aux limites (b) Discrétisation du chemin de fissuration

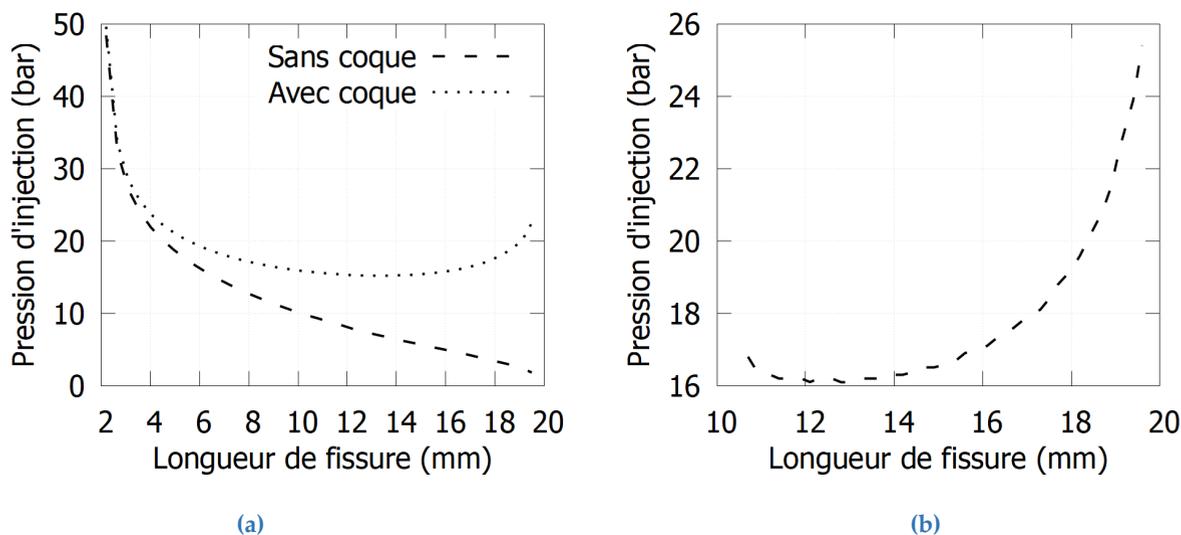


FIGURE 2. Courbe pression-longueur de fissure pour un cylindre de COx (a) sans entaille avec et sans coque composite (b) avec une double-entaille de 8.5 mm et une coque composite

B. Validation expérimentale du protocole

Pour valider le protocole hors tomographe, deux assemblages coque-COx ont été soumis à une injection d’huile à débit constant. L’un ne présentait aucune entaille, l’autre présentait une double entaille à fond arrondi, de 8,5 mm par 0,5 mm, réalisée à l’aide d’une scie à chantourner comme présenté en Fig. 3. La Fig. 4 illustre clairement l’apport de l’entaille et la capacité du modèle numérique à reproduire le comportement observé. Sans entaille, lorsque la pression de fracturation est atteinte, il y a une très grande déformation due à une rupture brutale du COx. Avec l’entaille, le comportement est divisible en 3 phases :

1. Jusqu’à 22 bars, la raideur est très grande : le COx et la coque sont mobilisés ensemble ;
2. Dès 22 bars, la fissuration s’amorce : il y a changement de pente important. Jusqu’entre 30 et 40 bars (36 selon modèle numérique), la fissure se propage : la raideur augmente ;
3. Au-delà, la fissure a traversé le COx donc seule la coque est sollicitée : la raideur est constante.

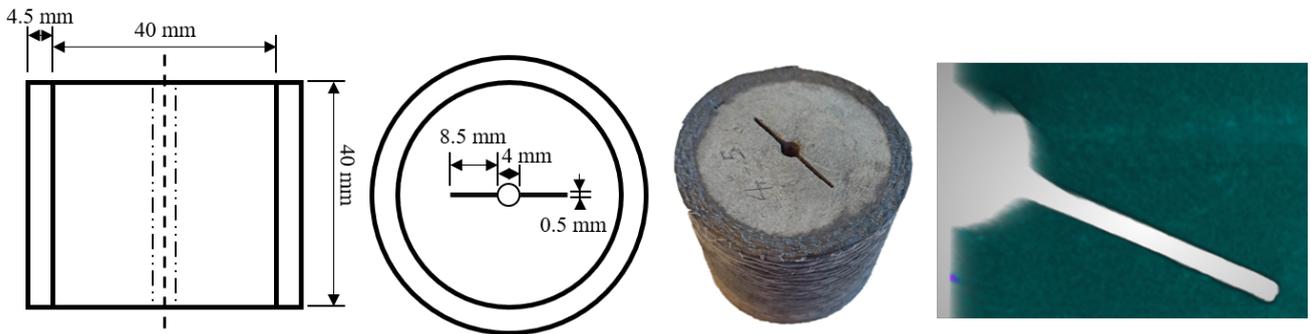


FIGURE 3. Schéma de principe de l’échantillon, échantillon réel et image tomographique d’une entaille

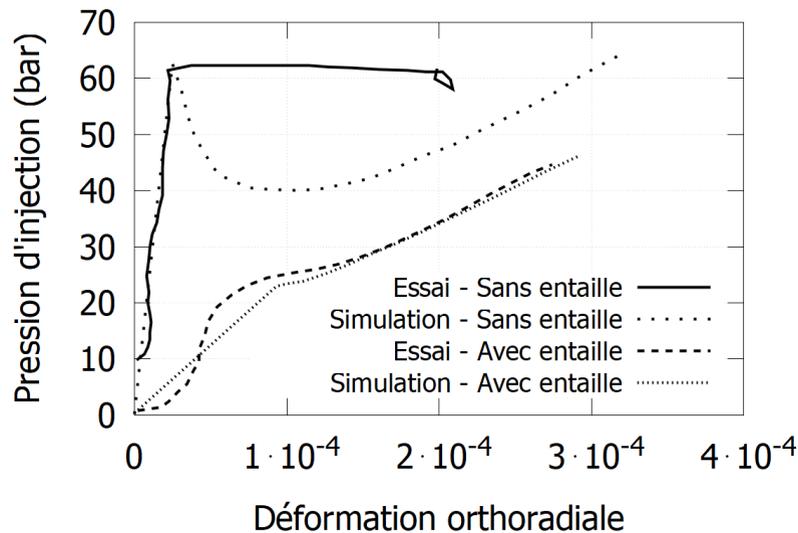


FIGURE 4. Courbes comparatives pression-déformation orthoradiale pour deux échantillons avec et sans double entaille

III. ETUDE DE L'INITIATION DES FISSURES

A. Protocole expérimental de l'étude

Pour étudier la pression critique et l'énergie de fissuration associée du COx, trois paramètres ont été étudiés : le degré de saturation de l'échantillon de COx, l'angle entre le plan de litage et la double entaille ainsi que le type de fluide injecté, voir le tableau 1. Le dispositif expérimental, tel que présenté en Fig. 5.a, est identique pour tous les essais : trois jauges de déformations sont collées orthoradialement à 120° sur la coque composite et une pression verticale de 3 MPa est appliquée pour éviter les fuites. Les injections sont réalisées à débit constant : les valeurs choisies (0.25mL/min à l'huile et 10mL/min à l'azote) permettent d'obtenir une pression de 20 bars après 8 ± 1 min d'injection. Chaque essai est arrêté dès lors que le débit de fuite excède le débit d'injection. L'échantillon est alors démonté du dispositif expérimental pour mesurer les angles entre les fissures et la double entaille sur les faces supérieures et inférieures de l'échantillon.

TABLEAU 1. Matrice des essais réalisés

Degré de saturation	Angle litage-entaille	Huile	Azote
85 %	//	0	
	⊥	3	3
92 %	//	3	4
	⊥	3	3
99 %	//	3	3
	⊥	3	3

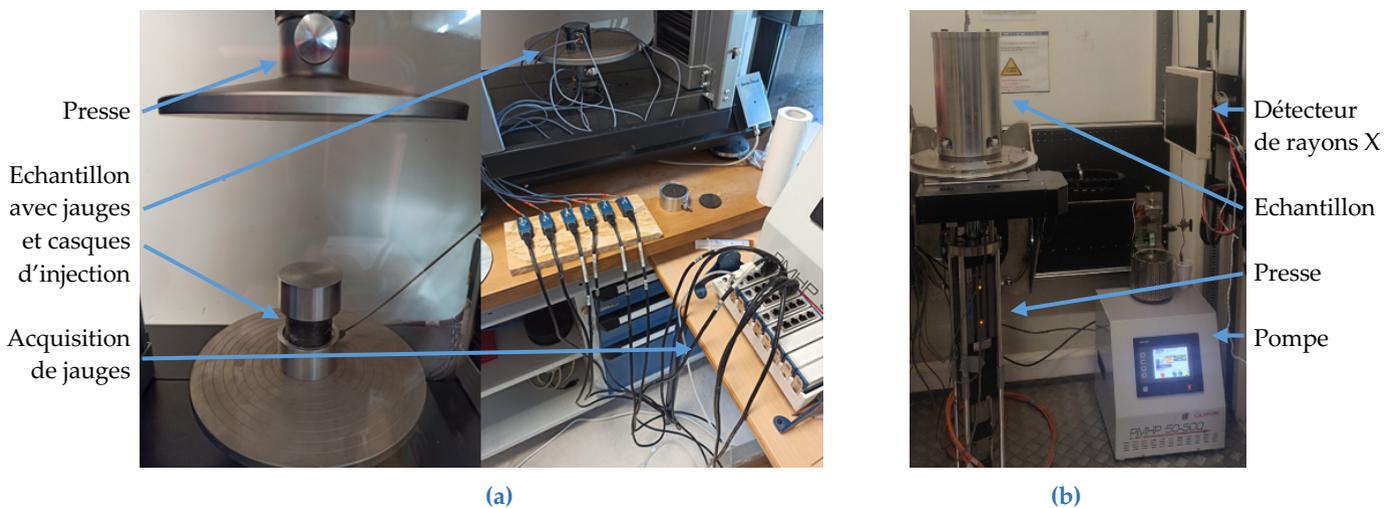


FIGURE 5. Dispositif expérimental (a) hors tomographe (b) dans le tomographe

B. Pression d'initiation de la fissuration

La pression critique, à laquelle s'amorce la fissure, est définie de la manière suivante :

1. Sélection des bornes en pression d'une zone élastique de la 1^{ère} phase (exemple : 5 bars et 15 bars pour la courbe rouge de la Fig. 4)
2. Calcul du coefficient directeur moyen de la courbe sur la zone définie
3. Valeur de la pression à partir de laquelle le coefficient directeur vaut moins de 90 % du coefficient directeur moyen de la zone élastique

La Fig. 6 ci-dessous présente la pression d'initiation de fissures selon l'angle de la fissure avec la double entaille et le degré de saturation du CO_x pour les deux types d'injection. Pour un degré de saturation de 85 %, aucun essai de fracturation à l'azote n'a pu être réalisé à cause de la trop grande perméabilité du CO_x.

L'angle semble avoir un impact minimum sur la valeur de pression, tout comme le fluide injecté, contrairement au degré de saturation avec des pressions qui chutent à 5 ou 6 bars. La resaturation du CO_x au-delà de 92 % entraîne vraisemblablement une dégradation des propriétés mécaniques du matériau.

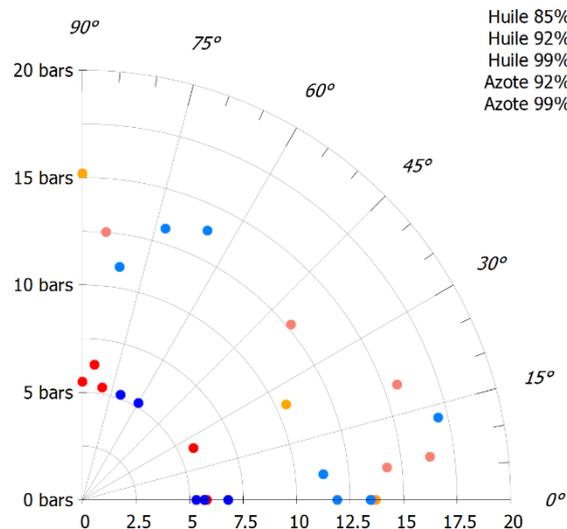


FIGURE 6. Evolution de la pression d'initiation de fissure selon l'angle moyen entre la fissure et l'entaille, le degré de saturation et le fluide injecté

C. Energie critique de fissuration

Les courbes d'énergie critique de fissuration, présentées en Fig. 7, sont obtenues à l'aide du modèle numérique ayant servi à développer le protocole expérimental et ayant servi aux simulations de la Fig. 4. La géométrie de l'échantillon est adaptée selon l'angle de la fissure avec l'entaille. La valeur de l'énergie de fissuration est retenue lorsque les pressions critiques expérimentale et simulée sont égales.

Pour un degré de saturation de 92 %, la différence entre l'huile et l'azote est très marquée car le gaz peut accéder à des pores que l'huile ne peut pas atteindre. Cet écart n'est pas présent à 99 %

car de la quantité de pores disponibles est infime donc le comportement tend à être identique. Pour les deux degrés de saturation, une forte anisotropie est mise en évidence. De plus, quand le plan de l'entaille correspond au plan de litage, l'entaille coupe au mieux un seul plan de litage : il apparaît une forte variabilité de l'énergie critique de fissuration (de 9 à 20 J.m⁻² pour l'huile et l'azote 92 %). Tandis que si l'entaille est perpendiculaire au litage, elle traverse entre 3 et 8 plans de litage et le plan de litage le plus faible est alors le chemin préférentiel : les valeurs de l'énergie critique de fissuration, et leurs variations, sont plus faibles.

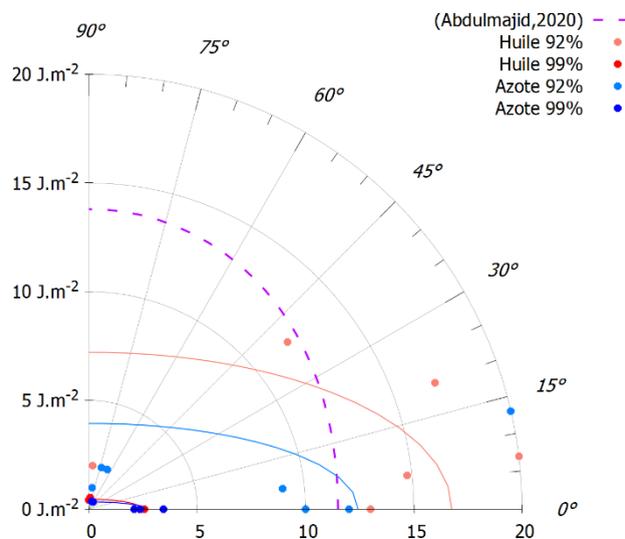


FIGURE 7. Evolution de l'énergie critique de fissuration selon l'angle entre la fissure et l'entaille, le degré de saturation et le fluide injecté

IV. TOMOGRAPHIE A RAYONS X

Le montage expérimental présenté en Fig. 5.b est identique à celui de la Fig.5.a à l'exception du système de jauges qui n'est pas utilisé. L'injection est réalisée à débit constant jusqu'à atteindre un palier de pression pour prendre des images tomographiques avec une résolution de 30 μm (2880 images, 4 images par seconde, mouvement hélicoïdal, source réglée à 135 kV avec un filtre en bronze 0.4 mm). La Fig. 8 montre l'évolution de la fissuration au centre d'un échantillon resaturé à 99 %.

V. CONCLUSION

Comme observé par Conil et al., 2018 et Grgic et al., 2022, la resaturation des échantillons de Cox entraîne une dégradation de ses propriétés mécaniques : la ténacité du matériau est divisée par 5 dès lors que le degré de saturation dépasse 92 %. Contrairement à ce qui a été observé par Abdulmajid, 2020, une très forte anisotropie a été relevée avec une mise en lumière de l'existence de plan de litage plus faible.

Le protocole expérimental développé ici ne permet pas actuellement de reproduire les conditions de pression *in situ* mais il permet l'étude de l'effet de la vitesse d'injection, notamment

en dehors du tomographe. Le protocole est adaptable à différents diamètres et différents matériaux : il faudrait alors modifier l'épaisseur de la coque composite et la longueur de la double entaille.

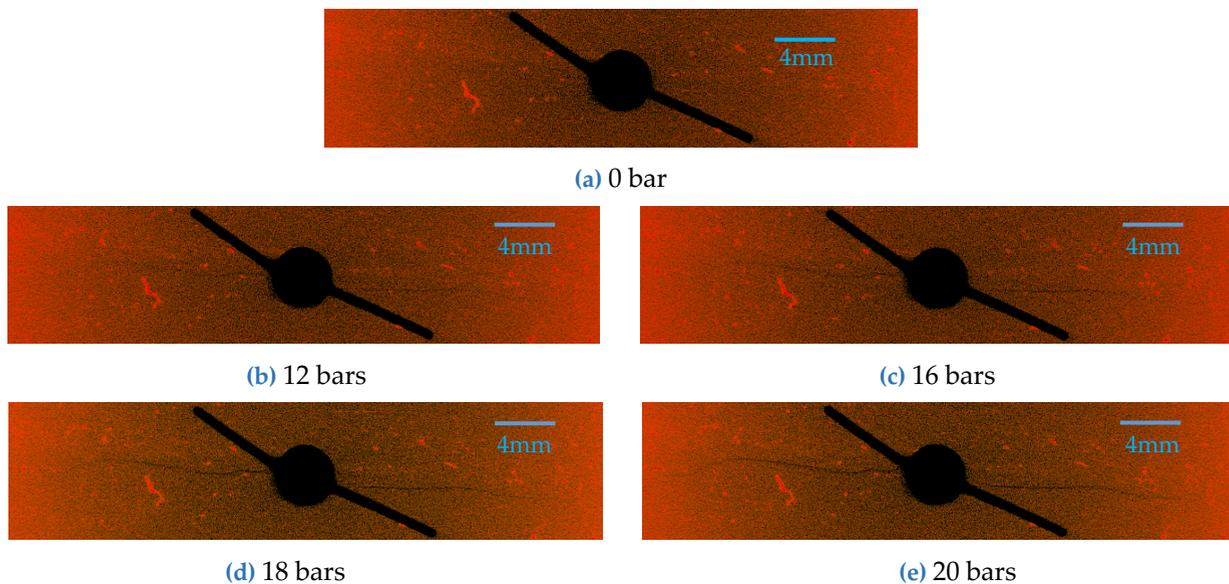


FIGURE 8. Evolution de la fissuration d'un échantillon à soumis à une injection à l'huile

REFERENCES

Abdulmajid, M. (2020) *Determination of the in-situ fracture properties of Callovo-Oxfordian rocks: application to the prediction of fracture networks geometry around tunnels*. Thèse de doctorat. Sorbonne Université.

Alpern, J., Marone, C., Elsworth, D., Belmonte, A. and Connelly, P. (2012). *Exploring the Physicochemical Processes That Govern Hydraulic Fracture Through Laboratory Experiments*.

Conil, N., Talandier, J., Djizanne, H., de La Vaissière, R., Righini-Waz, C., Auvray, C. and Armand, G. (2018). *How rock samples can be representative of in situ condition: A case study of Callovo-Oxfordian claystones*. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 10(4), 613-623.

de La Vaissière, R., Talandier, J., Armand, G., Vu, M. N., and Cornet, F. H. (2019). *From two-phase flow to gas fracturing into Callovo-Oxfordian claystone*. In 53rd US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium. OnePetro.

Grgic, D., Giraud, A., Moumni, M., de La Vaissière, R., and Talandier, J. (2022, June). *Impact of Swelling on the Permeability and Mechanical Properties of the Callovo-Oxfordian Claystone*. In 56th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium. OnePetro.

Hou, P., Gao, F., Ju, Y., Liang, X., Zhang, Z., Cheng, H. and Gao, Y. (2016). *Experimental investigation on the failure and acoustic emission characteristics of shale, sandstone and coal under gas fracturing*. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 35, pp.211–223. doi:10.1016/j.jngse.2016.08.048.

Mazars, J. and Berthaud, Y. (1989). *Une technique expérimentale appliquée au béton pour créer un endommagement diffus et mettre en évidence son caractère unilatéral*.

Rice, J.R. (1968). *A Path Independent Integral and the Approximate Analysis of Strain Concentration by Notches and Cracks*. *Journal of Applied Mechanics*, 35(2), pp.379–386. doi:10.1115/1.3601206.

Wang, H., La Borderie, C., Gallipoli, D. and Vu, M.-N. (2021). *Numerical modelling of the hydro-mechanical behaviour of unsaturated CO_x*. *Geotechnical Research*, 8(1), pp.3–15. doi:10.1680/jgere.20.00017.