

SUIVI DES DEFORMATIONS PAR METHODES OPTIQUES EN GALERIE SOUTERRAINE (LABORATOIRE MEUSE/Haute MARNE).

MEASUREMENT OF STRAINS BY OPTICAL METHODS IN UNDERGROUND GALLERY (UMEUSE/Haute MARNE URL).

Stephen HEDAN¹, Valéry VALLE², Aurélien NOIRET³, Gilles ARMAND³, 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*

³ *ANDRA, Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne, Bure, France.*

RÉSUMÉ – Cette communication présente les résultats d'une étude visant à quantifier l'influence mécanique de la dépose de cintres de la niche -445 m du laboratoire souterrain Meuse/Haute Marne en effectuant des mesures sans contact par méthodes optiques. Les résultats obtenus des champs de déplacements sont analysés au regard des variations des variables états (température et humidité relative) mesurées sur le site.

ABSTRACT – The results of a study aiming to quantify the mechanical influence of the removal of liners in the niche -445 m at the Bure site, by optical methods are presented. The results of the displacements fields are discussed with regard to the changes in state variables (temperature and relative humidity) both measured in the site.

1. Introduction

Les formations argileuses dans leur état naturel présentent des conditions très favorables pour le dépôt de déchets radioactifs, car elles possèdent généralement une conductivité hydraulique très faible et de une capacité importante de rétention des radionucléides. En France, dans le but de démontrer la faisabilité d'un stockage de déchets radioactifs dans une formation d'argilite, l'agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (ANDRA) a commencé depuis 2000 la construction du laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne à Bure (ANDRA, 2005). La formation hôte est composée d'argilite (roche argileuse du Callovo-Oxfordien-COx) située entre les profondeurs -420 m et -550 m (Fig. 1). Dans le haut de la couche du COx (unité silto-carbonatée (USC)), une galerie expérimentale de diamètre $\varnothing = 4,6$ m a été excavée. Depuis Novembre 2014, cinq cintres (distants d'un mètre chacun) et le radier en béton ont été supprimés sur une longueur totale de 6 mètres. L'objectif de notre étude visait à répondre à la question suivante : est-ce que les déposes des supports et du radier réactivent les déformations du massif rocheux ? Pour apporter des éléments de réponse à cette question une expérience en galerie a été réalisée sur une période de cinq mois. En effet, dans une perspective de sûreté ; il est nécessaire de savoir, contrôler et être en mesure de remédier à l'impact du retrait des soutènements sur le comportement de la roche durant et après l'exploitation du futur site de stockage. Les méthodes optiques non invasives sont bien adaptées (Hedan et al., 2014) pour un monitoring des déformations et consécutivement pour surveiller le comportement hydromécanique de l'argilite. Les avantages de ces méthodes sont de mesurer la transformation physique en fonction du temps, d'être sans contact avec la surface étudiée et permettre des études sur une gamme d'échelle allant du mm² à dm² (Wang et al., 2011) (Fauchille et al., 2016) (Hedan et al., 2014).

2. Contexte géologique

L'ANDRA a retenu le stockage en géologie profonde dans la couche argileuse Callovo-Oxfordienne ou argilite du COx (formée il y a 155 Ma). Cette couche se situe à une profondeur entre 420 et 550 mètres et son épaisseur est d'environ 130 mètres. L'ANDRA a mis en évidence un découpage de la couche du COx en différentes unités ayant un comportement géomécanique homogène (ANDRA, 2005).

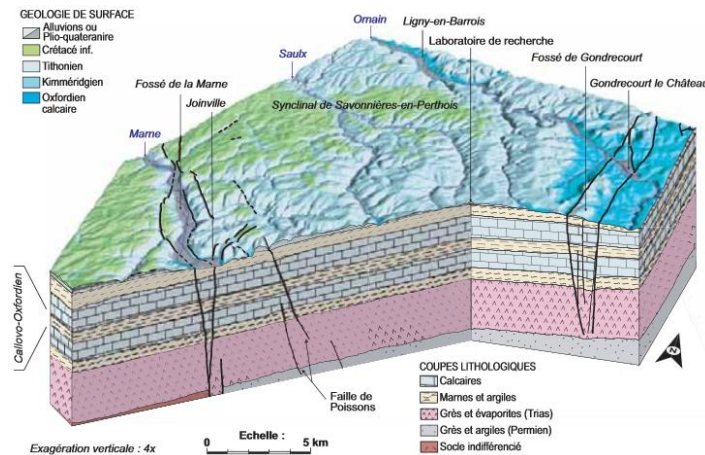


Figure 1. Bloc diagramme géologique 3D du secteur de Meuse/Haute-Marne. Extrait de (ANDRA, 2005)

Cette argilite est composée majoritairement de minéraux argileux (28,1 à 46,7%), de quartz (27,5 à 30,3%) et de calcite (19 à 34,5%). Quelques pourcents de dolomite, feldspath, mica et pyrite sont aussi présents. La phase argileuse est principalement composée d'I/S illite/smectite (4,9 à 25,7%), d'illite (7,7 à 13,9%) et de kaolinite (faible proportion). De plus la minéralogie évolue avec la profondeur. Pour des profondeurs entre 422 à 460 mètres (horizon A) et 515 à 527 mètres (horizon D), les teneurs en carbonates montrent une forte dispersion, alors que les horizons B (460 à 477 mètres) et C (477 à 515 mètres) ont des proportions très homogènes et très faibles. Simultanément, la teneur en argile augmente de l'horizon A à C. Ce dernier horizon présente les teneurs maximales en argile. Indépendamment de l'horizon, la teneur en eau varie de 5 à 6,9%, la porosité évolue de 9,5 à 16% (calculée à partir des mesures de densité) et la masse volumique des grains et la masse volumique sèche varient respectivement entre 2,68-2,71 g/cm³ et 2,25-2,38 g/cm³ (Noiret, 2009). L'expérience menée dans notre étude se situe dans une galerie à 445 mètres de profondeur (horizon A) avec une proportion de carbonate importante (Jorand, 2006).

3. Montage expérimental et méthodes optiques

Les deux montages expérimentaux sont situés dans la galerie excavée à -445 mètres de profondeur. Le premier s'intéresse à une surface de la paroi rocheuse située dans la zone de dépôt des cintres et le second à une surface en dehors de la zone de dépôt des cintres. Dans la suite du papier, les surfaces d'étude (55x43.9 cm²) sont nommées zone 1 et zone 2 (figure 3a). La zone 1 est filmée par deux caméras (caméras 1 et 2) permettant de mesurer les trois composantes planes du déplacement (u,v,w). Dans la zone 2, une

caméra (caméra 3) enregistre des images de la surface permettant la mesure des déplacements plans (u,v). Les mesures des composantes des déplacements plans ont été obtenus avec l'algorithme de corrélation (Heaviside based digital image correlation, H-DIC) (Valle et al., 2015) et les déplacements hors-plan de la zone 1 ont été obtenus avec la stéréo-corrélation (S-DIC). Malgré le fait que la stéréo-corrélation permet d'obtenir les trois composantes planes du déplacement (u,v,w), actuellement aucun algorithme de stéréo-corrélation ne tient compte de la présence des discontinuités (ex: fissures) pendant la phase de calcul. Ainsi les images des caméras 1 et 3 (perpendiculaires aux surfaces d'étude) (Figure 3a) permettent d'utiliser l'algorithme de H-DIC. Les champs de déplacements (u,v) mesurés permettront de localiser finement les fissures. Les images des caméras 1 et 2 ont été utilisées pour mesurer les champs de déplacement hors-plan (w) de la zone 1.

Les trois caméras de 1.2 Mp (1280×1024 pixels) enregistrent des images avec une fréquence d'acquisition de 2 images.h^{-1} et une résolution spatiale de $0,43 \text{ mm.pixel}^{-1}$. Un spot lumineux (400W) a été utilisé par zone. Les mesures de l'humidité relative (RH) et la température (T) de la galerie sont présentées sur la figure 2.

Il est à noter que la zone 1 présente l'avantage, par rapport aux études précédentes (Hedan et al., 2014), de permettre la mesure spatialisée des trois composantes planes du déplacement de la paroi d'une galerie.

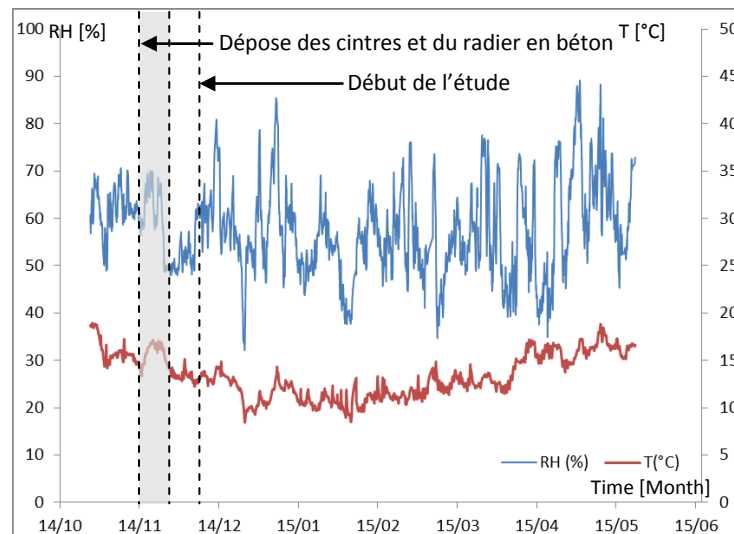


Figure 2. Evolution de l'humidité relative (RH) et de la température (T) dans la galerie.

Les méthodes optiques de mesure de champs basées sur les techniques de corrélation sont de plus en plus utilisées en géomécanique. Elles présentent de nombreux avantages comme la non-destruction des matériaux utilisés et la spatialisation des données. Les méthodes optiques de corrélation consistent à enregistrer des images numériques d'une surface au cours d'une transformation physique, afin d'obtenir des champs de déplacement de la surface filmée. Les méthodes de corrélation se basent sur la comparaison de sous-domaines de niveaux de gris entre deux images. La corrélation entre ces sous-domaines est calculée à partir d'une fonction de corrélation basée sur une transformation simple (Sutton et al., 1983).

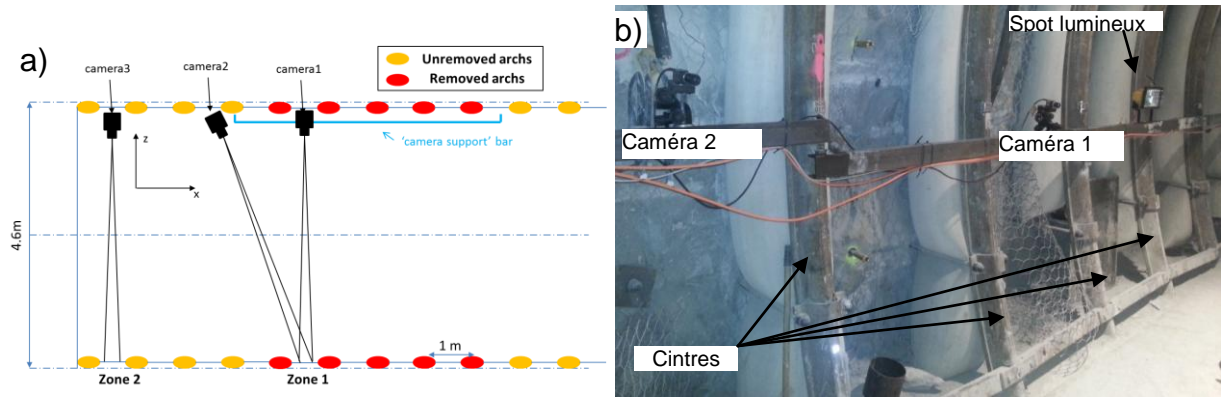


Figure 3. a) Montage expérimental. (b) Photo du montage expérimental de la zone 1.

L'algorithme de corrélation (H-DIC) permet de mesurer les déplacements plans (u,v) . Une transformation regroupant un déplacement de solide rigide, les premiers gradients et d'une fonction d'Heaviside y est implémentée. Cette dernière permet au logiciel de prendre en compte une discontinuité de déplacement (associée à une fissure) dans le sous-domaine de calcul.

La mesure par stéréovision ou stéréo-corrélation est basée sur la technique de corrélation et sur le principe de la triangulation qui nécessite de résoudre le problème en deux phases (Orteu, 2009). La première est la mise en correspondance stéréoscopique de deux points enregistrés par deux images. La seconde phase consiste à calculer l'intersection des deux rayons optiques par calibration du capteur stéréoscopique (c'est-à-dire, ensemble des deux caméras) pour pouvoir reconstruire la position tridimensionnelle des points observés par ces deux caméras. Une fois la phase de calibration réalisée, la surface étudiée est enregistrée par les deux caméras lors d'une transformation physique. Puis les deux images de référence sont analysées entre elles permettant l'appariement stéréoscopique (mise en correspondance) entre les images de gauche et de droite. On obtient ainsi un quadruplé de position $(x_G^0, y_G^0, \tilde{x}_D^0, \tilde{y}_D^0 ; \sim : \text{valeur non entière, (G) pour gauche et (D) pour droite})$. Les paramètres issus de la calibration permettent d'obtenir la position (X_0, Y_0, Z_0) de chaque sous-domaine. Les positions (X_1, Y_1, Z_1) des mêmes sous-domaines à l'état déformé (état 1) sont obtenus à partir de trois étapes :

Une corrélation des images de gauche (état 0 et état 1) permettant d'obtenir $(\tilde{x}_G^1, \tilde{y}_G^1)$

Une corrélation des images de droite permettant d'obtenir $(\tilde{x}_D^1, \tilde{y}_D^1)$

Des paramètres issus de la calibration.

Par soustraction des positions (X_1, Y_1, Z_1) et (X_0, Y_0, Z_0) , le vecteur déplacement (u,v,w) est déterminé pour un sous-domaine. La procédure est répétée pour tous les sous-domaines des images.

La taille des sous-domaines utilisée dans cette étude est de 64×64 pixels (soit $27,52 \times 27,52 \text{ mm}^2$) sur les zones 1 et 2. La méthode H-DIC permet de mettre en évidence des sauts de déplacement u et v de l'ordre de 0,1 pixel caractérisant la localisation de discontinuités.

4. Résultats et discussion

Les résultats présentés dans cette partie seront découpés en deux parties correspondantes aux deux zones. La première correspond à une surface d'étude située dans le domaine de dépose des cintres (zone 1) et la seconde dans une étendue où les cintres sont toujours présents (zone 2).

1.1. Zone 1

Les deux caméras de la zone 1 permettent d'obtenir les trois composantes des déplacements (u, v, w) sur une surface de $55 \times 43,9 \text{ cm}^2$ (figure 4). Cette zone 1 montre clairement la translation tridimensionnelle d'une partie de la paroi (appelé fragment dans la suite) en haut à droite (entourée en rouge sur la figure 4) des champs sans toutefois que le fragment ne se détache complètement et sorte du champ d'étude.

La translation dans le plan du fragment par rapport à la paroi rocheuse peut être traduite comme une ouverture de fissure et mesurée avec la même équation utilisée pour le calcul des ouvertures de fissure (Hedan et al., 2014).

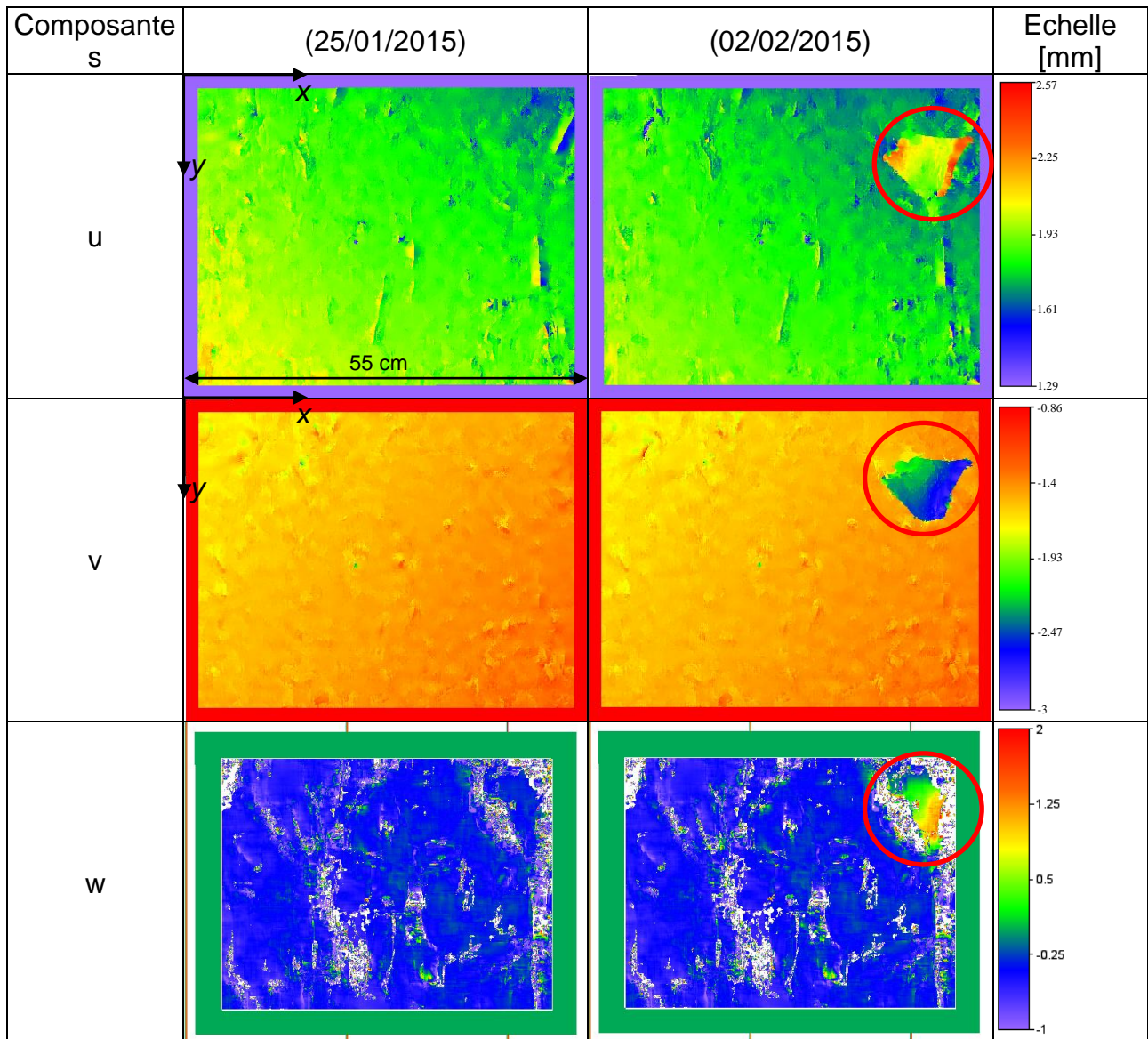


Figure 4. Champs des déplacements (u, v, w) de la zone 1 pour deux états déformés.

Le contour du fragment a été scindé en quatre « fissures » (figure 5a) et l'ouverture de ces quatre fissures tracées sur la figure 5b. L'évolution temporelle des ouvertures montre qu'avant le 25/01/2015, les valeurs sont proches de zéro, puis suit un saut des valeurs d'ouverture entre 0,9 et 1,1 mm, confirmant ainsi la translation dans le plan du fragment.

Une fois cette translation brutale survenue, de faibles fluctuations des valeurs sont observées. Ces fluctuations sont dans l'erreur de mesure de la méthode.

La figure 6a montre le champ de déplacement hors-plan et confirme le déplacement hors-plan du fragment. Toutefois, comme pour les déplacements dans le plan, la valeur mesurée du déplacement hors-plan suppose que les caméras (les supports de caméras) sont fixes, ce qui dans notre cas de ne peut être confirmé.

Pour caractériser le déplacement hors-plan du fragment, les déplacements hors-plan ont été calculées sur de petites zones (quatre zones sur la figure 6a) prises sur et en dehors (area ref, 1, 2, 3) du fragment et tracées en fonction du temps.

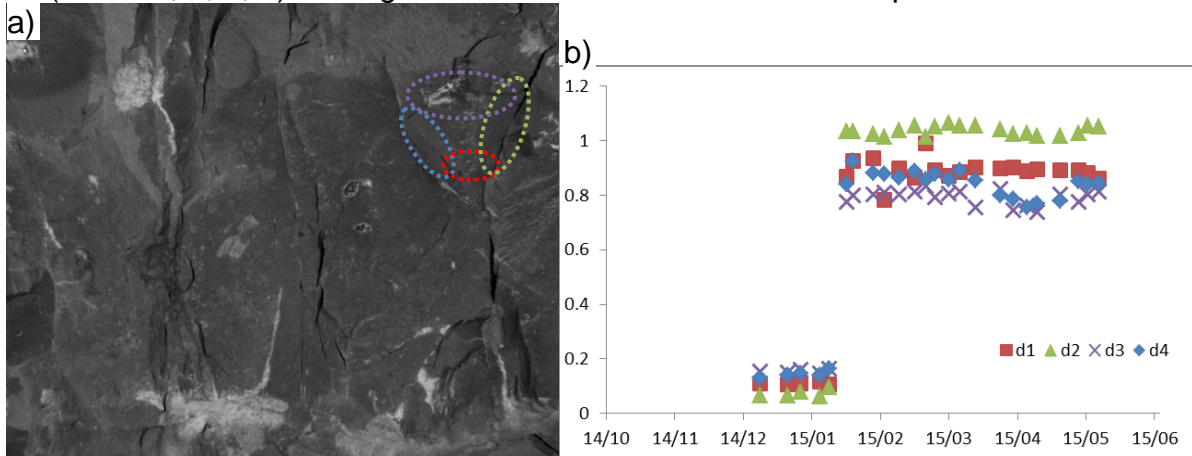


Figure 5. Zone. a) Localisation des quatre « fissures ». b) Evolution de l'ouverture des quatre « fissures » de la zone 1 en fonction du temps.

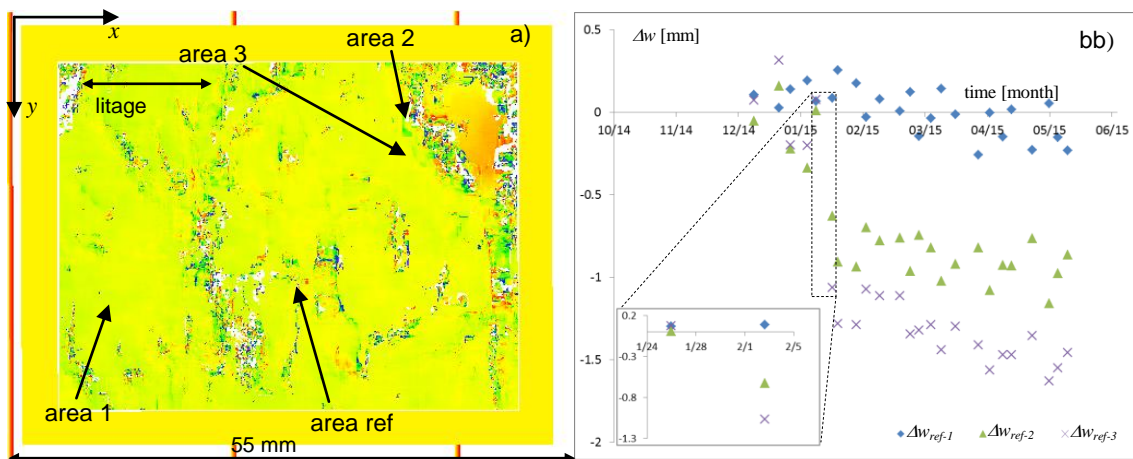


Figure 6 a) Localisation des quatre zones. b) Evolution du déplacement hors-plan pour trois zones (Δw_{ref-1} , Δw_{ref-2} , Δw_{ref-3}).

Puis, un calcul des variations des déplacements hors-plan (Δw) des zones 1, 2 et 3 a été réalisé par rapport à la zone « area ref » (figure 6b). L'évolution des Δw montre clairement une variation du déplacement hors-plan des zones 2 et 3 (Δw_{ref-2} et Δw_{ref-3}) avec des valeurs se situant entre -0,6 et -1,8 mm et confirmant ainsi une translation hors-plan du fragment. Les variations du déplacement de la zone 1 (Δw_{ref-1}) est significativement plus faible que celles des zones 2 et 3 (Δw_{ref-2} et Δw_{ref-3}).

1.2. Zone 2

Contrairement à la zone 1, cette zone 2 ne se situe pas dans la zone de dépôt des cintres. La figure 7 montre la présence des trois fissures (crack 1, 2 et 3) qui sont observables sur les champs de déplacement. Pour ces trois fissures, l'ouverture a été calculée à partir des champs de déplacements avec l'algorithme de corrélation (H-DIC).

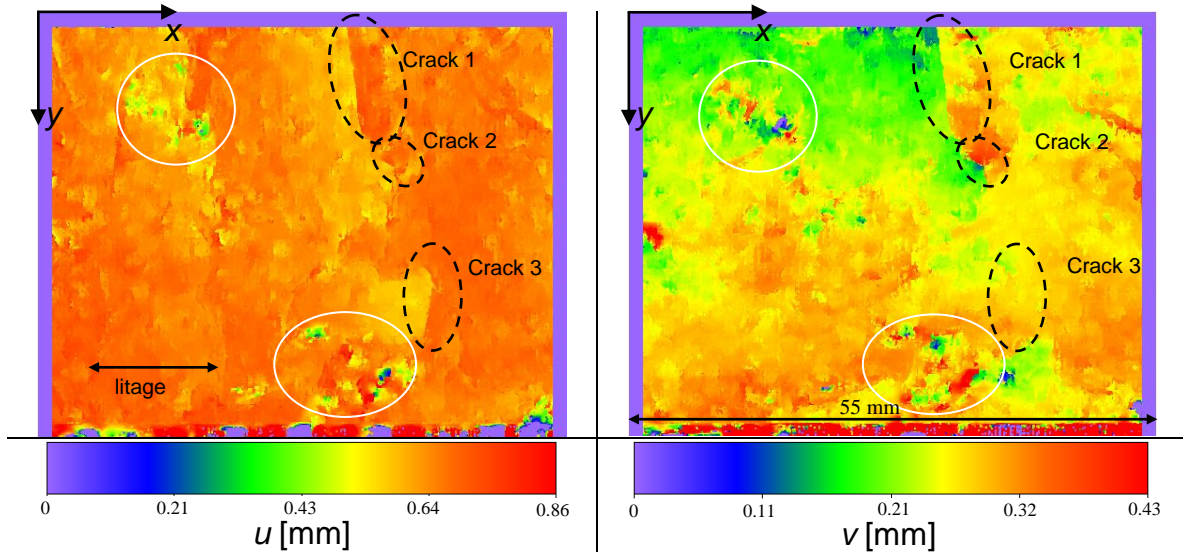


Figure 7 Champs des déplacements (u, v) de la zone 2 après la dépose des cintres.

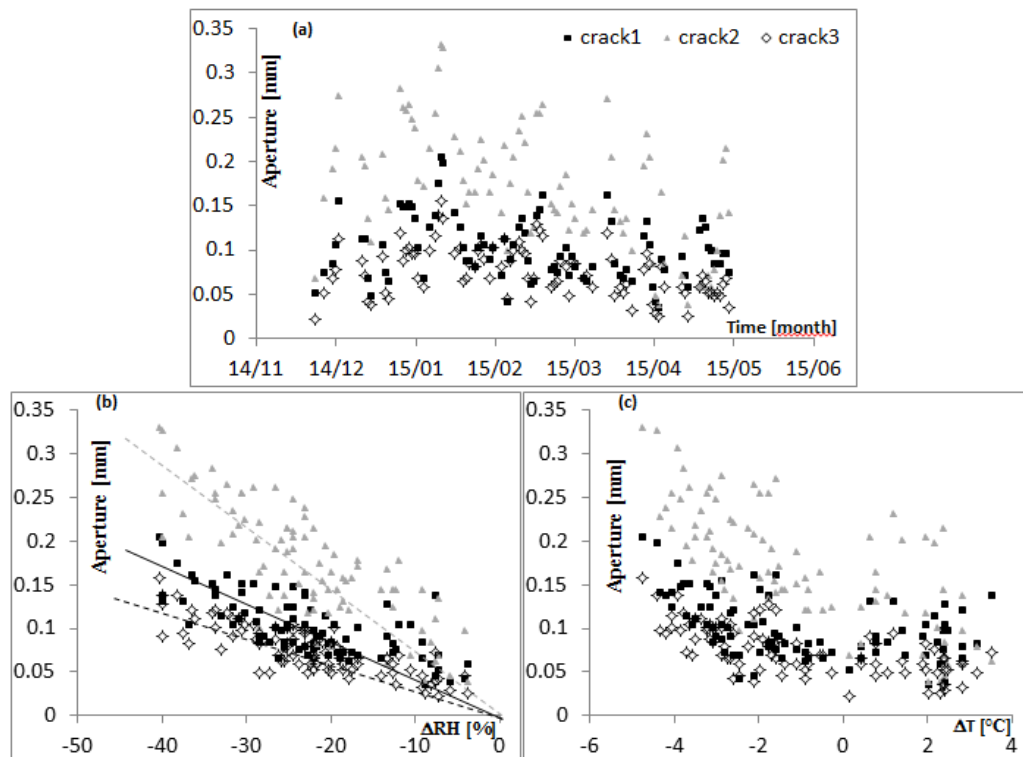


Figure 8 Evolution de l'ouverture des trois fissures de la zone 2 en fonction du temps (a), (b) de l'humidité relative (RH) et (c) de la variation de température.

Sur la période allant du 22/12/2014 au 27/05/2015, la figure 8a présente l'évolution de l'ouverture des trois fissures de la zone 2 en fonction du temps. Nous pouvons constater

une variation au cours du temps de l'ouverture des trois fissures. L'ouverture des fissures a été comparée aux variations d'humidité relative (ΔRH) et température (ΔT) (figures 8b et 8c). L'ouverture des fissures montre une tendance à croître « linéairement » avec ΔRH et atteindre un maximum autour de 0,2 mm pour la fissure 1 (crack 1), 0,35mm pour la fissure 2 (crack 2) et 0,15 mm pour la fissure 3 (crack 3). En ce qui concerne l'ouverture des fissures en fonction de ΔT , il est difficile d'identifier une relation claire entre ΔT et l'ouverture de fissure. Toutefois, il semble que les ouvertures maximales soient obtenues lorsque ΔT est grand ($\Delta T \approx -4,7^\circ\text{C}$)

5. Conclusion

Les résultats obtenus permettent de mettre en avant les points suivants :

- H-DIC et S-DIC permettent de mesurer les trois composantes (u,v,w) du déplacement sur la zone 1 et les deux composantes planes (u,v) pour la zone 2 sur des surfaces pluri-décimétriques du laboratoire souterrain de Meuse/Haute Marne.
- La surface d'étude (zone 1) met en évidence une translation tridimensionnelle d'un petit fragment de roche (écaille ?).
- L'amplitude d'ouverture des fissures de la zone 2 est de l'ordre 0,15-0,35 mm et semble varier linéairement avec ΔRH .
- Il est important de souligner que les fissures dont les ouvertures seraient inférieures à la résolution choisie (0,1-0,2 pixel, soit 43-86 μm) dans cette étude ne peuvent être détectées.
- Les déformations dans le plan des zones 1 et 2 sont faibles (typiquement inférieures à $2 \cdot 10^{-3}$) (non présentées ici).

6. Références bibliographiques

- ANDRA (2005) Evaluation de la faisabilité du stockage géologique en formation argileuse. Dossier 2005 Argile.
- Hedan, S., Fauchille A-L., Valle, V., Cabrera J., Cosenza P. (2014). One-year monitoring of desiccation cracks at Tournemire experimental station using Digital Image Correlation. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol 68, pp. 22-35,
- Noiret A. (2009). Contribution à la caractérisation du comportement géomécanique des roches couverture des réservoirs pétroliers. Thèse de doctorat de l'INPL
- Jorand R. (2006). Etude expérimentale de la conductivité thermique. Application au forage EST205 du site de Meuse/Haute Marne (ANDRA). Thèse de doctorat IPG Paris.
- Orteu, J-J. (2009). 3-D computer vision in experimental mechanics. *Optics and Lasers in Engineering, Optical Measurements*, vol. 47, no 3-4, pp. 282-291.
- Sutton MA., WJ Wolters W J., WH Peters W H., WF Ranson W F., McNeill SR. (1983). Determination of displacements using an improved digital correlation method. *Image and Vision Computing* 1(3), pp.133-139
- Valle, V., Hédan, S., Cosenza P., Fauchille A-L. (2015). Digital Image Correlation development for the study of materials including multiple crossing cracks; *Experimental Mechanics*, vol.55, n°2, 55(2), pp. 379-391.
- Wang, L. L., M. Bornert M., Yang D. S., Héripré E., Chanchole S., Halphen B., Pouya A., Caldemaison D. Microstructural insight into the nonlinear swelling of argillaceous rocks. (2015). *Engineering Geology*, vol. 193, pp. 435-444.