

ETUDE DU COMPORTEMENT ANISOTROPE DES DEFORMATIONS D'UN FRONT DE GALERIE.

STUDY OF ANISOTROPIC BEHAVIOUR OF STRAINS ON A GALLERY FRONT.

Stephen HEDAN¹, Valéry VALLE², Justo CABRERA³, 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 *IRSN, Site expérimental de Tournemire, Tournemire, France.*

RÉSUMÉ – L'anisotropie des déformations hydriques d'un front de galerie de la station expérimentale de Tournemire a été étudiée par la méthode optique de la Corrélation d'Images Numériques (CIN). Les déformations ont été acquises par un nouvel algorithme CIN sur plus d'un an. Nos résultats mettent en évidence la présence de fissures délimitant des blocs « continus ». Sur ces blocs, le rapport d'anisotropie entre les déformations parallèles et perpendiculaires à la stratification a été mesuré.

ABSTRACT –The anisotropy of hydromechanical strains of a gallery front at the Tournemire experimental station was investigated by the optical method Digital Image Correlation (DIC). The strains obtained by a new DIC algorithm were recorded over more than one year. Our results revealed the presence of cracks delimiting "continuous" block. On these blocks, the anisotropic ratio between the parallel strains and the perpendicular strains to the bedding planes was measured.

1. Introduction

Les roches argileuses sont actuellement considérées pour le stockage des déchets hautement radioactifs en formations géologiques profondes. 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) 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 hydrique existant dans la galerie. En ce qui concerne le comportement mécanique anisotrope d'une galerie ou d'un front de galerie, plusieurs moyens expérimentaux de quantification peuvent être envisagés. L'utilisation des jauges de déformations se trouve rapidement limitée si l'on souhaite spatialiser l'information mécanique avec une résolution spatiale suffisante (ex : un point de mesure chaque cm²). De plus, la réponse de ces jauges peut être perturbée par sa localisation (ex : collée sur une fissure hydrique). Depuis quelques années, les méthodes optiques de mesure de champ sont en plein essors en géomécanique. Leurs atouts sont : une spatialisation des résultats, une bonne résolution spatiale (de 1 à 500 $\mu\text{m}\cdot\text{pixel}^{-1}$) (Wang et al.2015) (Hedan et al., 2012) (Hedan et al., 2014) et la non intrusion du matériau étudié. Toutefois, certaines de ces méthodes nécessitent un marquage approprié (exemple : mouchetis) de la surface étudiée. Les précédentes études faites sur ce front de galerie se sont concentrées sur la quantification des ouvertures des fissures sub-

horizontales et sub-verticales et sur les déformations perpendiculaires à la stratification (Hedan et al, 2014).

L'objectif de l'étude est de quantifier l'anisotropie des déformations hydriques d'un front de galerie sur une période de plus d'un an. Pour cela, des blocs « continus » (i.e. sans fissures observables à notre échelle) seront définis à partir des observations des champs de déplacements, puis les déformations moyennes perpendiculaires et parallèles à la stratification seront calculées et le rapport entre ces déformations quantifié. La zone d'étude sera soumise à des variations climatiques saisonnières naturelles (RH et T), à une faible circulation d'eau au sein du massif (non étudié ici). Les conditions en déplacement du front de galerie sont celles qui existent normalement en présence de cintres métalliques supportant le massif rocheux, espacés tous les mètres le long de la galerie

2. Contexte géologique

Le site expérimental de Tournemire est associée à une structure géologique monoclide simple formée, à grande échelle, par 3 couches ; une couche inférieure calcaire et dolomitique d'environ 300m d'épaisseur (Hettangien, Sinémurien et Carixien), la couche argileuse constituée des formations du Toarcien et Domérien, et une couche supérieure calcaire et dolomitique de plus de 300 mètres qui constitue l'ossature morphostructurale du Causse de Larzac. La couche argileuse est encadrée par 2 aquifères calcaires : l'aquifère de l'Aalénien dans la partie supérieure et l'aquifère régional du Carixien dans sa partie inférieure. L'ensemble de ces couches jurassiques est affecté vers le nord du site par une faille régionale, la faille de Cernon. Sa minéralogie est dominée par les phyllosilicates (20-50%) dont la kaolinite, l'illite et les interstratifiés illite/smectite, les tectosilicates (10-50%) dont le quartz et les feldspaths, les carbonates (10-30%) et les sulfures (2-7%). En outre, l'argilite de Tournemire a une teneur en eau de 3,5-4% à l'état de saturation. La roche présente une structure litée avec une alternance entre des lits carbonatés et des lits plus argileux d'environ 200 à 400 μm . Sa structure est donc anisotrope. Le front étudié est celui de la galerie Est96 excavée en 1996, soit 15 cycles climatiques annuels avant le début de l'étude. Autrement dit, ces cycles antérieurs ont contribué à la création et à l'extension d'une zone endommagée appelée aussi EDZ (Excavation Damage Zone).

3. Montage expérimental et méthodes optiques

Le dispositif expérimental mis en place dans la galerie comprend quatre parties (Hedan et al., 2014) : (a) une zone d'étude ($344 \times 275 \text{mm}^2$) située sur le front de la galerie, des images acquises toutes les 30 minutes en utilisant une caméra CMOS IDS μeye (1280×1024 pixels²), équipée d'un objectif 50mm et d'un projecteur lumineux de 400 W, d'un PC qui contrôle simultanément l'acquisition des images et l'allumage de la lumière lors de l'acquisition des images. Les données climatiques (RH et T) sont enregistrées toutes les 15 minutes à l'aide de capteurs placés à une distance de 2 m de la zone d'étude. La configuration du dispositif expérimental permet d'atteindre une résolution spatiale d'environ 269 μm et une taille d'un sous-domaine de 10,8 mm.

Les conditions aux limites sont :

- chargement hygrométrique (RH et T) induit par la ventilation naturelle de la galerie et une circulation d'eau faible au sein du massif,
- champ de contrainte principale : contrainte verticale $\sigma_v = 3,8 \pm 0,4 \text{MPa}$ (orientée N 72°E et un angle de 10° avec la verticale (la verticale est proche de l'axe y (voir figure 1) de

notre étude; contraintes horizontales $\sigma_H=4\pm 2$ MPa, orientée N $162\pm 15^\circ$ E; $\sigma_h=2,1\pm 1$ MPa, orientée N $72\pm 15^\circ$ E et fait un angle de 10° avec l'horizontale (Rejeb et Tijani, 2003). L'axe z de notre étude (le long de la galerie EST1996) est orienté de N 105° E,

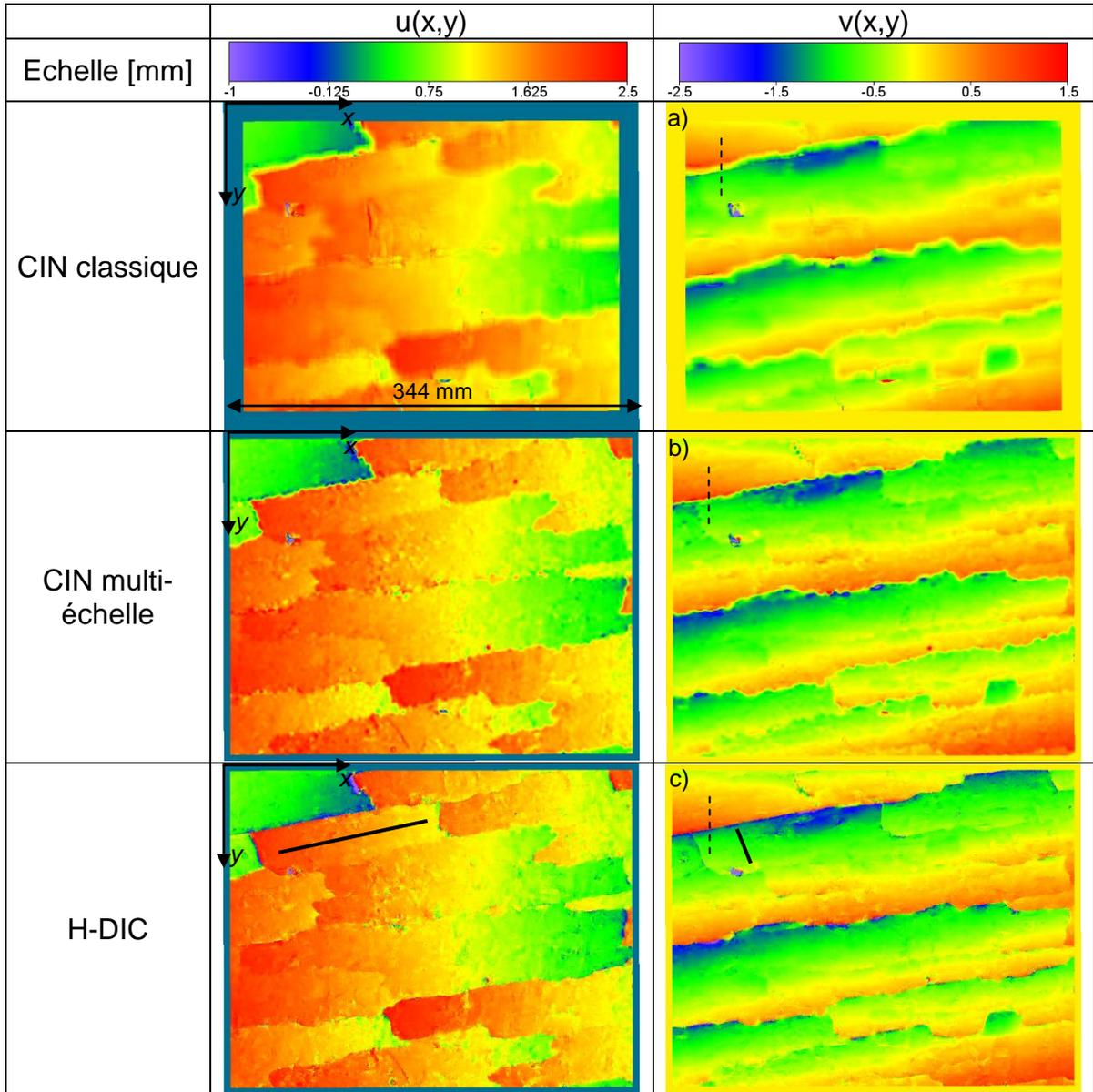


Figure 1. Champs des déplacements (u,v) obtenus par (a) CIN classique, (b) CIN multi-échelle et (c) H-DIC.

Les conditions aux limites en déplacement sont : en profondeur (c'est-à-dire pour des grandes valeurs de y), les déplacements sont supposés nuls et le déplacement hors-plan (suivant z) de la paroi est autorisé.

Les mesures des composantes des déplacements plans de la figure 1 ont été obtenus par des algorithmes de corrélation classique (CIN classique) (Sutton et al., 1983), multi-échelle (CIN multi-échelle) et un algorithme tenant compte de discontinuités (Heaviside digital image corrélation, H-DIC) (Valle et al., 2015). 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 permettant de mesurer les déplacements plans (u,v).

La corrélation classique et la corrélation multi-échelle sont implémentées d'une transformation développée à partir d'un déplacement de solide rigide et les premiers gradients. La différence entre ces deux algorithmes porte sur la taille du sous-domaine qui est constant avec la CIN classique (32×32) et diminue avec la CIN multi-échelle ($32 \times 32 \rightarrow 8 \times 8$). Cette procédure améliore la résolution spatiale par rapport à la CIN classique et donc permet de mieux localiser les fissures. Toutefois cette diminution de la taille du sous-domaine se traduit du temps de calcul et par une légère augmentation de l'erreur de mesure sur les champs de déplacements. Dans l'algorithme de corrélation (H-DIC), une fonction d'Heaviside a été ajoutée permettant au logiciel de prendre en compte une discontinuité de déplacement (fissures) dans le sous-domaine de calcul et donc de localiser encore plus finement les fissures (figure 1 et 2a).

4. Résultats et discussion

L'analyse des champs de déplacements (u,v) obtenus avec H-DIC ont permis de localiser très précisément les fissures hydriques sub-horizontales et sub-verticales (figure 2a). La figure 2a montre clairement que l'utilisation de la CIN classique ne permet pas de localiser précisément la fissure : dans cet exemple, la pente maximale entre deux pixels voisins est proche de la position $y=144$ mm alors que pour la CIN multi-échelle et H-DIC, cette pente maximale est proche de $y=149$ mm. De plus, on constate que le saut de déplacement entre deux pixels voisins est plus important avec H-DIC que pour la CIN multi-échelle, traduisant des valeurs d'ouverture de fissures sous-estimées avec la CIN multi-échelle. En superposant toutes les fissures obtenues avec H-DIC, des blocs dits « continus » ont été définis. Ces blocs « continus », au nombre de quinze (indexé $k=1-15$), ne présentent pas de fissures hydriques internes (à l'intérieur des blocs) à notre échelle d'observation. Une couleur en niveaux de gris par bloc a été choisie pour délimiter leur étendue. La figure 2b montre les blocs ainsi que leur numéro. Sur cette même figure, les zones blanches correspondent soit à une fissure hydrique dont les contours ont été dilatés de cinq pixels de part et d'autre des fissures, soit à des points décorrélés dus à une modification locale des niveaux de gris (exemple : écaille tombée) mettant en défaut l'algorithme de corrélation. Ce masque a été obtenu à partir des champs de déplacements de la figure 1c.

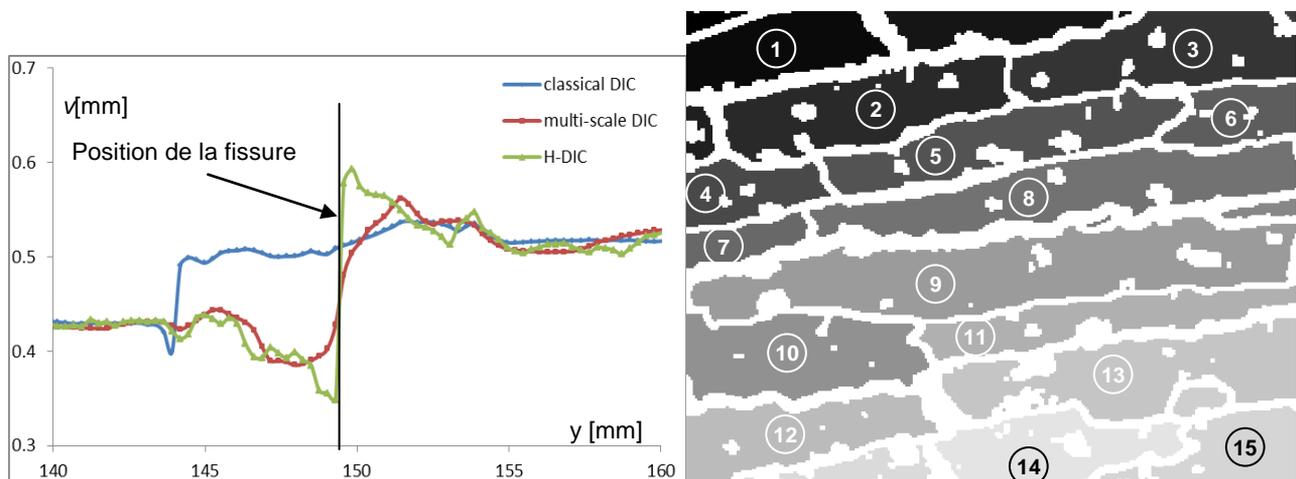


Figure 2. (a) profils de déplacement (v) obtenus par CIN classique, CIN multi-échelle et H-DIC. (b) masque délimitant chaque bloc « continu ».

Pour d'étudier le comportement hydromécanique anisotrope de l'argilite de Tournemire, deux possibilités sont envisageables. La première consiste à mesurer les champs de déformations $\varepsilon_{xx}(x,y)$ et $\varepsilon_{yy}(x,y)$ puis de faire le rapport entre ces déformations pour chaque point de mesure. Cette approche ne peut être envisagée pour la période de l'étude (> 1 an) car après trois mois, les champs de déformations sont fortement bruitées (Hedan et al., 2014). La seconde possibilité consiste à interpoler chaque champ de déplacement par l'équation d'un plan (éq1 et 2) et cela pour chaque bloc k . En effet, on constate que les déplacements varient linéairement (figure 3) suivant des directions parallèles et perpendiculaires à la stratification. La figure 3 montre un profil de déplacement parallèle et perpendiculaire à la stratification (i.e. segments continus noirs de la figure 1c) du bloc 2

$$u(x,y) = A_x^k \cdot x + B_x^k \cdot y + C_x^k \quad (1)$$

$$v(x,y) = A_y^k \cdot y + B_y^k \cdot x + C_y^k \quad (2)$$

Les termes A_x^k et A_y^k définissent respectivement les déformations ε_{xx}^k et ε_{yy}^k suivant les directions x et y . La déformation de cisaillement ε_{xy}^k correspond à la moyenne des termes B_x^k et B_y^k . C_x^k et C_y^k sont des ordonnées à l'origine.

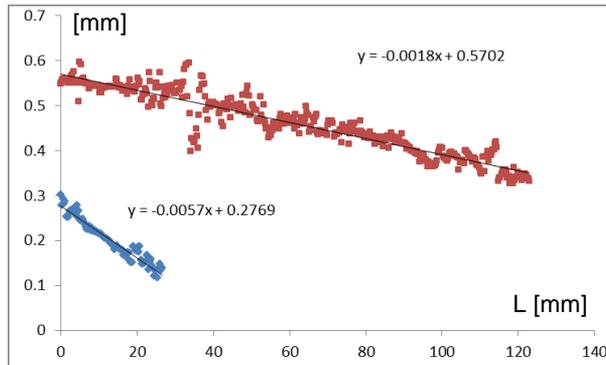


Figure 3. Profils de déplacement parallèle (points rouges) et perpendiculaire (points bleus) à la stratification (bloc k=2).

Le rapport (r^k) entre les déformations ε_{xx}^k et ε_{yy}^k définit l'anisotropie des déformations hydriques du bloc k . La figure 4 montre l'évolution de ε_{yy} par rapport à ε_{xx} sur une période de plus d'un an et pour chaque bloc. Malgré des variations hygrométriques lors de cette période, les déformations hydriques sont toujours négatives (contractions) car l'état de référence choisi correspond à état « saturé » (RH=91,1%, T=13°C). Suivant les blocs, les amplitudes des déformations sont différentes, mais l'évolution de ε_{yy} par rapport à ε_{xx} semble linéaire dans tous les cas. On constate r^k reste sensiblement constant (tableau 1) avec des coefficients de corrélation (R^2) élevés et supérieurs à 0,91 (figure 3). Les valeurs de $r^k(\varepsilon_{xx}/\varepsilon_{yy})$ varient entre 0,19 et 0,33 et la valeur moyenne est de 0,25 (tableau 1). La valeur de $r^k(\varepsilon_{xx}/\varepsilon_{yy})$ égale 0,19 obtenue sur le bloc 11 peut être expliquée par une largeur de bloc (i.e. dans la direction perpendiculaire à la stratification) faible par rapport à sa longueur, ce qui peut rendre moins précis les valeurs de déformations. Les valeurs de $r^k(\varepsilon_{xx}/\varepsilon_{yy})$ proches de 0.25 indiquent donc que ε_{yy}^k est quatre fois plus importante que ε_{xx}^k .

Les valeurs de $r^k(\varepsilon_1/\varepsilon_2)$, varient entre 0,18 à 0,31 et la valeur moyenne de 0,24 reste très proche de $r^k(\varepsilon_{xx}/\varepsilon_{yy})$. Ceci confirme que les axes x et y sont proches des axes principaux.

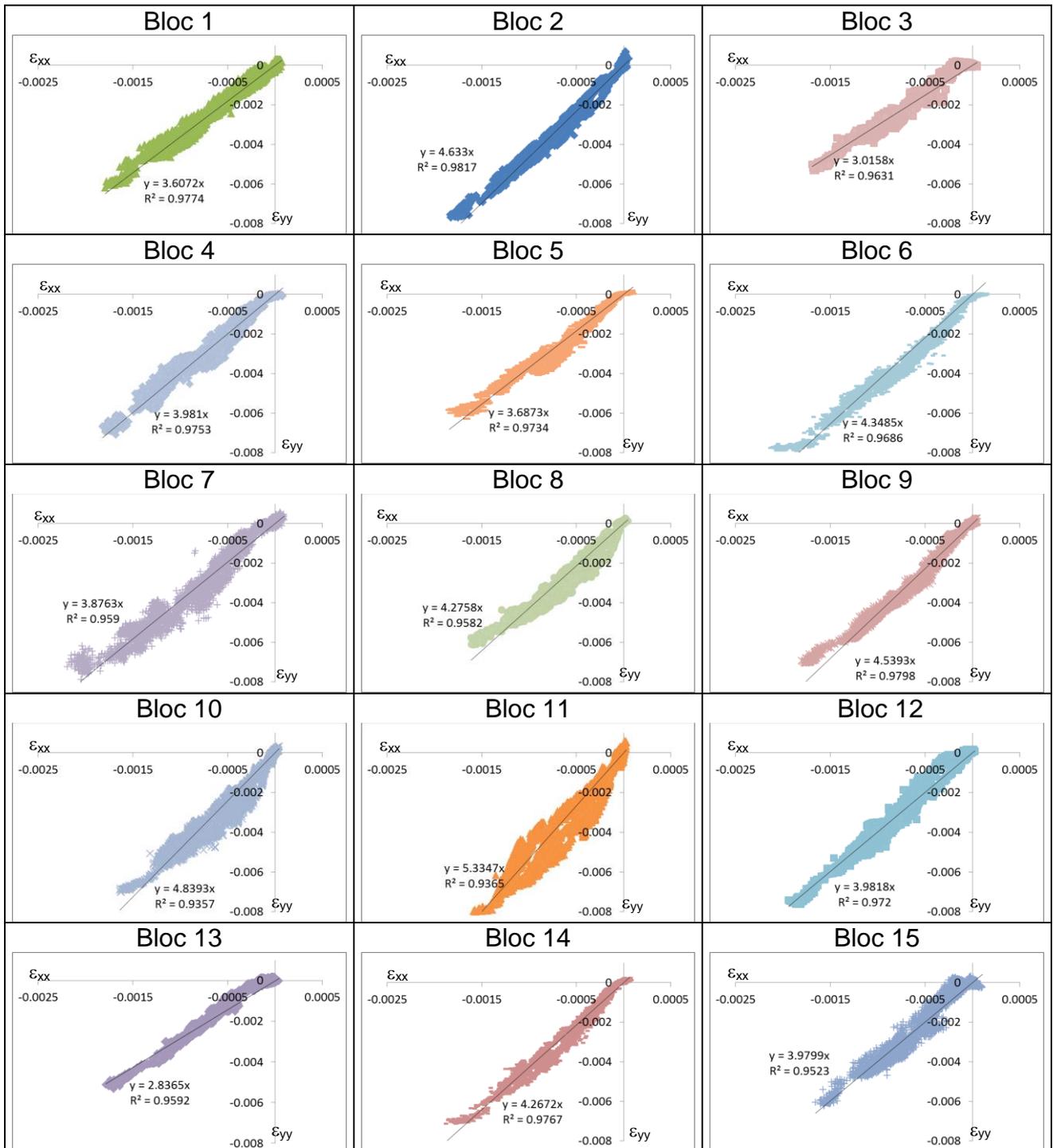


Figure 3. Evolution des déformations ε_{yy} par rapport aux déformations ε_{xx} pour les quinze blocs. Les valeurs des pentes affichées correspondent à $1/r$.

Bloc	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	moy
$r^k(\varepsilon_{xx}/\varepsilon_{yy})$	0,28	0,22	0,33	0,25	0,27	0,23	0,26	0,23	0,22	0,21	0,19	0,25	0,35	0,23	0,25	0,25
$R^2(\varepsilon_{xx}/\varepsilon_{yy})$	0,98	0,98	0,96	0,98	0,97	0,97	0,96	0,96	0,98	0,93	0,94	0,97	0,96	0,98	0,95	-
$r^k(\varepsilon_1/\varepsilon_2)$	0,28	0,21	0,31	0,24	0,26	0,21	0,25	0,23	0,21	0,20	0,18	0,24	0,32	0,22	0,22	0,24
$R^2(\varepsilon_1/\varepsilon_2)$	0,97	0,95	0,97	0,97	0,95	0,96	0,94	0,95	0,95	0,92	0,91	0,98	0,98	0,96	0,95	-

Tableau 1. Valeurs des rapports d'anisotropie r^k en fonction des déformations ($\varepsilon_{xx}^k, \varepsilon_{yy}^k$) et des déformations principales ($\varepsilon_1^k, \varepsilon_2^k$).

Dans la littérature, des rapports d'anisotropie des déformations hydromécaniques ont été mesurés sur des échantillons de l'argilite du COx (laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne). Toutefois les échelles d'observation, les propriétés minéralogiques et mécaniques, ainsi que les conditions aux limites (chargements, déplacements) ne sont pas comparables entre les données de la littérature et nos résultats. L'ensemble de ces données ont été obtenues sur des carottes soumises à des variations d'humidité relative (Pham et al, 2007) ou à un chargement mécanique couplé à des variations d'humidité relative (Yang et al., 2012).

Pour les échantillons soumis à des variations d'humidité relative ($33 \leq RH \leq 90\%$) la gamme des rapports d'anisotropie se situe entre 0,42 et 0,48. Les valeurs du rapport d'anisotropie semblent diminuées lors de l'hydratation de l'échantillon ($RH=33 \rightarrow 90\%$).

Pour les rapports d'anisotropie associés aux chargements mécaniques couplés à des variations d'humidité relative ($40 \leq RH \leq 85\%$), les valeurs varient entre 0,23 et 0,45. Toutefois, une faible variation du rapport d'anisotropie (0,25-0,3) semble être observée lors de l'hydratation de l'échantillon ($RH=45$ augmentant jusqu'à 80%) soumis à une contrainte de 2 MPa. Dans ce dernier cas, la gamme des rapports d'anisotropie est proche des résultats de notre étude obtenus sur l'argilite de Tournemire.

5. Conclusion

Le travail présenté dans cet article a permis de mesurer les champs de déplacements sur une surface de $344 \times 275 \text{ mm}^2$. L'analyse de ces champs a permis de localiser des fissures hydriques et de quantifier quinze blocs « continus ». Sur ces blocs, le déplacements varient linéairement dans les directions parallèles et perpendiculaires à la stratification. L'originalité de notre approche a permis d'interpoler chaque déplacement de chaque bloc par l'équation d'un plan. Ce travail a permis de caractériser l'anisotropie des déformations hydriques de l'argilite de Tournemire.

L'anisotropie des déformations hydriques à notre échelle d'observation semble homogène sur la surface d'étude avec une valeur moyenne de 0,25. Autrement dit la déformation perpendiculaire à la stratification est quatre fois plus élevée que celle parallèle à la stratification. Cette valeur confirme le caractère anisotrope de l'argilite de Tournemire. Ce travail expérimental pourrait d'être comparé des résultats de modélisations numériques (exemple : méthode des éléments finis) et pourrait permettre d'enrichir les lois de comportement implémentées pour affiner la modélisation du comportement hydromécanique des argilites à l'échelle d'une galerie.

6. Références bibliographiques

- Blümling P, Bernier F, Lebon P, Martin CD. (2007). The Excavation-Damaged Zone in clay formations - Time-dependent behaviour and influence on performance assessment. *Physics and Chemistry of the Earth*, 32, pp.588-599.
- Hedan S, Cosenza P, Valle V, Fauchille AL, Dudoignon P, Cabrera J, (2012). Investigation of the damage induced by desiccation and heating of Tournemire argillite using digital image correlation, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 51, pp. 64-75.
- 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.
- Pham Q. T., Vales F., Malinsky L., Nguyen Minh D., Gharbi H. (2007) Effects of desaturation–resaturation on mudstone. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, Clay in natural and engineered barriers for radioactive waste confinement - Part 2*, 32, pp. 646-55.
- Rejeb A., Tijani M. (2003). Stress field in the argillaceous Tournemire site: In situ measurements and interpretation. *Revue Française de Géotechnique*, 103, pp. 75-84
- 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.
- Yang D. S., M. Bornert M., Chanchole S., Gharbi H., Valli P., Gatmiri B. (2012) Dependence of elastic properties of argillaceous rock on moisture content investigated with optical full-field strain measurement techniques. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol 53, pp. 45-55
- Wang, L. L., M. Bornert M., Yang D. S., Héripré E., Chanchole S., Halphen B., Pouya A., Caldemaïson D. (2015). Microstructural insight into the nonlinear swelling of argillaceous rocks. *Engineering Geology*, vol. 193, pp. 435-444.