

Percolation de gaz à travers un milieu granulaire initialement saturé : suivi spatio-temporel de l'interface et de la réponse mécanique

Rana AL NEMER

Nantes Université, Ecole Centrale Nantes, CNRS, GeM, UMR 6183, F-44000 Nantes, France

RESUME L'accélération de la transition énergétique s'appuie largement sur les sources d'énergie renouvelables et sur le stockage de l'excès de cette énergie en sous sol. Cependant, lors des opérations d'injection ou de soutirage, les écoulements biphasiques qui se manifestent peuvent devenir instables et menacer l'intégrité du réservoir. Ces phénomènes impliquent différents couplages (thermo-chemo-hydro-mécanique) et sont complexes à traiter. Cette étude examine, à l'échelle du laboratoire, l'écoulement instable d'un gaz à travers un matériau granulaire initialement saturé, en se concentrant sur le couplage hydro-mécanique. L'impact de cette instabilité hydraulique sur une squelette solide qui subit un chargement mécanique est une nouveauté dans le domaine. Une nouvelle et unique machine biaxiale a été conçue afin de générer cet écoulement instable et en parallèle filmer cette infiltration grâce à la conception originale du dispositif ainsi qu'au système optique de haute résolution mis en place. Le recours à la méthode de corrélation d'images numériques et le développement d'une nouvelle approche pour la détection de l'interface sont les clés pour extraire les données pertinentes. Ainsi, les résultats obtenus révèlent une corrélation entre la propagation de la digitation et les déformations générées. La déformation volumétrique moyenne calculée à l'intérieur du doigt indique une dilatation du milieu lors du drainage.

Mots-clefs drainage, chargement hydro-mécanique, digitation, déformations localisées, corrélation d'images numériques

I. INTRODUCTION

Les écoulements biphasiques immiscibles dans les géo-matériaux sont au cœur de plusieurs applications allant de la stabilité des sols dunaires au stockage géologique de fluides ; ce dernier est sans doute l'une des solutions primordiales pour accélérer la transition énergétique, que ce soit grâce à la séquestration du CO_2 ou au stockage du CH_4 , H_2 produits à partir des sources d'énergie renouvelables (Raad et al. 2022). Lors des opérations d'injection ou de soutirage des fluides à partir de leurs réservoirs souterrains ou même lors des cycles naturels des marées, les écoulements biphasiques (infiltration de gaz dans un milieu initialement saturé ou imbibition d'un milieu initialement partiellement saturé) qui s'installent peuvent être de nature instable et causer des dégâts importants (érosion côtière (Sassa & Watabe 2007), perte d'étanchéité des réservoirs souterrains et déclenchement d'une activité sismique due à la réactivation des failles (Mazzoldi et al. 2012)...).

Depuis les années 80, la communauté scientifique s'est surtout intéressée à comprendre l'écoulement relatif entre deux fluides non-miscibles à travers des milieux poreux rigides. Leur investigation concerne principalement les motifs de déplacements à l'échelle centimétrique, leurs paramètres de pilotages et les mécanismes sous-jacents se produisant à l'échelle des pores. A partir des expérimentations sur des cellules Hele-Shaw qui consistent à injecter et filmer l'infiltration d'un fluide

dans une monocouche de grains saturée par un autre fluide et confinée entre deux plaques transparentes, trois régimes (stable, digitation visqueuse, digitation capillaire) ont été identifiés et représentés sur un diagramme de phase, connu sous le nom de diagramme de Lenormand (Lenormand & Zarcone 1989), en fonction de deux paramètres non dimensionnels : le nombre de capillarité Ca qui prend en compte le rapport entre les forces visqueuses et capillaires et le rapport de viscosité M entre les deux fluides en place. Les conditions qui déclenchent la naissance des digitations décrits par des chemins préférentiels très localisés, varient selon qu'il s'agisse de processus de drainage ou d'imbibition. Dans cet article, on s'intéresse au processus de drainage qui consiste à injecter un fluide non-mouillant (par exemple l'air) dans un milieu poreux saturé par un fluide mouillant (par exemple l'eau) (Zhao et al. 2016). Les régimes instables du drainage sont obtenus soit lorsque le taux d'injection est très élevé, soit lorsque le rapport de viscosité entre le fluide en défense et le fluide injecté est trop faible (voir (Guo & Aryana 2019)). Ces parcours de digitation sont pilotés par des événements locaux qui se manifestent à l'échelle des pores. Le milieu poreux constitué d'un réseau de pores et de constriction, est souvent drainé par des séquences d'invasion de type piston au niveau des constriction et de sauts de Haines au passage des constriction vers les pores (pour plus de détails, voir (Al Nemer 2023)).

Pourtant, l'écoulement de gaz dans un processus de drainage implique divers types de couplages, notamment le couplage hydro-mécanique qui suscite notre intérêt. L'interaction entre cet écoulement instable et le milieu poreux percolé reste mal expliquée en termes de déformation d'un squelette solide chargée mécaniquement. (Campbell et al. 2017) ont quantifié le réarrangement granulaire provoqué par l'injection ponctuelle de l'air à débit contrôlé dans une cellule Hele-Shaw remplie d'une couche fine de billes de verre initialement saturée d'eau, en utilisant l'approche de la vélocimétrie par image de particules. Également, Eriksen et al. (2015) ont fourni, en utilisant la méthode de corrélation d'images numériques (CIN), des cartes de déformations volumétriques des billes de verre dues à l'injection ponctuelle de l'air par pression capillaire contrôlée. Cependant dans ces travaux précédents, le couplage hydro-mécanique est absent; les essais de drainage ont été conduits sans prendre en compte le chargement mécanique. De plus, la digitation observée est influencée par l'injection ponctuelle plutôt que d'être uniquement obtenue par la déstabilisation d'un front homogène. Dans notre étude, une nouvelle machine biaxiale adaptée au milieu partiellement saturée a été conçue afin (i) d'investiguer les percolations hétérogènes d'un écoulement de gaz issu d'une injection uniforme, à travers un échantillon de sable 2D sous un chargement mécanique donné et (ii) d'assurer, grâce à un système optique de haute résolution, un suivi spatio-temporel de la propagation de l'interface et de son effet sur la réponse mécanique du milieu granulaire. Vu l'originalité du dispositif expérimental, la complexité du phénomène en lui-même et les larges bases de données générées, le fait d'établir une corrélation entre l'écoulement de gaz et la déformation du milieu granulaire reste difficile.

II. MATERIAUX ET METHODES

A. Machine biaxiale et système optique

L'idée de suivre l'écoulement de gaz dans un milieu granulaire sous un couplage hydro-mécanique est une première. Pour cela, une nouvelle machine biaxiale équipée d'un système optique de haute résolution, comme présenté dans la [FIGURE 1a](#), a été conçue. La machine biaxiale,

dérivée du dispositif de Bishop-Wisley, a été modifiée afin de permettre un contrôle simultané de la pression de 3 fluides différents et du chargement mécanique. Ce dernier, étant biaxial, agit sur l'axe vertical et horizontal. La pression maximale de service est de 1600 kPa. L'une des caractéristiques de ce dispositif est la présence d'un double couple de fenêtres avec leurs hublots transparents fournissant un accès direct aux surfaces de l'échantillon : le premier couple est situé sur les murs de la chambre de confinement et le deuxième se trouve en contact avec l'échantillon. Pour le système optique présenté dans la [FIGURE 1a](#), il s'agit d'une caméra de haute résolution (50 MPx) avec un objectif télécentrique ayant un grossissement de 0.75, apportant une résolution spatiale de 6.1 $\mu\text{m}/\text{pixel}$. Pour plus de détails sur le dispositif expérimental, voir (Al Nemer et al. 2022).

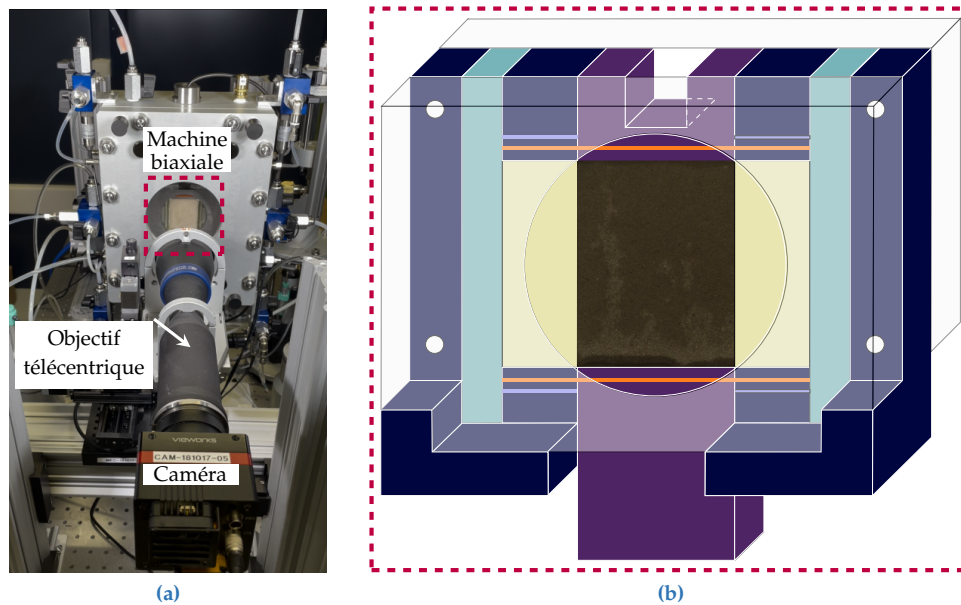


FIGURE 1. Dispositif expérimental. (a) Machine biaxiale équipée de son système optique à haute résolution et (b) schéma en 3D représentant la cellule de l'échantillon fixée à l'intérieur de la chambre de confinement comme précisé par le rectangle en pointillé ; au centre de la cellule, se trouve l'échantillon de sable, à droite et à gauche -en *jaune clair*- sont les membranes de confinement, en haut et en bas -en *aubergine*- sont les pierres poreuses et en face et au dos -en *gris clair*- les fenêtres avec un hublot en saphir chacune.

La cellule de l'échantillon, schématisée sur la [FIGURE 1b](#), est formée par l'assemblage de 6 pièces : deux blocs en *bleu marine* dont chacun tient une membrane en latex de confinement de couleur *jaune clair*, sont vissés aux deux pierres poreuses situées en haut et en bas et représentées par la couleur *aubergine*. Le rôle de ces pierres poreuses est d'assurer une distribution uniforme de fluides à l'entrée et la sortie de l'échantillon. Puis deux fenêtres en saphir représentées par la couleur *gris clair*, situées de part et d'autre de l'échantillon, sont fixées successivement : après avoir vissé la première fenêtre, le matériau qui constitue l'échantillon est versé par pluviation¹ grâce à un dispositif conçu spécifiquement pour s'adapter aux contraintes géométriques de l'échantillon, ensuite la deuxième fenêtre est fermée. La taille de l'échantillon est de 5 cm de haut, 4 cm de large

1. Pluviation est une méthode de préparation des échantillons à base de matériaux granulaires qui permet d'assurer une distribution homogène et un contrôle de la densité, grâce à la chute des grains à travers une grille perforée à partir d'une certaine hauteur.

et 1.1 cm d'épaisseur. Le matériau utilisé est le sable de Fontainebleau NE 34 ayant un diamètre moyen de 210 μm . La densité des échantillons préparés et utilisés dans la suite est gardée constante autour de 1.7 g/cm³.

B. Procédure de drainage

L'un des objectifs de cette étude est de réussir à reproduire, à l'échelle du laboratoire et de manière simplifiée, les percolations hétérogènes ayant lieu au cours de l'écoulement de gaz à travers le milieu granulaire initialement saturé en eau. Comme décrit précédemment, un chargement hydro-mécanique sera pris en compte. Tout d'abord, après avoir fixé l'échantillon à l'intérieur de la chambre de confinement et saturé les membranes latérales par de l'huile de silicone, une première charge de confinement de 45 kPa est appliquée à l'échantillon en conditions drainées. Ce chargement mécanique, agit sur la verticale de l'échantillon et se transmet simultanément à un système particulier qui l'applique latéralement à travers les membranes de confinement. Ensuite, le premier fluide « eau désaérée » est injecté du bas vers le haut de l'échantillon afin de saturer ce dernier. Pour atteindre une saturation complète, l'approche de Skempton détaillée dans (Head et al. 1998) est suivie : elle consiste à appliquer une séquence d'incrément de charge de confinement $\Delta\sigma$ de 50 kPa en conditions non drainées et à mesurer en parallèle l'évolution de la pression interstitielle ΔP_w ; à la fin de chaque incrément, la contrainte effective σ' agissant sur les grains solides et définie par la différence entre la charge de confinement et la pression interstitielle est ajustée pour être de l'ordre de 10 kPa, suite à un contrôle de la contre-pression. L'échantillon est considéré en état de saturation complète si le coefficient de Skempton B défini par le rapport entre ΔP_w et $\Delta\sigma$ s'approche de 1. Finalement, le deuxième fluide « air » placé sous une certaine pression P_g est mis en contact avec la base de l'échantillon, une fois que le robinet est ouvert. Alors, le chargement hydraulique mis en place, décrit par la pression capillaire P_{cap} qui est définie par la différence de pressions entre l'air injecté et l'eau en défense, déclenche l'écoulement de drainage. En parallèle, la percolation de l'air dans le sable « saturé » est filmée à une fréquence de 30 Hz par le système optique. Les images acquises lors d'un drainage sous une pression capillaire de 30 kPa et une contrainte effective initiale de 120 kPa sont montrées dans la [FIGURE 2](#) où la couleur sombre représente le sable qui reste saturé par l'eau et la couleur claire représente le sable désaturé par l'air injecté. Un chemin préférentiel a été généré à partir d'une couche d'air étalée sur la base de l'échantillon comme le montre le premier panel de la [FIGURE 2](#) soulignant la nucléation d'une instabilité hydraulique. Le rectangle rouge indique la région d'intérêt autour du doigt formé qui va être utilisée plus tard dans les post-traitements.

C. Analyse d'images par corrélation d'images numériques

Après avoir réussi à reproduire les instabilités hydrauliques dans un milieu granulaire qui subit un chargement mécanique, l'objectif complémentaire est de quantifier le réarrangement des grains induit par cet écoulement instable. Néanmoins, l'extraction de données quantitatives à partir de ce type d'essai, qui repose principalement sur des images acquises, n'est évidemment pas directe et nécessite le recours à des méthodes d'analyse d'images telles que la CIN. Cette approche a été utilisée comme mentionné précédemment par (Eriksen et al. 2015), sauf que l'artefact produit par l'écoulement en terme de changement de contraste, reste non traité. La CIN est basée sur l'hypo-

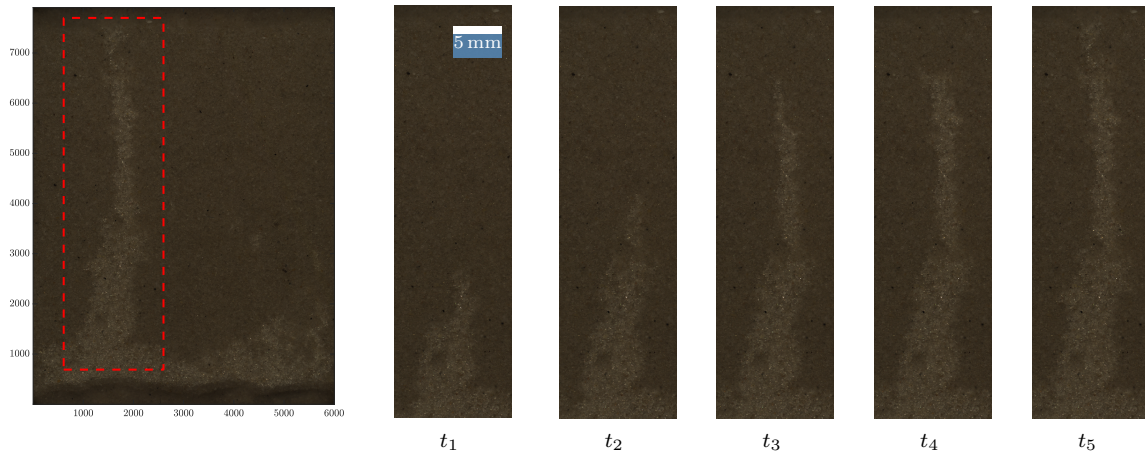


FIGURE 2. A gauche, le champ de vision filmé par le système optique est 6004×7904 pixels, et la zone délimitée par le rectangle rouge est la région d'intérêt autour du doigt formé sous une pression capillaire de 30 kPa et une contrainte effective initiale de 120 kPa. A droite, une partie de la séquence des images acquises lors de ce drainage est montrée où la couleur sombre représente le sable saturé et la couleur claire représente le sable désaturé par l'air injecté. Le pas de temps entre ces images est de 0.2s.

thèse de conservation de niveaux de gris entre l'image de référence f et l'image déformée g , traduite par l'Equation (1), afin de mesurer le champ de déplacement u .

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

D'une autre manière, un pixel ayant les coordonnées x dans l'image de référence f sera trouvé à la position $x + u$ dans l'image déformée g . Dans cette étude, un état de référence correspond à un sable totalement saturé ayant une distribution étroite de niveau de gris alors qu'un état déformé correspond à un sable partiellement saturé ayant une distribution plus étalée et modifiée par rapport à son état de référence. Le changement de niveau de gris entre l'état de référence et déformé est alors non seulement provoqué par le réarrangement granulaire mais aussi par l'infiltration de l'air. Pour cela, afin de réduire significativement l'artefact induit par la présence de l'air, une correction locale de niveaux de gris, appliquée éléments par éléments, est introduite au sein du processus itératif de l'algorithme de corrélation qui utilise l'approche globale basée sur un maillage d'éléments finis (Réthoré 2018). Le problème est alors résolu en suivant l'Equation (2) au lieu de l'Equation (1),

$$f(x) = \tilde{g}(x + \tilde{u}) \quad \text{avec} \quad \tilde{g}(x + \tilde{u}) = \mathcal{C}(g(x + \tilde{u}) - \mu_{def}) + \mathcal{B} \quad (2)$$

où $\tilde{g}$ est le niveau de gris corrigé de l'image déformée, calculé à partir du paramètre $\mathcal{C}$ corrigeant le contraste et du paramètre $\mathcal{B}$ corrigeant la brillance et μ_{def} est la valeur moyenne de niveau de gris dans chaque élément de l'image déformée g . L'idée de cette correction est de ramener la distribution de niveau de gris de l'image déformée g à celle de son état de référence (pour plus de détails voir (Al Nemer 2023)). La sortie de cet algorithme est le déplacement $\tilde{u}$ où $(\sim)$ indique la prise en compte de la correction locale de niveau de gris lors du calcul. Le champ de déformation qui va traduire la réponse mécanique, est déduit à partir du champ de déplacement obtenu et de la dérivation des fonctions de forme utilisées dans l'esprit de la méthode des éléments finis. Particulièrement,

exprimant ici les réarrangements planaires, la déformation volumétrique ϵ_{vol} est calculée comme la trace du tenseur de déformation 2D, exprimée par l'Equation (3),

$$\epsilon_{vol} = \epsilon_{xx} + \epsilon_{yy} \quad (3)$$

où ϵ_{xx} est la déformation horizontale et ϵ_{yy} est la déformation verticale.

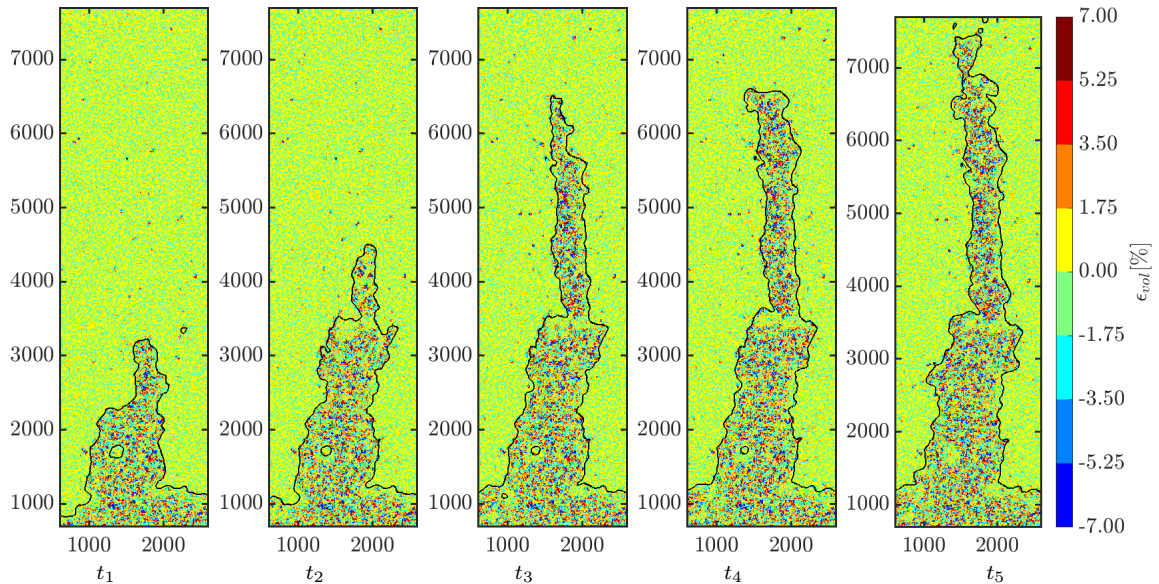


FIGURE 3. Suivi spatio-temporel de la déformation volumétrique induite par le doigt développé. La valeur négative de ϵ_{vol} correspond à une compaction alors que la valeur positive correspond à une dilatation. L'interface noire séparant la zone envahie de la zone intacte est obtenue suivant une approche détaillée dans la Section II.D.

Un suivi spatio-temporel de la réponse mécanique est fourni par les cartographies de la FIGURE 3 qui illustrent pour différents instants, l'impact du doigt formé sur la structure de la squelette solide en termes de déformations volumétriques. Les valeurs positives de ϵ_{vol} indiquent une dilatation du milieu donc un écartement des grains les uns des autres tandis que les valeurs négatives de ϵ_{vol} indiquent une compaction donc un resserrement des grains. Ces cartes montrent que la déstabilisation d'un écoulement vers un chemin préférentiel génère des déformations localisées à l'intérieur du doigt formé qui consistent en des clusters de déformations alternant entre des valeurs positives et négatives. Il convient de souligner que l'ordre de grandeur de ces déformations dépasse largement les incertitudes de mesure dues à la stabilité du système optique et à la variation du contraste, qui sont estimées à 0.31 % (Al Nemer et al. Accepted in 2024a).

D. Nouvelle approche pour la détection automatique de l'interface

Afin de compléter cette analyse et apporter davantage d'investigation inédite, la détection de l'interface séparant la zone saturée de la zone non-saturée est incontournable, bien que cela soit un véritable défi. Les approches courantes pour la détection de l'interface se basent soit sur la segmentation d'images à partir d'un certain seuil (Méheust et al. 2002), soit sur la soustraction des niveaux de gris entre une image déformée et une image de référence (Ozturk & Sandnes 2019). La première

approche nécessite la présence d'un fort contraste entre les deux zones à segmenter pour aboutir, cependant les images acquises montrées dans la FIGURE 2 se caractérisent par un faible contraste entre la zone envahie et la zone intacte. D'autre part, la deuxième approche néglige le fait que le passage du front engendre des réarrangements granulaires et donc, la détection de l'interface à partir de la soustraction des niveaux de gris n'est pas une approche fiable. De plus, à l'issue de ces deux processus, l'interface détectée est représentée dans l'état déformée ce qui impose un travail additionnel pour la représenter dans la configuration de référence. Pour s'affranchir de ces points de faiblesse cités ci-dessus, une nouvelle approche qui permet non seulement une détection automatique de l'interface mais aussi sa représentation dans la configuration de référence est développée. A titre d'illustration, un exemple correspondant à un instant de temps t montre les différentes étapes suivies pour la détection de l'interface dans la FIGURE 4; ceci est valable pour tous les instants vu que ce processus est automatisé. Tout d'abord, les images déformées brutes (FIGURE 4a) à faible

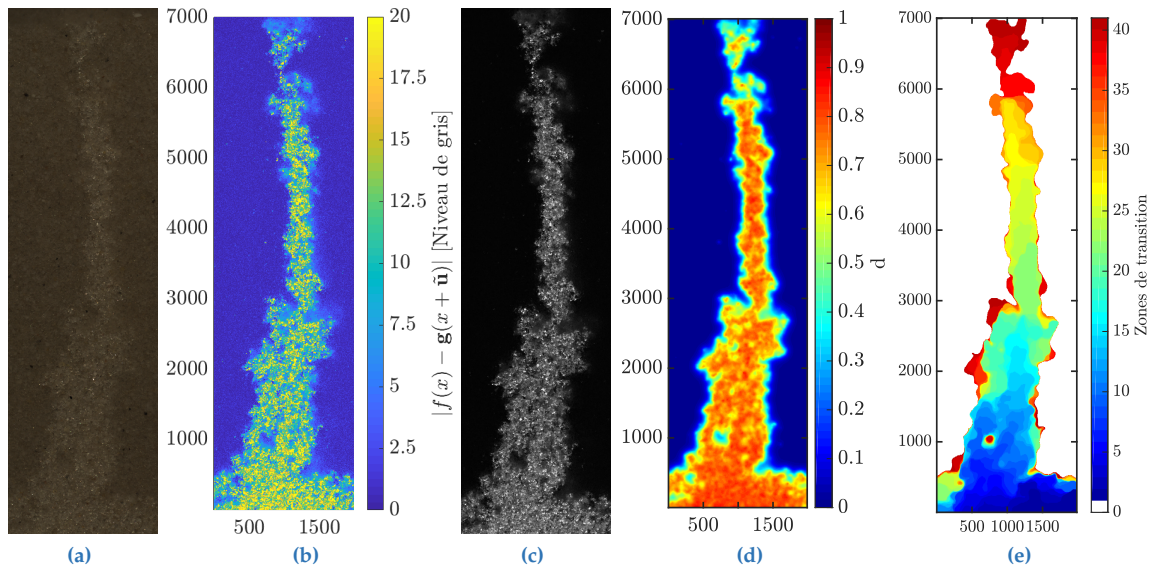


FIGURE 4. Séquence d'étapes à suivre pour extraire l'historique des interfaces au cours du drainage : (a) l'image brute, (b) la carte de résidu de corrélation, (c) l'image contrastée, (d) la carte de sortie de l'algorithme de détection de l'interface où une valeur de $d=0.25$ est sélectionnée afin de définir l'interface pour chaque instant et (e) la carte montrant le suivi temporel des zones de transition déduite à partir des interfaces qui sortent de l'étape (d).

contraste sont remplacées par des cartes de résidu de corrélation ϵ_{corr} (FIGURE 4b) calculées par l'équation suivante :

$$\epsilon_{corr} = |f(x) - g(x + \tilde{u})| \quad (4)$$

Il s'agit de faire la différence de niveaux de gris bruts entre l'image de référence f et celle déformée g , tout en prenant en compte le réarrangement granulaire décrit par le déplacement $\tilde{u}$ calculé précédemment dans la Section II.C. Avec cette astuce, la nouvelle image obtenue est représentée dans la configuration de référence et avec quelques exécutions basées sur l'algorithme K-means, elle devient contrastée davantage (FIGURE 4c). Ensuite, la séquence d'images contrastées alimente un algorithme robuste à base d'éléments finis qui a été développé en se basant sur les travaux de (Mumford & Shah 1989) portés sur la segmentation d'images et de (Ambrosio & Tortorelli 1992)

portés sur la détection des discontinuités en considérant une certaine régularisation. En résumé, un paramètre d'ordre d est introduit pour détecter la zone de discontinuité qui dans notre cas est la zone de saturation partielle. Plus de détails dans (Al Nemer et al. Submitted in 2024b). La sortie de cet algorithme est une carte de d représentant les iso-contours pour chaque instant t ; une valeur de $d = 0.25$ est choisie pour définir l'interface. Finalement, l'ensemble des interfaces détectées au cours du phénomène de drainage permet de générer une nouvelle carte qui résume l'ensemble des zones de transition définies entre deux interfaces consécutives (FIGURE 4e).

III. DISCUSSIONS

Après avoir adapté la méthode de corrélation d'images numériques pour quantifier la déformation du milieu granulaire et après avoir développé une nouvelle approche pour la détection automatique de l'interface, la combinaison de ces deux développements donne naissance à une investigation très fine et inédite sur l'interprétation du phénomène de percolation instable et de son impact sur la déformabilité de la squelette solide. Par exemple, en regardant l'effet de cette infiltration sur la déformation volumétrique moyenne à l'intérieur de chaque zone envahie, comme illustré dans la FIGURE 5, on remarque que la digitation induit une déformation volumétrique positive en moyenne, indiquant une dilatation du milieu qui est plus importante au début du processus qu'à la fin, c'est-à-dire à la base du doigt qu'à sa pointe.

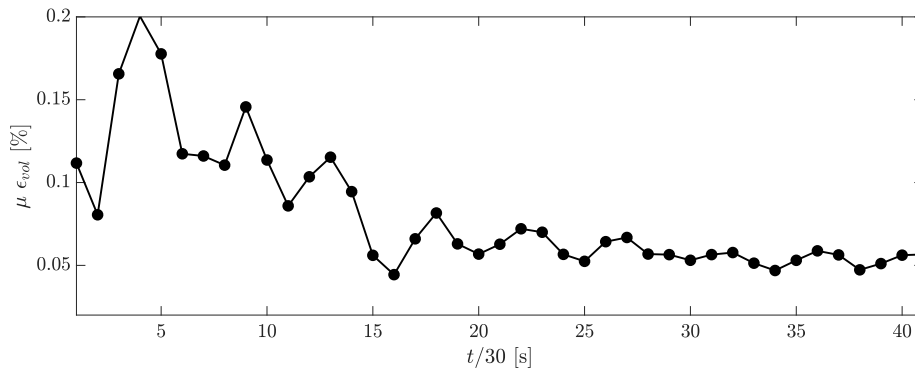


FIGURE 5. Évolution de la moyenne de la déformation volumétrique calculée à l'intérieur de la zone envahie au cours du processus d'invasion.

D'autre part, si on considère les zones de transition présentées dans la FIGURE 4e et on calcule pour un instant t , par exemple le temps de percée², la moyenne de la déformation volumétrique dans chaque zone de transition, on arrive à déterminer le comportement des différentes zones qui constituent le doigt et à vérifier si une corrélation existe. La FIGURE 6 représente l'évolution de cette moyenne sur les 41 zones de transitions. On remarque que les zones de transitions à la base du doigt sont caractérisées par une valeur positive de la déformation volumétrique, confirmant l'ouverture du milieu à cet endroit, suivie d'une alternance entre valeurs positives et négatives décrivant une succession de zones ou de bandes compactées et dilatées.

2. Le temps de percée (*breakthrough time*) est l'instant auquel le fluide injecté touche la borne supérieure de l'échantillon.

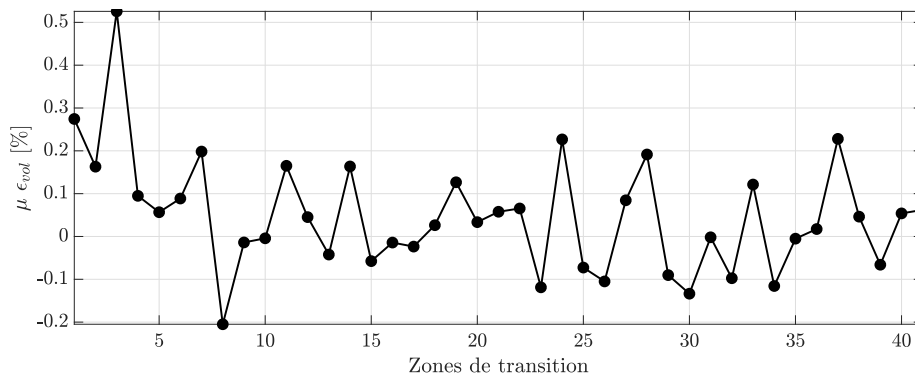


FIGURE 6. Évolution de la moyenne de la déformation volumétrique calculée à l'intérieur de chaque zone de transition, correspondant au temps de percée.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

La génération d'un écoulement instable à travers un échantillon à base de matériaux granulaires a été obtenue grâce à deux éléments primordiaux : (i) le système de pluviation développé qui a reçu l'accord pour une étude de brevetabilité et (ii) la machine biaxiale conçue spécifiquement pour les milieux partiellement saturés soumis à des chargements mécaniques. Dans cette étude, l'accent a été particulièrement mis sur un essai de drainage sous un chargement mécanique donné, afin de mettre en lumière les post-traitements requis pour l'extraction et l'interprétation des données implicites à partir des images acquises. L'investigation sur l'écoulement instable de gaz et son effet sur le remodelage de la squelette solide a nécessité l'attribution d'une attention particulière à la méthode de corrélation d'images numériques et le développement d'une approche adaptée pour le suivi de l'interface. Ainsi, le suivi spatio-temporel de l'interface et de la réponse mécanique a abouti à des résultats originaux :

- La localisation de l'écoulement génère des déformations localisées qui peuvent être précurseurs d'instabilités macroscopiques au niveau d'un réservoir de stockage telles que la compaction/gonflement de la surface, réactivation de failles, etc.
- Dans le cas de drainage, phénomène qui se manifeste lors d'injection de fluide (CO_2 , CH_4) en sous-sol, une dilatation du milieu est attendue.
- À l'échelle de la digitation formée, une formation de zones compactées et dilatées successives le long de doigt caractérise ce type d'infiltration.

Il est important de souligner que ces analyses ont été effectuées sur plusieurs couples de chargements hydro-mécaniques. En perspective, une étude de drainage sur un matériau plus fins que le sable pourra mettre en lumière d'autre réponse mécanique telle que la fissuration.

Références

Al Nemer, R. (2023), Effect of two-phase fluid percolation on remodeling of geo-materials, Theses, École centrale de Nantes.

URL: <https://theses.hal.science/tel-04353684>

- Al Nemer, R., Réthoré, J. & Sciarra, G. (Accepted in 2024a), 'Quantification of localized strains induced within a granular medium by a bi-phasic flow via digital image correlation', *Strain*.
- Al Nemer, R., Réthoré, J. & Sciarra, G. (Submitted in 2024b), 'Robust detection of a bifurcated bi-phasic interface propagating through a granular medium & characterization of the interface : physically and morphologically', *Experiments in Fluids*.
- Al Nemer, R., Sciarra, G. & Réthoré, J. (2022), 'Drainage instabilities in granular materials : a new biaxial apparatus for fluid fingering and solid remodeling detection', *Frontiers in Physics* p. 202.
- Ambrosio, L. & Tortorelli, V. M. (1992), 'On the approximation of free discontinuity problems', *Bollettino dell'Unione Matematica Italiana* 7 pp. 105–123.
- Campbell, J. M., Ozturk, D. & Sandnes, B. (2017), 'Gas-driven fracturing of saturated granular media', *Physical Review Applied* 8(6), 064029.
- Eriksen, F. K., Toussaint, R., Måløy, K. J. & Flekkøy, E. G. (2015), 'Invasion patterns during two-phase flow in deformable porous media', *Frontiers in Physics* 3, 81.
- Guo, F. & Aryana, S. A. (2019), 'An experimental investigation of flow regimes in imbibition and drainage using a microfluidic platform', *Energies* 12(7), 1390.
- Head, K. H. et al. (1998), *Manual of soil laboratory testing. Volume 3 : effective stress tests.*, number Ed. 2, John Wiley & Sons, Chichester, UK.
- Lenormand, R. & Zarcone, C. (1989), 'Capillary fingering : percolation and fractal dimension', *Transport in porous media* 4(6), 599–612.
- Mazzoldi, A., Rinaldi, A. P., Borgia, A. & Rutqvist, J. (2012), 'Induced seismicity within geological carbon sequestration projects : Maximum earthquake magnitude and leakage potential from undetected faults', *International journal of greenhouse gas control* 10, 434–442.
- Méheust, Y., Løvoll, G., Måløy, K. J. & Schmittbuhl, J. (2002), 'Interface scaling in a two-dimensional porous medium under combined viscous, gravity, and capillary effects', *Physical Review E* 66(5), 051603.
- Mumford, D. B. & Shah, J. (1989), 'Optimal approximations by piecewise smooth functions and associated variational problems', *Communications on pure and applied mathematics*.
- Ozturk, D. & Sandnes, B. (2019), 'A study of three-phase fracturing in granular media using high-speed imaging', *Journal of Porous Media* 22(8).
- Raad, S. M. J., Leonenko, Y. & Hassanzadeh, H. (2022), 'Hydrogen storage in saline aquifers : Opportunities and challenges', *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 168, 112846.
- Réthoré, J. (2018), 'Ufreckles', URL <https://doi.org/10.5281/zenodo.1433776>.
- Sassa, S. & Watabe, Y. (2007), 'Role of suction dynamics in evolution of intertidal sandy flats : Field evidence, experiments, and theoretical model', *Journal of Geophysical Research : Earth Surface* 112(F1).
- Zhao, B., MacMinn, C. W. & Juanes, R. (2016), 'Wettability control on multiphase flow in patterned microfluidics', *Proceedings of the National Academy of Sciences* 113(37), 10251–10256.