



HAL
open science

Impact d'instabilités hydrauliques sur l'amplitude de déformation du milieu granulaire durant le drainage

Rana Al Nemer, Giulio Sciarra, Julien Réthoré

► **To cite this version:**

Rana Al Nemer, Giulio Sciarra, Julien Réthoré. Impact d'instabilités hydrauliques sur l'amplitude de déformation du milieu granulaire durant le drainage. 11èmes journées nationales de géotechnique et de géologie de l'ingénieur, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon [INSA Lyon], CFMS, CFMR, CFGI, Jun 2022, Lyon, France. hal-03720202

HAL Id: hal-03720202

<https://hal.science/hal-03720202>

Submitted on 11 Jul 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

IMPACT D'INSTABILITÉS HYDRAULIQUES SUR L'AMPLITUDE DE DÉFORMATION DU MILIEU GRANULAIRE DURANT LE DRAINAGE

IMPACT OF HYDRAULIC INSTABILITIES ON THE DEFORMATION AMPLITUDE OF GRANULAR MEDIUM DURING DRAINAGE

Rana AL NEMER¹, Giulio SCIARRA¹, Julien RETHORE¹

¹ Nantes Université, Ecole Centrale Nantes, CNRS, GeM, UMR, Nantes, France

RÉSUMÉ – Dans le cadre du stockage souterrain des hydrocarbures dans les aquifères, cette étude examine l'impact de chargements hydromécaniques sur la déformation d'un milieu granulaire durant un processus de drainage. Une nouvelle machine biaxiale dotée d'un système optique a été mise en œuvre. La déformation du milieu granulaire due aux instabilités hydrauliques est quantifiée par la corrélation d'images numériques.

ABSTRACT – In the context of underground storage of hydrocarbons in the aquifer formations, this study investigates the impact of hydromechanical loadings on the deformation of a granular medium during drainage process. A new biaxial apparatus endowed with an optical system has been implemented. The deformation of the granular medium due to hydraulic instability is quantified using digital image correlation.

1. Introduction

Le stockage souterrain des hydrocarbures dans les roches aquifères est adopté afin d'assurer l'approvisionnement durant les périodes de forte consommation. Cependant, les cycles d'injection et de soutirage peuvent favoriser les fuites d'hydrocarbures stockés et générer des instabilités locales au niveau de la roche couverture.

L'écoulement biphasique est un sujet intéressant pour une partie de la communauté scientifique depuis plus de 30 années. L'un des résultats les plus importants de ces investigations a été la caractérisation d'un diagramme de phase (Lenormand, 1990) mettant en relation les motifs formés par un fluide injecté dans une cellule de Hele-Shaw initialement saturée par un autre fluide de caractéristiques différentes. En fonction du ratio entre la viscosité des deux fluides et de forces capillaires et visqueuses mises en jeu, soit dans un processus de drainage soit d'imbibition, trois régimes d'écoulement ont été identifiés: un régime stable et deux régimes instables, celui de digitation visqueuse et de digitation capillaire.

Ces études ont été menées soit sans chargement mécanique (Guo et al., 2019), soit avec un chargement mécanique de compression uniaxiale (Holtzman et al., 2012). D'autre part, des études récentes commencent aussi à s'intéresser aux instabilités couplées hydro-mécaniques. En (Hall., 2013), la vitesse d'écoulement du fluide saturant l'espace poreux est suivie lorsqu'une bande de déformation apparaît à l'intérieur d'un milieu granulaire sous chargement triaxial.

Dans ce contexte, l'étude simplifiée et préliminaire proposée prend en compte un sable saturé en eau drainé par l'air afin de simuler le processus de drainage; la déformation induite dans le milieu granulaire est quantifiée.

La nouveauté de ce travail concerne la quantification de la déformation du milieu granulaire en conditions de saturation partielle due à un couplage hydromécanique en utilisant une nouvelle machine biaxiale dotée d'un système optique à haute résolution. Des cartes de déformation volumétrique en plein champ ont été obtenues en développant

des méthodes de corrélation d'images numériques adaptées au problème. Dans cet article, le processus de drainage sera traité.

Cet article est divisé en 5 sections: la section 2 est consacrée à la description du dispositif expérimental, dans la section 3 les résultats expérimentaux sont illustrés et dans la section 4 une discussion des résultats est présentée. La dernière section est dédiée aux conclusions et aux perspectives de cette recherche.

2. Méthode expérimentale

Comme déjà mentionné, une nouvelle machine biaxiale a été conçue à l'école centrale de Nantes afin d'étudier le réarrangement granulaire d'un géomatériau sous un chargement hydromécanique. Il s'agit d'une machine adaptée aux conditions de saturations partielles qui permet un contrôle en pression de 3 fluides (2 liquides et 1 gaz) simultanément avec une pression de confinement et un chargement axial piloté en force ou déplacement. La pression maximale applicable est 1600 kPa.

Ce dispositif est caractérisé par deux couples de fenêtres transparentes dont une en contact avec les deux surfaces de l'échantillon et l'autre constitue les parois externes de la chambre de confinement. Ces fenêtres permettent une visualisation directe de la surface de l'échantillon de telle sorte à pouvoir garantir un suivi spatio-temporel de la propagation d'un fluide injecté dans l'espace poreux et des déplacements induits, à une fréquence maximale de 30 Hz. Cela est obtenu grâce à deux caméras de 50 Mpx chacune, montées avec un objectif télécentrique de part et d'autre de la machine (voir Figure 1). La résolution spatiale de ce système optique est $6,1 \mu\text{m}/\text{pixel}$.

Cependant, cet avantage est accompagné par le défi d'étanchéité car contrairement aux machines biaxiales ou triaxiales standards, l'échantillon de dimensions 40 mm en largeur, 50 mm en hauteur et 11 mm en épaisseur, n'est pas entouré d'une membrane. Les côtés latéraux de l'échantillon sont donc confinés par deux membranes qui à l'intérieur, possèdent un système mécanique intégré pour garder la forme prismatique de l'échantillon durant sa phase de préparation. Les parties inférieure et supérieure de l'échantillon sont délimitées par deux pierres poreuses qui permettent une entrée et sortie uniforme des fluides. La Figure 2 montre un schéma simplifié des différentes parties de l'échantillon. La préparation de l'échantillon est effectuée dans une configuration plane afin que le sable de Fontainebleau NE34 de diamètre moyen de $210 \mu\text{m}$ soit pluvié dans son siège.

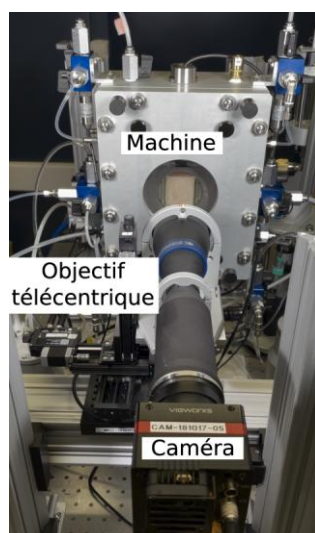


Figure 1: Machine biaxiale dotée d'un système optique

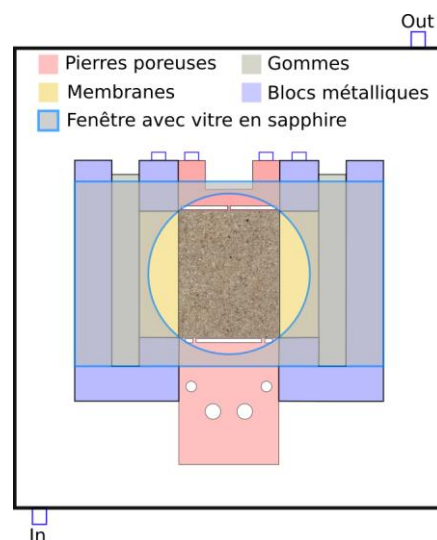


Figure 2: Schéma montrant les différentes parties formant l'échantillon

2.1. Procédure d'un test de drainage

L'essai de drainage consiste à injecter un fluide non mouillant par exemple de l'air dans un échantillon initialement saturé par un fluide mouillant (l'eau). Une saturation complète de l'échantillon est alors primordiale avant de débiter l'injection de l'air.

Un confinement de 45 kPa est appliqué au départ à l'échantillon en conditions drainés. Ensuite, l'eau déaérée est circulée à plusieurs reprises afin d'expulser le plus possible les bulles d'air piégées. Pour atteindre une saturation complète de l'échantillon, la procédure de Skempton, décrite en détails dans (Head, 1998) a été suivie. Le système est placé en conditions non drainées puis un incrément de confinement de 50 kPa est appliqué et ainsi une mesure de l'évolution de la pression interstitielle est notée. Le coefficient de Skempton B qui évoque le ratio entre l'évolution de la pression interstitielle par rapport à l'incrément de la pression de confinement est considéré comme un indicateur de la saturation complète, lorsqu'il tend vers un. Après l'application de l'incrément de confinement et la mesure de l'évolution de pression interstitielle, une contre-pression est appliquée afin de repositionner la contrainte effective à la fin de chaque palier à 10 kPa. Ces étapes sont répétées séquentiellement, comme le montre la Figure 3, jusqu'à la stabilisation du coefficient de Skempton.

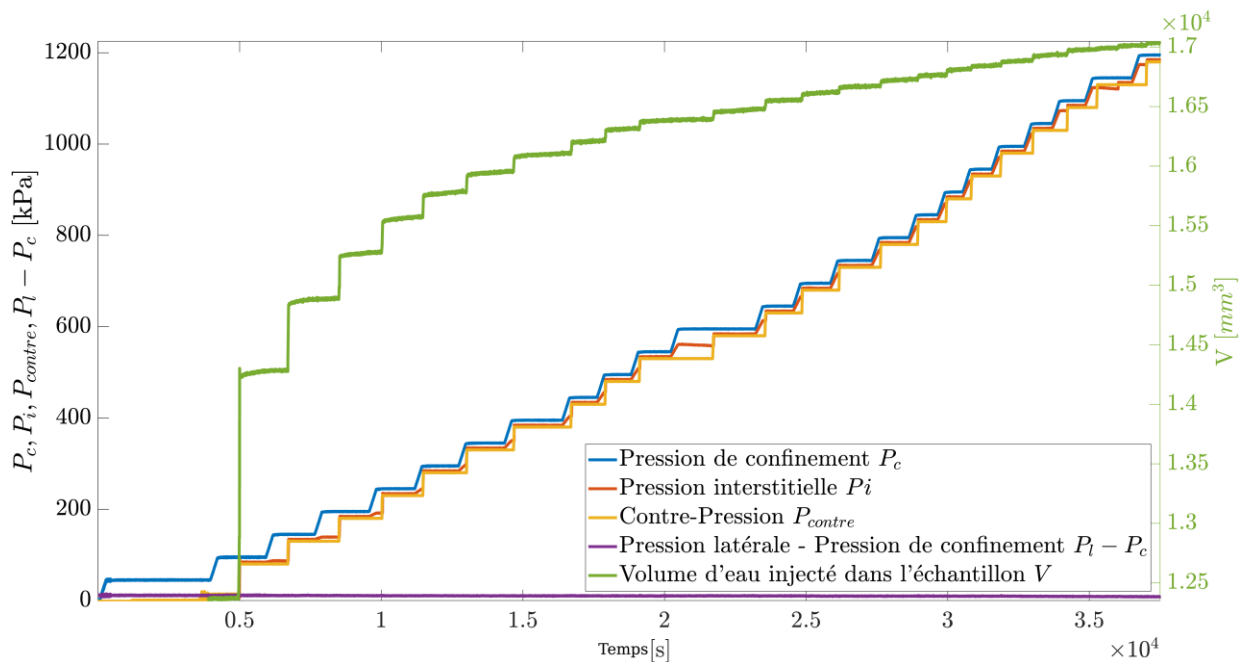


Figure 3: Séquence d'étapes appliquées durant la phase de Skempton

Une fois l'échantillon saturé, une source de gaz (de l'air), contrôlée en pression, est connectée à la base de l'échantillon de telle sorte que le gaz soit réparti uniformément sur toute la section de l'échantillon. Un incrément de pression par rapport à la pression d'eau en place, est donné au gaz, générant ainsi la percolation du gaz dans le sable saturé en eau, sous le chargement hydromécanique imposé.

3. Résultats

Le chargement hydromécanique testé correspond à une pression capillaire, définie comme la différence entre la pression du fluide non mouillant (le gaz) et celle du fluide mouillant (l'eau) $P_{cap} = P_g - P_e$, de 30 kPa et une contrainte effective de 40 kPa. Une séquence d'images à une fréquence de 30 Hz a été acquise lors du drainage et est

présentée dans la Figure 4. Ces images montrent une localisation de la propagation du gaz sous forme d'un doigt suivant la direction d'injection. En considérant les propriétés des deux fluides utilisés et l'état de chargement hydraulique, cet essai se positionne dans le régime de digitation capillaire du diagramme de phase de Lenormand.

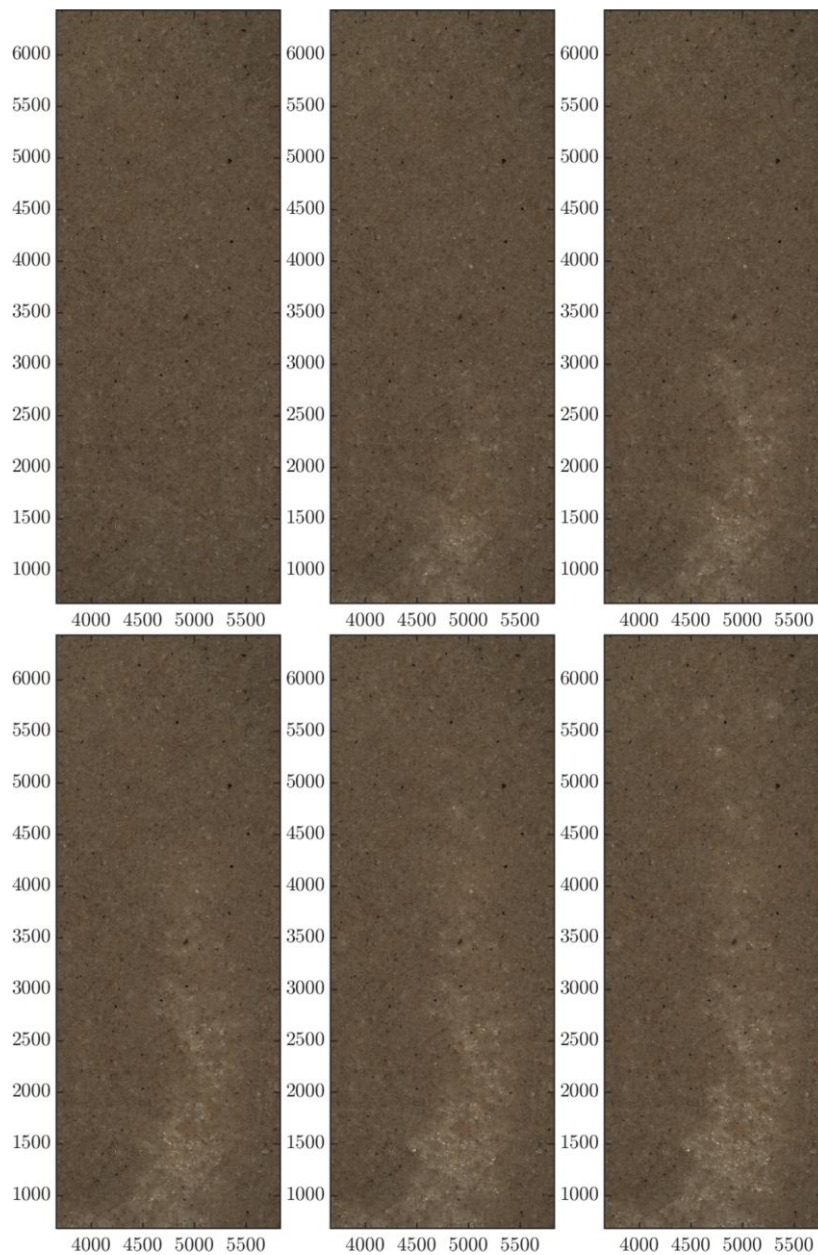


Figure 4: Série d'images brutes obtenue durant le drainage. La taille de ces images est en pixels et le pas de temps est de 0,14s. La couleur sombre correspond à la zone saturée alors que celle plus claire à la zone dé-saturée. L'image en haut à gauche correspond à l'image de référence.

En parallèle à l'identification du front de gaz, le réarrangement granulaire durant le drainage a été étudié. La méthode utilisée pour la quantification du déplacement et de la déformation est la corrélation d'images numériques. Elle est basée sur la conservation de niveaux de gris entre l'image de référence prise avant l'arrivée du gaz et les images déformées prises durant la percolation du gaz. Cette conservation est traduite par l'équation suivante:

$$f(x) = g(x + u) \quad (1)$$

où $f(x)$ correspond au niveau de gris dans une position x de l'image de référence et $g(x + u)$ le niveau de gris du même point matériel mais à une position $x + u$ dans l'image déformée. La méthode utilisée est la méthode globale basée sur un maillage d'éléments finis qui permet de déterminer le champ de déplacement en minimisant l'erreur de corrélation $f - g$ sur toute la zone d'intérêt.

Vu que l'entrée du gaz altère le niveau de gris entre l'image de référence et l'image déformée, ce qui pose un problème à la corrélation d'images, une correction locale de niveaux de gris a été introduite élément par élément afin de ramener le niveau de gris de chaque élément de l'image déformée à celui de l'image de référence.

Pour examiner l'impact de la fuite d'un gaz à travers un milieu saturée en eau sur le squelette granulaire, le premier invariant du tenseur de déformation, est estimé. Les résultats de la déformation volumétrique, obtenus pour la séquence d'image montrée dans la Figure 4 sont illustrés sur la Figure 5. L'interface qui sépare la zone saturée de la zone sèche est délimitée par la courbe noire.

4. Discussion

La propagation du gaz génère des déformations concentrées dans la zone envahie, comme montrée dans la Figure 5. Ces déformations s'alternent entre valeurs positives indiquant une dilatation du réseau poreux et valeurs négatives indiquant une compaction de ce dernier. En outre, ces déformations apparaissent simultanément et persistent le long du processus de drainage. Une moyenne des déformations volumétriques positives et négatives à l'intérieur du doigt, a été calculée en fonction du temps et présentée sur la Figure 6 ainsi que l'écart-type de ces déformations sur la Figure 7. L'infiltration du gaz produit alors des déformations positives et négatives du même ordre de grandeur et qui s'amplifie avec la propagation du gaz. En plus, ces déformations présentent une certaine variabilité par rapport à la valeur moyenne étant donnée l'hétérogénéité du milieu.

Le phénomène physique qui peut justifier l'apparition de déformations positives et négatives peut être mis en relation aux événements de sauts de Haines qui se manifestent largement lors d'un processus de drainage. Ce type d'instabilités, bien documenté dans la littérature, voir par exemple dans (Zacharoudiou I et al., 2016), est lié à la chute de la pression capillaire lorsque le fluide non-mouillant, qui s'écoule à travers le milieu granulaire, passe d'une gorge au pore voisin, ce qui induit une variation brutale de la courbure de l'interface fluide-fluide. Cette chute de pression est accompagnée au même temps par l'imbibition des gorges voisines où la pression capillaire par conséquent augmentera. Ainsi la diminution de la pression capillaire génère une dilatation du milieu alors que l'augmentation de cette dernière induit une contraction. Un résultat qui confirme ce type de comportement a été obtenu par (Sun et al., 2019) pour un drainage effectué dans des tuyaux capillaires.

5. Conclusions et perspectives

Dans ce papier, une nouvelle machine biaxiale conçue pour les milieux partiellement saturés a été présentée. Les résultats préliminaires d'un essai de drainage montre à l'échelle granulaire des réarrangements des grains. Des déformations volumétriques ont été quantifiées en utilisant la technique de corrélation d'images numériques.

Une étude plus approfondie sera menée afin d'investiguer la relation entre les phénomènes de sauts de Haines et le réarrangement granulaire. En outre, plusieurs couples de (pression capillaire, contrainte effective) seront employés pour déterminer

l'effet du chargement hydromécanique sur la propagation du front et sur la déformation engendrée.

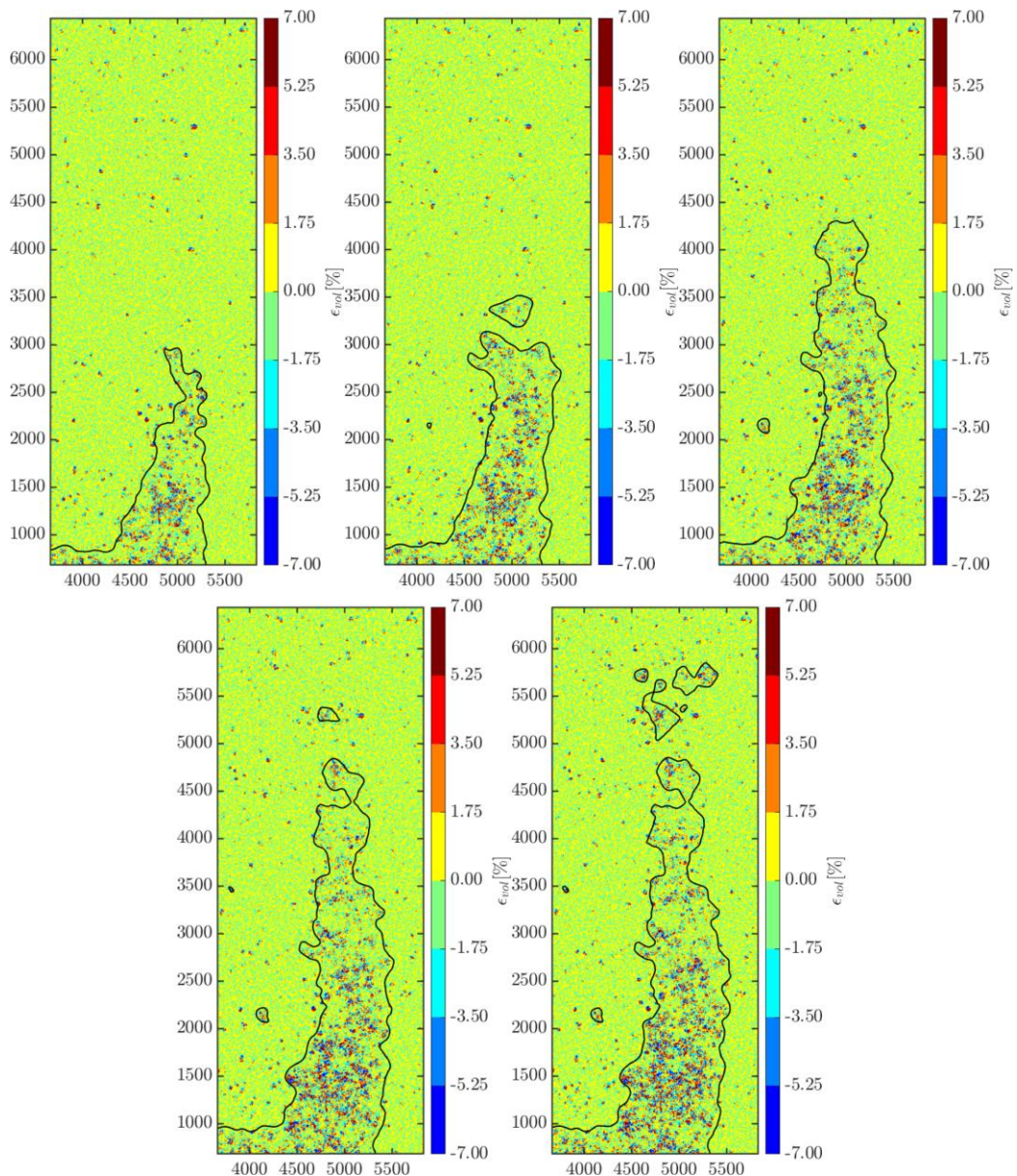


Figure 5: Cartes de déformations volumétriques du milieu granulaire dues à la percolation du gaz

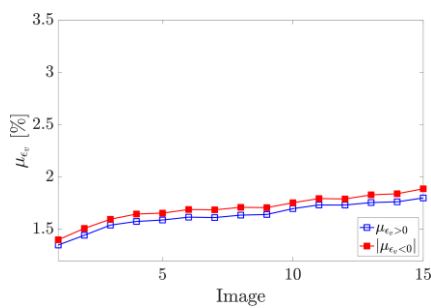


Figure 6: Moyenne de la déformation volumétrique en fonction du temps

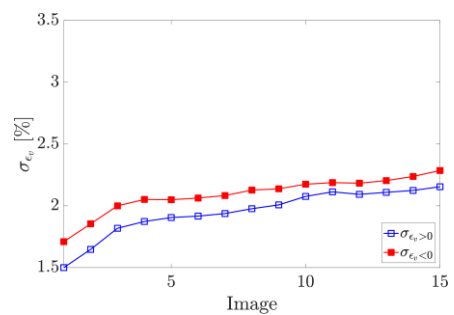


Figure 7: Écart-type de la déformation volumétrique en fonction du temps

6. Références bibliographiques

- Guo, F., & Aryana, S. A. (2019). An experimental investigation of flow regimes in imbibition and drainage using a microfluidic platform. *Energies*, 12(7), 1390.
- Hall, S. A. (2013). Characterization of fluid flow in a shear band in porous rock using neutron radiography. *Geophysical Research Letters*, 40(11), 2613-2618.
- Head, K. H. (1998). *Manual of soil laboratory testing. Volume 3: effective stress tests* (No. Ed. 2). John Wiley & Sons.
- Holtzman, R., Szulczewski, M. L., & Juanes, R. (2012). Capillary fracturing in granular media. *Physical review letters*, 108(26), 264504.
- Lenormand R. (1990). Liquids in porous media. *Journal of Physics: Condensed Matter* 2, SA79.
- Sun, Z., & Santamarina, J. C. (2019). Haines jumps: Pore scale mechanisms. *Physical review E*, 100(2), 023115.
- Zacharoudiou, I., & Boek, E. S. (2016). Capillary filling and Haines jump dynamics using free energy Lattice Boltzmann simulations. *Advances in water resources*, 92, 43-56.