

Corrélation d'images numériques adaptée au milieu fracturé. Applications aux roches argileuses.

S. HEDAN^a, V. VALLE^b, P. COSENZA^a

a. Université de Poitiers, CNRS UMR 7285 IC2MP, HydrASA, ENSI POITIERS, 1 rue Marcel Doré, 86073 Poitiers Cedex. stephen.hedan@univ-poitiers.fr

b. Université de Poitiers, CNRS UPR 3346 Institut PPRIME, Université de Poitiers, CNRS UPR 3346 Institut PPRIME, Université de Poitiers, CNRS UPR 3346 Institut PPRIME

Résumé :

Ces travaux visent à développer un algorithme de corrélation d'images numériques (H-DIC) pour les milieux discontinus permettant une extraction automatique de la position des fissures, ainsi que des valeurs locales d'ouverture et de glissement. Cette adaptation, implémentée dans un code de corrélation, permet de tenir compte de la présence d'une discontinuité lors du calcul du produit de corrélation. Cet enrichissement a nécessité une parallélisation (GPU CUDA) du code. L'analyse des résultats sur des images simulées et réelles a permis de valider cette adaptation et l'étude du comportement des fissures avec l'extraction quantitative de valeurs cinématiques peut être envisagée. L'application présentée porte sur une roche argileuse, roche hôte dans le cadre d'un stockage en géologie profonde, soumise à un cycle naturel d'hygrométrie, entraînant une fissuration. Notre étude s'est concentrée sur la localisation des fissures, et la mesure de l'ouverture et le glissement des lèvres. L'ensemble des données obtenues, permettent aussi de calculer l'aire fracturée et de la coupler au chargement (RH et T).

Abstract:

This work aims to develop a digital image correlation algorithm (H-DIC) for discontinuous medium allowing automatic extraction of crack location, the local aperture and slip values. This adaptation, implemented in a code of correlation, makes it possible to take into account the presence of a discontinuity when calculating the correlation coefficient. This enrichment required parallel computing platform (GPU CUDA). The analysis of the results on simulated and real cases allowed to validate this adaptation and the behavior study of the cracks with the quantitative extraction of kinematic values can be made.

The application concerns a clay-rock, host rock in the context of deep geological storage, subjected to a natural cycle of hygrometry, generating a damage zone. Our study focused on the location of cracks, and the measurements of opening and sliding. All the data obtained also make it possible to calculate the fractured area and to correlate it to the loading (RH and T).

Mots clés : Corrélation d'images numériques, mesure de champs, fissuration

1 Introduction

La connaissance de la morphologie des fissures est indispensable pour comprendre le mécanisme de fissuration des sols [1] et des roches ainsi que le mécanisme de transport de l'eau dans les milieux fissurés non saturés. Grâce aux développements des moyens d'imagerie numériques, la caractérisation des fissures a évolué d'une simple visualisation à une quantification. Pour cela, les fissures sont enregistrées au moyen d'une caméra, sous la forme d'images, où l'organisation superficielle des fissures est quantifiée à l'aide d'indices géométriques et morphologiques. Dans le cas des fissures de dessiccation, les méthodes d'imagerie numérique basées sur ces approches présentent deux limites: (i) la précision de la détection des fissures de dessiccation (toujours supérieure ou proche d'un pixel) et (ii) son application uniquement pour les fissures soumises à un mode d'ouverture (mode d'ouverture ou mode I en mécanique de la rupture). Ces méthodes d'imagerie permettent d'extraire la largeur des fissures lorsque l'ouverture est supérieure ou proche du pixel. Toutes les fissures ayant une ouverture inférieure à cette valeur ne sont pas prises en compte entraînant une sous-estimation de la fracturation et donc du nombre réel de chemins d'écoulement.

L'approche la plus classique consiste à segmenter l'image pour mettre en évidence les fissures de séchage. Les limites de cette approche sont la précision sur la localisation des fissures et leur ouverture car cette approche nécessite un bon contraste entre le matériau et les fissures. En fonction du seuil choisi par l'utilisateur, il y a donc une sous-estimation ou une surestimation de l'ouverture de la fissure, ayant une influence importante sur la quantité d'eau en mouvement. De plus, tous les mouvements de cisaillement (mode II ou III) des lèvres des fissures ne sont pas quantifiés.

Récemment, Hedan et al.2018 [2] ont montré une variabilité spatiale du rapport entre les déformations sub-horizontales et sub-verticales pour une roche argileuse isotrope transverse ayant pour conséquence la fracturation de la roche. L'adaptation de la corrélation d'images numériques au milieu discontinu permet d'étudier le comportement cinématique des fissures de cette roche.

2 Méthode et site expérimental

En mécanique expérimentale, la capacité de la CIN à observer et étudier la concentration des déformations proche de la pointe de fissure a été démontrée dans de nombreux articles scientifiques [3] [4]. Pour obtenir le champ de déplacement lors d'une transformation physique, la méthode CIN recherche les changements de position d'un motif de mouchetis situé sur la surface de l'échantillon. Ce mouchetis est régulièrement artificiel afin d'avoir de bonnes variations de contraste dans les images, mais dans certains cas, le contraste naturel de l'objet est suffisant. Deux images sont nécessaires pour obtenir les déplacements plans dans la zone d'intérêt. Le principe de cette méthode est de minimiser une fonction de corrélation entre deux fonctions sur un sous-ensemble [3]. Plusieurs méthodes CIN ont été développées pour déterminer le champ cinématique (u , v) proche de discontinuités géométriques comme les fissures, on peut citer les travaux de [5] [6]. Dans notre cas, le logiciel H-DIC (CIN enrichie des fonctions Heaviside) [7] est utilisé. Ce logiciel est basé sur une extension de la méthode CIN classique enrichie des fonctions Heaviside bidimensionnelles $H(x,y)$ et un processus de minimisation sur le sous-ensemble. Les précisions de cet algorithme sont de ± 1 pixel sur la localisation des fissures (discontinuités de déplacement) et de l'ordre de 0,14 pixels sur le vecteur saut de déplacement.

Le dispositif expérimental mis en place dans la galerie de la station expérimentale de Tournemire comprend quatre parties [4] : (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 (HR et T) sont enregistrées toutes les 15 minutes à l'aide de capteurs placés à une distance de deux mètres 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.

3 Résultats

3.1 Images simulées

La figure 1 montre les différences entre les déplacements imposés et mesurés pour des mouvements infra-pixel (ouverture et glissement) des lèvres de la fissure simulant des modes I, II et mixte. Les incertitudes de déplacements sont calculées pour chaque état de translation imposée. Les erreurs dépendent de la valeur du vecteur saut imposé (u_H, v_H) et de la localisation de la fissure dans les images simulées. En effet, le saut d'un pixel ne se superpose pas avec un pixel entier alors que c'est le cas pour un saut de deux pixels, ce qui explique pourquoi les erreurs sont inférieures pour deux pixels par rapport à un pixel. L'erreur moyenne est de 0,08 pixels pour l'ouverture (o), 0,0051 pixels pour la composante de glissement (s) et 0,03 rad pour l'angle α . Les écarts-types maximaux sont respectivement de 0,058 pixel, 0,054 pixel et 0,11 rad.

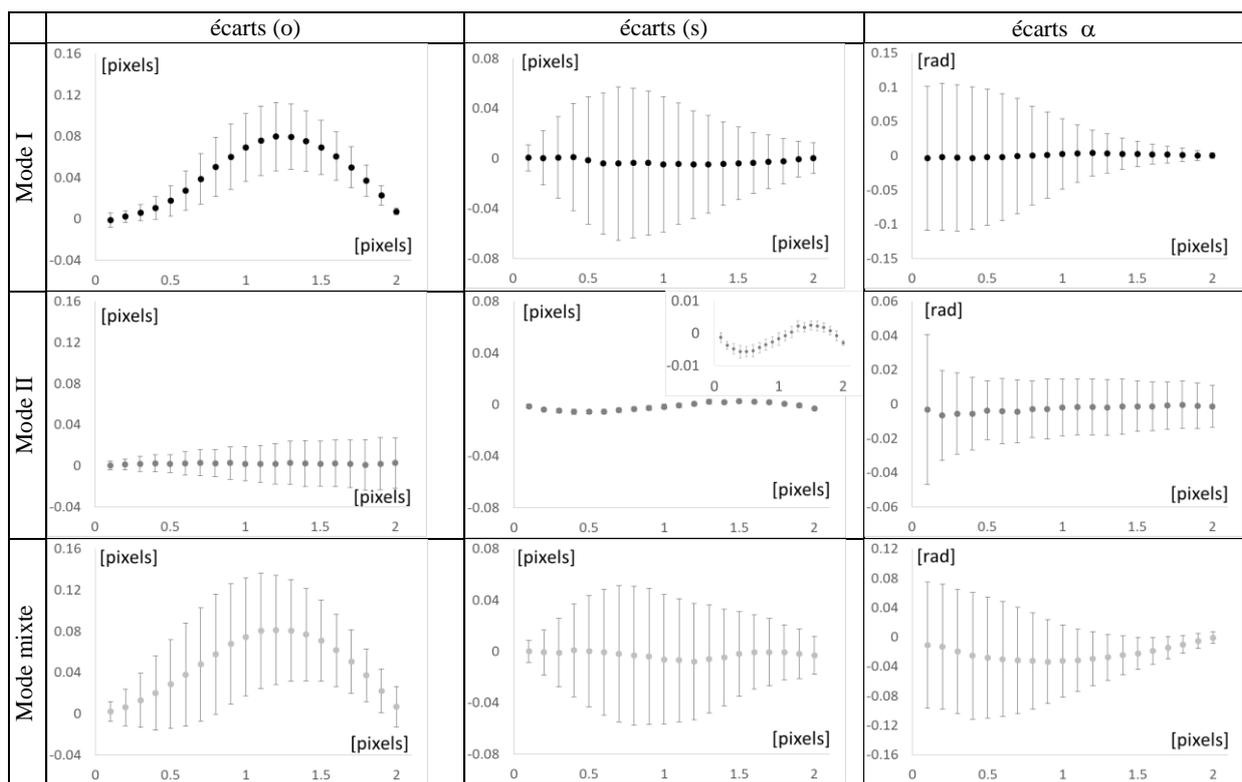


Figure 1: Erreurs et écarts-types de o , s et α pour des sauts sub-pixel simulant un mode d'ouverture, (mode I), de glissement (mode II) et mixte (modes I-II)

3.2 Images réelles d'un front de galerie

La figure 2 montre les champs des composantes o et s obtenus pour un état de chargement ($\Delta RH=73.71\%$, $\Delta T=7.22^\circ C$) du front de la galerie EST96 de la station expérimentale de Tournemire et pour un état proche d'un état extrême ($\Delta RH=73.71\%$, $\Delta T=7.22^\circ C$). On visualise facilement la position des fissures. Ces champs permettent aussi de quantifier l'ouverture locale, le glissement local. Cette fracturation composée de fissures sub-horizontales et sub-verticales entraîne une modification des propriétés du matériau en termes d'hydromécanique (endommagement) et de perméabilité à eau et au gaz [8].

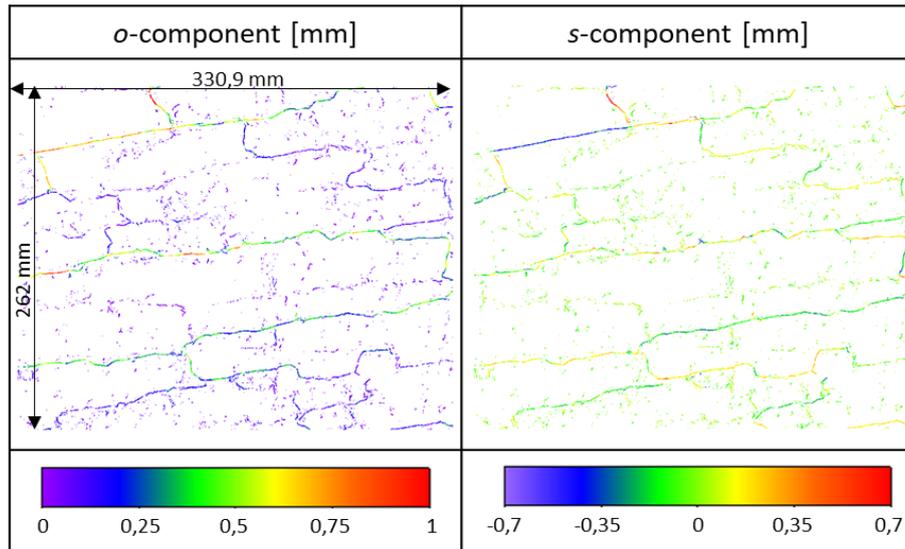


Figure 2 : champs des composantes o et s obtenus sur un front de galerie de la station expérimentale de Tournemire. Etat proche d'un état extrême ($\Delta RH=73.71\%$, $\Delta T=7.22^\circ C$).

La précision sub-pixel de l'ouverture des fissures de dessiccation et la spatialisation des fissures permet de calculer l'aire fracturée (CA) (éq.1) pour chaque état déformé analysé (t) sur une période d'un an. En première approche et pour chaque pixel fracturé, la largeur de ce dernier sera égale à la largeur du pixel.

$$CA(t) = \sum_{i=0}^N o(x, y, t) \cdot \gamma^2 \quad (\text{éq.1})$$

avec γ le grandissement ($\gamma=0,269 \text{ mm.pixel}^{-1}$) et o la valeur de l'ouverture des fissures de dessiccation pour $o \geq 0.136$ pixel (i.e. 36,6 mm).

L'analyse de la figure 3 permet d'observer cinq résultats marquants :

- L'aire fracturée (CA) augmente linéairement avec le nombre de pixels fracturés, jusqu'à un nombre maximal de sous-domaines fracturés ($N_{\max}=12193$).

- Malgré un nombre maximal de sous-domaines fracturés, l'aire fracturée (CA) n'est que $227,5 \text{ mm}^2$, traduisant la présence d'une grande quantité de sous-domaine fissuré, mais dont l'ouverture locale est faible. On parle alors de fissures (majeures et mineures) ayant une petite ouverture. Cette aire fracturée (CA) correspond à $0,29\%$ de l'aire totale de la ROI.

- Une fois toutes les fissures ouvertes, il s'ensuit une période ouverture/fermeture en fonction de l'hygrométrie dans la galerie, jusqu'à une aire fracturée maximale (CA_{\max}) de $595,8 \text{ mm}^2$ obtenue pour des écarts d'humidité relative et de température maximales ($\Delta HR=72,7\%$ et $\Delta T=7,9^\circ C$) (figure 3).

- A cet instant, le nombre de sous-domaines fracturés n'est que 9444 (figure 3), soit une diminution d'environ 2750 sous-domaines pour lesquels H-DIC ne détecte pas de fissures parce que l'ouverture est inférieure à la résolution. Ceci peut être interprété par une domination des majeures à s'ouvrir préférentiellement et d'avantage au détriment des mineures qui se ferment. La différence entre les 'majeures' et les 'mineures' est peut-être leur profondeur plus ou moins importante dans le massif rocheux. Pour cet état extrême, l'aire fracturée (CA) correspond à 0,75% de l'aire totale de la ROI.

- Une fois l'aire fracturée maximale, il s'ensuit une nouvelle période ouverture/fermeture en fonction de l'hygrométrie dans la galerie, jusqu'à une fermeture complète et à retour à un état déformé proche de l'état initial ($CA \approx 0$).

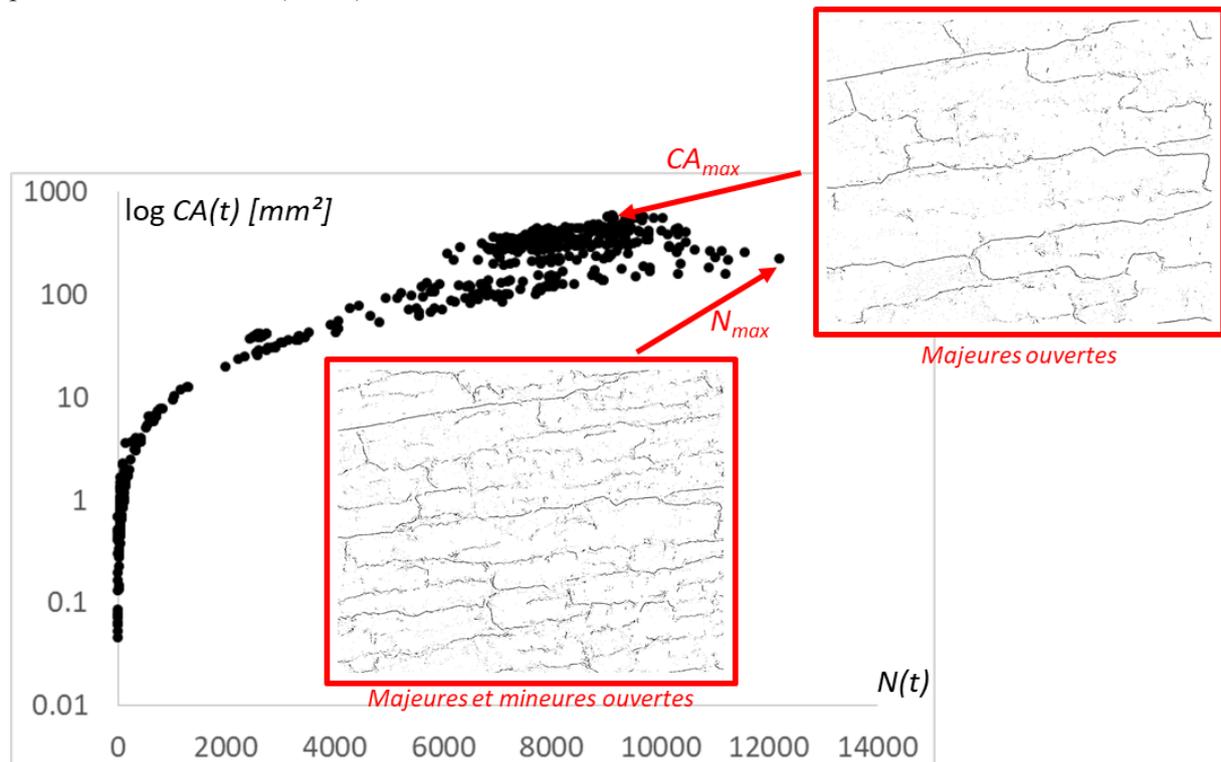


Figure 3 : Evolution de $\log CA$ en fonction du nombre de sous-domaines $N(t)$.

4 Conclusions

Les fortes avancées de la corrélation d'images numériques au milieu discontinu sont la détection automatique des fissures, ainsi que l'extraction des valeurs d'ouverture et de glissement en sous-domaine avec une précision sub-pixel de l'ordre de 0,14 pixel. Dans le cas d'une roche argileuse soumise à un cycle naturel d'hygrométrie, l'utilisation de ce nouvel algorithme montre que les fissures de dessiccation évoluent suivant un mode d'ouverture (mode I), mais aussi suivant un mode de cisaillement. Ce dernier aspect est loin d'être classique en géomécanique. Les résultats montrent que l'ouverture et le glissement sont du même ordre de grandeur et que pour la majorité des fissures, le mode dominant est le mode d'ouverture. Ces résultats permettent aussi de quantifier l'aire fracturée totale et de la comparer aux conditions de chargement (humidité relative et température). L'analyse de l'aire fracturée met en avant deux faits marquants :

- le nombre maximal de sous-domaines détectant une fissure ne correspond pas aux valeurs extrêmes de chargement (humidité relative et température) et deux types de fissures (majeures et mineures) sont observables avec des ouvertures faibles.

- l'aire fracturée maximale est obtenu pour l'état de chargement maximal et seules les fissures majeures sont ouvertes avec des valeurs d'ouverture plus importantes.

Références

- [1] H.-J.Vogel, H. Hoffmann, A. Leopold, K. Roth. Studies of crack dynamics in clay soil: II. A physically based model for crack formation. *Geoderma* 125, 2005.
- [2] S. Hedan V. Valle, J. Cabrera, P Cosenza. A new approach to quantify the anisotropy of hydromechanical strains in clay-rock at the gallery scale ». *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 111, 2018.
- [3] Sutton MA., WJ Wolters W J., WH Peters W H., WF Ranson W F., McNeill SR. Determination of displacements using an improved digital correlation method. *Image and Vision Computing*1(3) (1983) 133-139
- [4] Hedan, S., Fauchille A-L., Valle, V., Cabrera J., Cosenza P. One-year monitoring of desiccation cracks at Tournemire experimental station using Digital Image Correlation. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*68 (2014) 22-35.
- [5]Jin H., Bruck H.A., Pointwise digital image correlation using genetic algorithms, *Experimental Technique*291 (2005) 36–39
- [6]Grégoire D., Maigre H., Mrestin F., New experimental technique for dynamic crack localization. *European Journal of computational mechanics*18 (2009) 255–283.
- [7] Valle, V., Hédan, S., Cosenza P., Fauchille A-L, Digital Image Correlation development for the study of materials including multiple crossing cracks; *Experimental Mechanics*55(2) (2015) 379-391.
- [8] Davy CA, Skoczylas F, Barnichon J-D, Lebon P. Permeability of macro-cracked argillite under confinement: Gas and water testing. *Phys Chem Earth Parts ABC* 2007;32:667–80. doi:10.1016/j.pce.2006.02.055.