



**HAL**  
open science

# Détection et surveillance des instabilités hydromécaniques dans les géomatériaux: digitation et déformations localisées

Rana Al Nemer, Giulio Sciarra, Julien Rethore

► **To cite this version:**

Rana Al Nemer, Giulio Sciarra, Julien Rethore. Détection et surveillance des instabilités hydromécaniques dans les géomatériaux: digitation et déformations localisées. 25e Congrès Français de Mécanique, Nantes, 29 août-2 septembre 2022, Aug 2022, Nantes, France. hal-04280014

**HAL Id: hal-04280014**

**<https://hal.science/hal-04280014>**

Submitted on 10 Nov 2023

**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.

# Détection et surveillance des instabilités hydro-mécaniques dans les géomatériaux: digitation et déformations localisées

R. Al Nemer <sup>a</sup>, G. Sciarra<sup>b</sup>, J. Réthoré<sup>c</sup>

a. Ecole Centrale de Nantes; rana.al-nemer@ec-nantes.fr

b. Ecole Centrale de Nantes; giulio.sciarra@ec-nantes.fr

c. Ecole Centrale de Nantes; julien.rethore@ec-nantes.fr

## Résumé

*L'infiltration du gaz dans un milieu poreux saturé par un fluide mouillant est un enjeu pour plusieurs applications comme la séquestration du CO<sub>2</sub>, le séchage d'un milieu initialement saturé et le stockage souterrain des hydrocarbures. Une étude à l'échelle de laboratoire a été réalisée pour étudier le réarrangement de la matrice granulaire suite à cette infiltration, en utilisant une nouvelle machine biaxiale adaptée aux milieux partiellement saturés. Les résultats préliminaires obtenus des essais de drainage, montrent une localisation de déformations dans les zones envahies qui est proportionnelle à la contrainte effective initiale appliquée.*

## Abstract

*The gas infiltration in a porous medium saturated with a wetting fluid is a challenge for several applications such as CO<sub>2</sub> sequestration, drying of initially saturated soil and underground storage of hydrocarbons. A study at laboratory scale has been conducted to investigate the behavior of the granular matrix due to this infiltration, using a new biaxial apparatus adapted to partially saturated media. The preliminary results obtained from drainage tests show strain localization in the invaded zones which is proportional to the initial applied effective stress.*

**Mots clés : instabilités, drainage, digitation, déformations, milieux partiellement saturés**

## 1 Introduction

Avec l'augmentation de l'intérêt vers la transition énergétique, le stockage souterrain des hydrocarbures dans les roches aquifères est considéré comme une solution possible pour assurer l'approvisionnement des matières premières et la stabilité des prix. Cependant, les cycles d'injection et de soutirage des hydrocarbures peuvent favoriser la fuite des produits stockés et générer des instabilités hydrauliques locales au niveau de la roche couverture. Dans la littérature, la caractérisation de ces instabilités est

simplifiée en considérant en premier lieu un écoulement diphasique dans les cellules Hele-Shaw. Le suivi d'un processus de drainage, en injectant un fluide non mouillant dans une couche de billes de verre saturée par un fluide mouillant, a été pleinement étudié pour classifier les patterns observés dans un diagramme de phase ([1, 2, 3]). Trois régimes ont été identifiés: digitation capillaire, digitation visqueuse et domaine stable, selon deux paramètres: (a) le rapport de viscosité entre fluide injecté et fluide en défense et (b) le nombre de capillarité. La plupart de ces études ne prend en compte ni l'application de chargement mécanique, ni la pressurisation des fluides. D'autre part, des essais triaxiaux sont menés sur de vrais échantillons de sol, en contrôlant la pression de confinement ainsi que la pression des fluides pour déterminer la pression de rupture de la roche couverture, connue par "breakthrough" ([4, 5, 6]) ; sauf que ces essais, ne s'intéressent pas à la quantification du réarrangement de la microstructure causé par l'infiltration du fluide.

Dans ce cadre, afin d'étudier un écoulement diphasique dans les géomatériaux sous chargement hydro-mécanique et quantifier la déformation induite par les instabilités hydrauliques, une étude simplifiée a été élaborée à l'échelle du laboratoire. Le but est de reproduire la formation des ces instabilités dans un sable fin. Une nouvelle machine bi-axiale, adaptée aux sols non saturés et équipée par des caméras de haute résolution, a été mise en œuvre au laboratoire GeM à l'Ecole Centrale de Nantes. Des essais de drainage ont été menés en injectant de l'air dans un sable saturé en eau soumis à un chargement mécanique biaxial. Ensuite les déformations induites par l'invasion de l'air ont été quantifiées par la corrélation d'images numériques (CIN). Cet article est organisé comme suit: la Section 2 concerne la description du nouveau dispositif et la procédure de mise en place d'un essai de drainage. Ensuite la Section 3 est consacrée aux résultats issus de deux essais de drainage et finalement la Section 4 est dédiée aux conclusions.

## 2 Méthode expérimentale

### 2.1 Description du dispositif

Pour comprendre le mécanisme des instabilités hydrauliques, une nouvelle machine biaxiale, adaptée aux milieux partiellement saturés, a été conçue. Elle est équipée d'un système optique à haute résolution pour enregistrer l'avancement de ces instabilités en fonction du temps. Une cellule tenant un échantillon prismatique de dimensions  $40 \times 50 \times 11 \text{ mm}^3$ , est fixée à l'intérieur de la chambre de confinement. Cette cellule se différencie des cellules biaxiales ou triaxiales standards par le fait que les deux sections ( $40 \times 50 \text{ mm}^2$ , de part et d'autre de l'échantillon, sont en contact direct avec deux vitres en saphir transparentes, parallèles aux hublots de la chambre de confinement (voir Figure 1a), qui permettent le suivi spatio-temporel des instabilités. Le système optique installé, est constitué d'une caméra de 50 MPx et d'un objectif télécentrique, montrés dans la Figure 1a, et permet de filmer à une résolution de  $6.1 \text{ }\mu\text{m/pixel}$  et à une fréquence de 30 Hz l'invasion de l'air dans un milieu saturé en eau.

La forme prismatique de l'échantillon est construite par l'assemblage de 6 éléments: deux pierres poreuses en amont et aval de l'échantillon pour permettre une injection et extraction uniforme de fluides, deux membranes latérales en contact avec l'échantillon assurant une transmission de la pression de confinement vers les bords longitudinaux et finalement les deux vitres mentionnées ci-dessus dont une est vissée au préalable de la préparation de l'échantillon et une après (pour plus de détails, voir [7]). L'échantillon est préparé par la méthode de pluviation: le matériau granulaire utilisé est le sable de Fontainebleau (Fb) NE34, de diamètre moyen  $d_{50} = 210 \text{ }\mu\text{m}$  qui remplit la cellule uniformément en effectuant une chute libre à partir d'une hauteur de 250 mm.

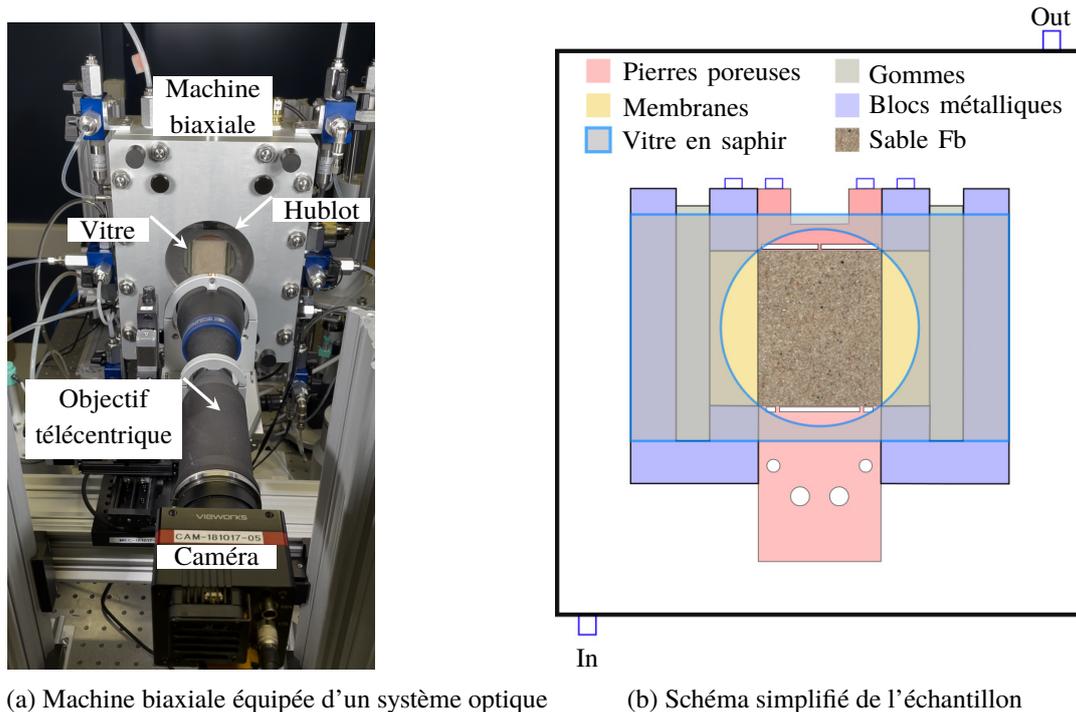


Figure 1: Dispositif expérimental et schéma simplifié de l'échantillon

## 2.2 Procédure de drainage

Les instabilités hydrauliques générées par l'invasion de l'air dans un sable saturé en eau sont détectées suite à un chargement hydro-mécanique. L'échantillon de sable est totalement saturé avant l'injection de gaz en mettant l'espace poreux de l'échantillon, sous une contrainte de confinement de 45 kPa, en succion puis en circulant de l'eau désaérée à plusieurs reprises et finalement en adoptant la méthode de saturation par contre-pression connue par l'approche de Skempton, détaillée dans [8]. A la fin de cette procédure, l'eau se trouve à une pression  $P_w$ . La contrainte effective est ajustée à ce stade, en variant la contrainte de confinement pour établir un chargement mécanique initial  $\sigma'_0$ . L'air est connecté à la base de l'échantillon, et placé à une pression  $P_g$  de telle sorte à avoir une pression capillaire  $P_c$  définie par la différence de pressions des fluides:  $P_g - P_w$ . Deux couples de valeurs  $(P_c, \sigma'_0)$  sont testés en gardant constante  $P_c$ , afin d'évaluer l'effet de la contrainte effective initiale sur l'infiltration de l'air et l'amplitude des déformations générées. La pression capillaire  $P_c$  est fixée à 30 kPa; le premier couple est caractérisé par une contrainte effective initiale égale à 40 kPa qui dépasse  $P_c$  alors que le deuxième couple est caractérisé par une contrainte effective initiale égale à 15 kPa, donc inférieure à  $P_c$ .

## 3 Résultats et discussion

Les patterns formés par l'air percolant dans le sable saturé en eau, pour les deux couples de valeurs  $(P_c, \sigma'_0)$  mentionnés ci-dessus, ont été filmés à une fréquence de 30 Hz. L'image acquise à la fin de processus de drainage, pour le cas où  $P_c < \sigma'_0$  est présentée dans la Figure 2a et pour le cas où  $P_c > \sigma'_0$  dans la Figure 2b. Le rectangle noir tracé autour du doigt développé représente la zone d'intérêt pour les calculs de CIN. On remarque que le pattern obtenu par l'essai (2) ressemble plus à un pattern de fracturation capillaire que celui obtenu par l'essai (1) selon la caractérisation de cette condition donnée en [3] et cela peut être expliqué par le faible chargement mécanique.

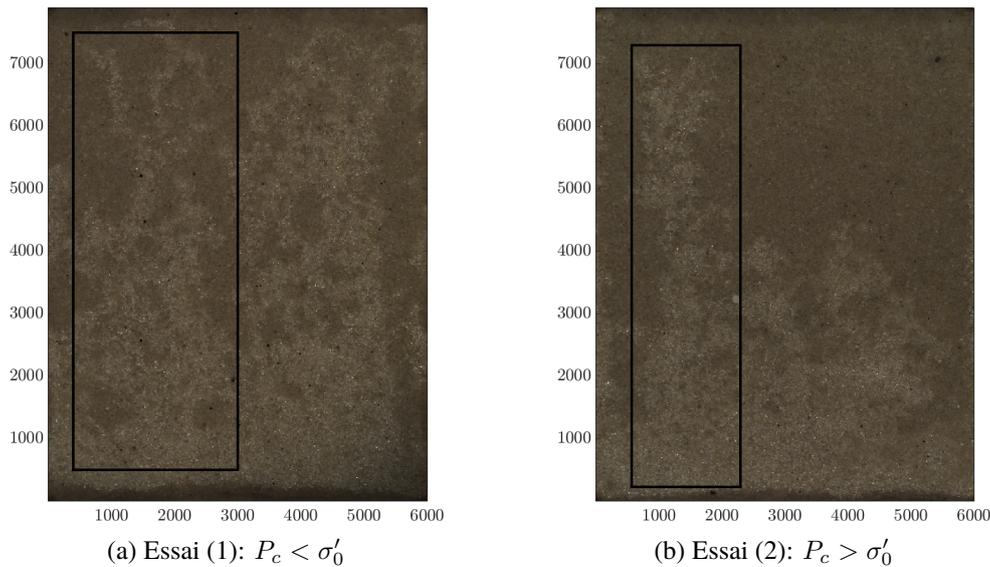


Figure 2: Les patterns de l'air pour deux chargements hydro-mécaniques. La taille de l'image: 48.2 mm de hauteur et 36.6 mm de largeur. La couleur sombre représente les zones saturées et la couleur claire représente les zones drainées par l'air. Le rectangle noir indique le domaine étudié.

Les champs de déformations sont calculés par la méthode de CIN globale, pour les zones rectangulaires délimitées dans la Figure 2. Cette méthode est basée sur la conservation du niveau de gris entre une image de référence et une image déformée et elle est traduite par l'équation  $f(x) = g(x + u)$  où  $f(x)$  représente le niveau de gris d'un point matériel  $x$  dans l'image de référence et  $g(x + u)$  le niveau de gris dans l'image déformée,  $x + u$  étant la position du point matériel après déformation, (voir [9]). Cependant, la propagation de l'air dans le sable saturé initialement en eau, modifie localement la teneur en gris: les parcours suivis par le gaz altèrent le niveau de gris du sombre au clair. Pour éliminer cet artefact de changement de contraste entre l'image de référence et les images déformées, une correction locale de niveau de gris, élément par élément d'un maillage introduit pour la résolution aux éléments finis de l'équation mentionnée ci-dessus, est introduite dans l'algorithme de la CIN. En résolvant itérativement l'équation de conservation du niveau de gris, le niveau de gris  $g$  de chaque élément de l'image déformée est modifié pour être ramené à celui de son état de référence. Le vecteur déplacement calculé aux nœuds du maillage éléments finis est ainsi déduit puis la déformation est calculée par dérivation.

Le calcul de CIN a été mené avec une taille de maillage de 5 pixels, des éléments structurés de forme carrée et une régularisation de type Tikhonov de longueur d'onde 15 pixels pour éliminer les déplacements à haute fréquence. La déformation volumétrique  $\epsilon_{vol}$  calculée comme la somme de la déformation suivant la direction horizontale  $x$  ( $\epsilon_{xx}$ ) et celle suivant la direction verticale  $y$  ( $\epsilon_{yy}$ ), est considérée pour interpréter le réarrangement granulaire dû au passage du gaz. Une déformation volumétrique positive indique une dilatation tandis qu'une déformation volumétrique négative indique une compaction. Les champs de déformations obtenus pour les deux essais sont illustrés sur la Figure 3. On peut déduire que le doigt développé induit une localisation de déformations à l'intérieur du doigt et une déformation nulle à l'extérieur. Les clusters de déformations volumétriques s'alternent entre positives et négatives et apparaissent simultanément lors du passage d'un instant  $t_i$  à un instant  $t_{i+1}$ . Vu la taille du maillage utilisée (5 pixels) et la résolution spatiale du système optique (6.1  $\mu\text{m}/\text{pixel}$ ), les champs de déformations calculés décrivent la variation de distance entre les grains: la déformation volumétrique positive s'interprète alors comme un écartement des grains tandis que la déformation volumétrique négative comme un resserrement

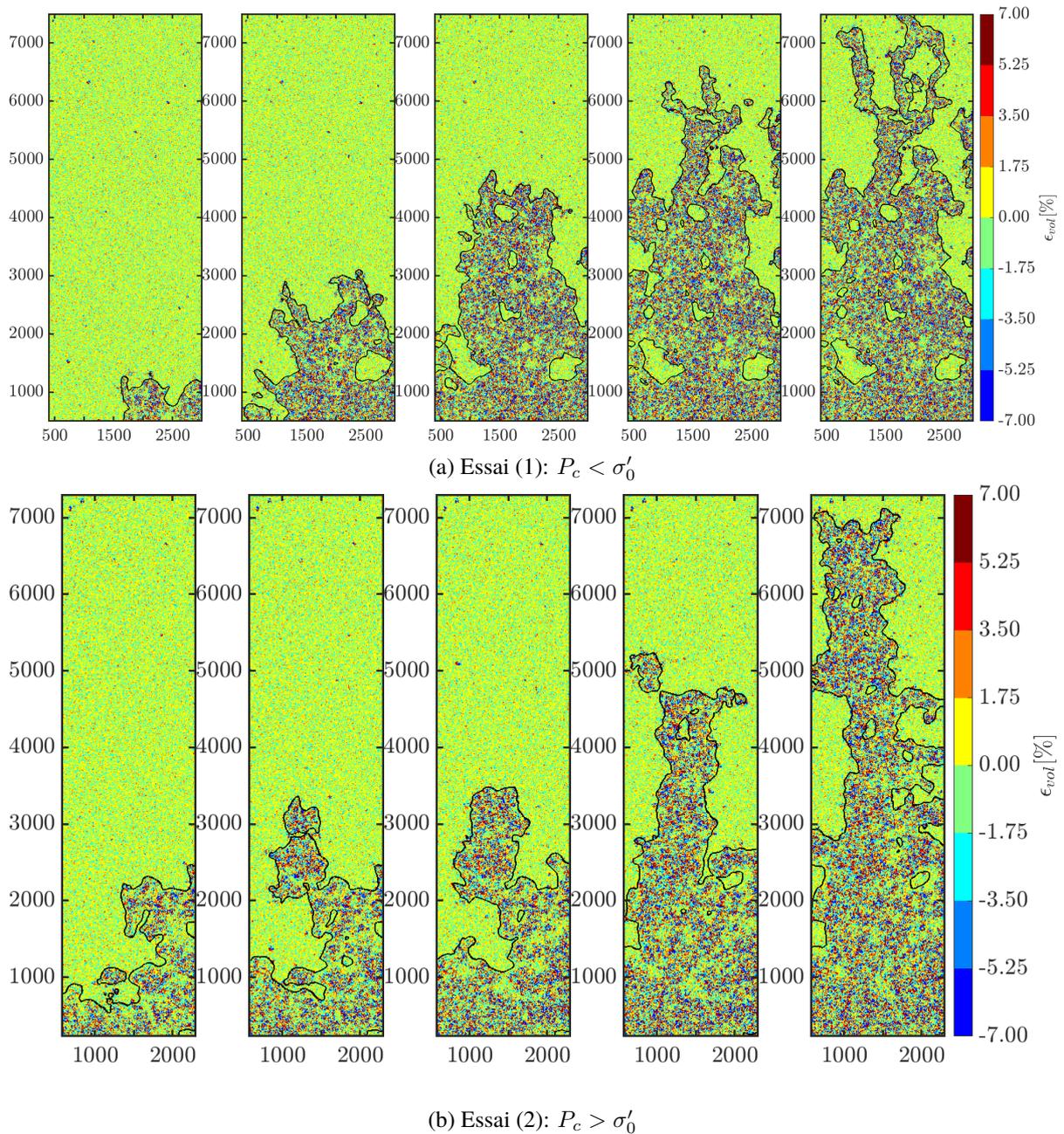


Figure 3: Champs de déformations volumétriques en fonction du temps pour les deux essais. Le pas de temps considéré pour l'essai (1) est  $1/3s$ , pour l'essai (2) est  $2/3s$ .

des grains.

Pour comprendre l'effet des paramètres macroscopiques liés au chargement hydro-mécanique sur le comportement macroscopique de la matrice granulaire, une moyenne de déformation volumétrique à l'intérieur du doigt ainsi qu'une moyenne des déformations volumétriques positives et sa valeur absolue pour les déformations négatives sont calculées et présentées dans la Figure 4. En plus, la fréquence des éléments ayant des déformations volumétriques positives et celle des déformations volumétriques négatives à l'intérieur du doigt sont aussi illustrées sur la Figure 4. L'évolution temporelle des moyennes de déformations volumétriques suivant leurs signes, montre qu'elles sont égales durant la nucléation de doigt alors que la moyenne globale dans le doigt indique une déformation positive dans les deux cas mais

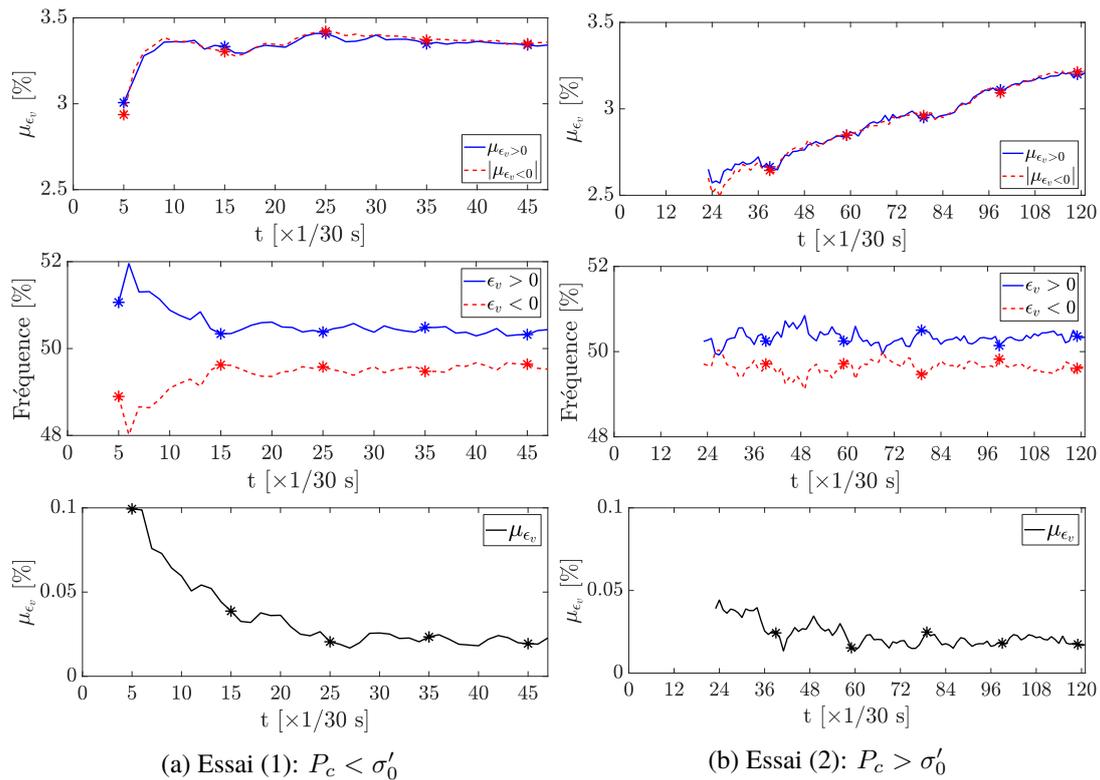


Figure 4: Etude macroscopique des déformations volumétriques dans le doigt pour les deux essais. Les instants des cartes de déformations présentées dans la Figure 3 sont marqués par \*. Le repère 0 des axes des abscisses correspond à l'instant quand le gaz pénètre dans l'échantillon.

plus évidente et avec une pente plus pointue dans l'essai (1) que dans l'essai (2). Ce résultat est confirmé par la présence dominante des éléments à déformations positives sur les négatives. On peut déduire aussi que plus la contrainte effective initiale est élevée, plus la déformation initiale est importante et plus la décroissance est remarquable. Cela paraît indiquer que la déformation macroscopique est proportionnelle au chargement mécanique initiale.

## 4 Conclusions

Dans cet article, les effets de la réponse hydro-mécanique couplée dans un milieu granulaire ont été étudiés en utilisant une nouvelle machine biaxiale conçue pour les milieux partiellement saturés. Le traitement des images acquises pendant un processus de drainage, par la méthode de corrélation d'images numériques, a permis d'identifier une localisation de déformations à l'intérieur de la zone intéressée par la présence de l'instabilité hydraulique et un réarrangement granulaire plus important lorsque le chargement mécanique l'est aussi. Cette interprétation nécessite plus d'essais afin que ce soit validée.

## References

- [1] Lenormand, Roland, Liquids in porous media, Journal of Physics: Condensed Matter, 2.S, (1990) SA79.
- [2] Ozturk, D. and Sandnes, B., A study of three-phase fracturing in granular media using high-speed imaging, Journal of Porous Media, 22.8, (2019) 987-1000.

- 
- [3] Holtzman, Ran and Szulczewski, Michael L and Juanes, Ruben, Capillary fracturing in granular media, *Physical review letters*, 108.26 (2012): 264504.
- [4] Li, S and Dong, M and Li, Z and Huang, S and Qing, H and Nickel, E, Gas breakthrough pressure for hydrocarbon reservoir seal rocks: implications for the security of long-term CO<sub>2</sub> storage in the Weyburn field, *Geofluids*, 5.4 (2005) 326-334.
- [5] Skurtveit, Elin and Aker, Eyvind and Soldal, Magnus and Angeli, Matthieu and Wang, Zhong, Experimental investigation of CO<sub>2</sub> breakthrough and flow mechanisms in shale, *Petroleum geoscience*, 18.1 (2012) 3-15.
- [6] Boulin, PF and Bretonnier, P and Vassil, V and Samouillet, A and Fleury, M and Lombard, JM, Sealing efficiency of caprocks: Experimental investigation of entry pressure measurement methods, *Marine and Petroleum Geology*, 48 (2013) 20-30.
- [7] Al Nemer, Rana and Sciarra, Giulio and Réthoré, Julien, Drainage instabilities in granular materials: a new biaxial apparatus for fluid fingering and solid remodeling detection, *Frontiers in Physics*, (2022) 202.
- [8] Head, Kenneth H, *Manual of soil laboratory testing, Volume 3: effective stress tests.. ed. 2*, John Wiley and sons, (1998).
- [9] Sutton, Michael A and Orteu, Jean Jose and Schreier, Hubert, *Image correlation for shape, motion and deformation measurements: basic concepts, theory and applications*, Springer Science & Business Media, (2009).