



MASTER SCIENCE DE LA MATIÈRE
École Normale Supérieure de Lyon
Université Claude Bernard Lyon 1

Stage 2023–2024
Camille PORCEILLON
M2 Physique, Concepts et Applications

Migration de fluide dans des sédiments : influence des interfaces

Résumé : *Les bassins sédimentaires sont de très vastes zones situées au fond des océans, où s'accumulent diverses particules dues au transport et au dépôt de grains érodés et de pluies pélagiques, y compris de la matière organique. Sous l'effet de réactions bio-physico-chimiques, ces couches de plusieurs kilomètres d'épaisseur génèrent de grandes quantités de gaz et de liquides. Ces fluides migrent ensuite à travers les couches sédimentaires, jusqu'au fond de la mer. Ces structures peuvent mettre en péril les activités anthropiques, notamment les fibres optiques transocéaniques pour les télécommunications ou les ressources offshore. Malgré les progrès de l'imagerie sismique au cours des dernières décennies, les techniques les plus récentes sont incapables de capturer la dynamique de ces structures. Des expériences en laboratoire permettent de modéliser et de caractériser la migration d'un fluide à travers un milieu granulaire multicouche immergé. Le liquide est injecté localement à la base des grains immergés, confinés dans une cellule de Hele-Shaw. Nous considérons soit une monocouche, soit une bicouche et nous faisons varier la granulométrie, le débit d'injection et la hauteur du lit de grains. Dans une gamme donnée de paramètres expérimentaux, des instabilités surprenantes peuvent être observées, telles que l'émergence d'un schéma de fluidisation périodique, qui fait l'objet de ce stage.*

Mots clés : *écoulements multiphasiques ; milieux granulaires ; suspensions ; interfaces ; applications géophysiques*

Stage encadré par :

Valérie Vidal

valerie.vidal@ens-lyon.fr

Laboratoire de Physique, ENS de Lyon
46 allée d'Italie, 69007 Lyon

<https://www.ens-lyon.fr/PHYSIQUE>

Aurélien Gay

aurelien.gay@umontpellier.fr

Géosciences Montpellier, Université de Montpellier
Place Eugène Bataillon, 34090 Montpellier

<https://www.gm.umontpellier.fr>



UNIVERSITÉ DE
MONTPELLIER

30 juin 2024

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier Valérie Vidal pour m'avoir donné l'opportunité de faire ce stage sous son encadrement, merci aussi pour les différentes discussions que nous avons eues et les relectures et conseils sur ce rapport ! Je tiens également à remercier Aurélien Gay (à Géosciences Montpellier) pour les diverses discussions que nous avons eues en visio et en vrai, pendant une visite à Montpellier pendant le mois de mai. À l'occasion, j'ai pu entre autres présenter et discuter de mes résultats avec Alfredo Taboada et visiter le laboratoire, avec Aurélien et Stéphane Dominguez. Enfin, merci à Sylvain Joubaud, Benjamin Monnet et Sasha Perez pour les petites réunions d'équipe du lundi, riches en questions et réflexions :)

Table des matières

1	Introduction	1
1.1	Contexte géologique et enjeux	1
1.2	Travaux précédents et premières observations	2
1.3	Objectifs du stage	5
2	Dispositif expérimental	5
2.1	Présentation du dispositif	5
2.1.1	Cellule de Hele-Shaw	5
2.1.2	Fluide utilisé	6
2.1.3	Grains utilisés	6
2.1.4	Protocole expérimental	6
2.2	Expériences menées	7
3	Premières observations et analyse d'images	8
3.1	En milieu granulaire bicouche	8
3.2	En milieu granulaire monocouche	9
4	Résultats	9
4.1	En bicouche	10
4.1.1	Variation de la hauteur de petits grains h_{PG}	10
4.1.2	Variation de la porosité de la couche de gros grains h_{GG}	10
4.1.3	Variation du débit d'injection Q	11
4.2	En monocouche	12
4.2.1	Espacement des sources secondaires	12
4.2.2	Champ des vitesses dans l'eau	13
4.2.3	Variation de la hauteur de la couche de grains h_g	15
5	Conclusions et perspectives	16
	ANNEXES	20
A	Granulométrie détaillée	20
B	Mesure de compacité	21
C	Profil de vitesse du fluide dans les grains en monocouche	23

1 Introduction

1.1 Contexte géologique et enjeux

Les bassins sédimentaires sont de très grandes zones situées au fond des océans, où de nombreuses particules s'accumulent à cause du transport et du dépôt de grains, dont de la matière organique (Gay et Migeon, 2017; Gay et Vidal, 2022). Grâce à des processus bio-physico-chimiques, ces empilements de sédiments de plusieurs kilomètres d'épaisseur génèrent de grandes quantités de gaz et de liquides (Hovland *et al.*, 2002; Cardoso et Cartwright, 2016; Ismail *et al.*, 2020; Xu *et al.*, 2020; Gay et Vidal, 2022). Ces fluides peuvent ensuite remonter à travers les couches de sédiments jusqu'au plancher océanique, formant des structures appelées "pipes", ou cheminées. Elles sont très reconnaissables dans les profils sismiques, où les réflecteurs (qui marquent des différences de densité) sont localement perturbés par le passage du fluide ascendant, ce qui crée une cheminée verticale (voir FIGURE 1a) (Cartwright et Santamarina, 2015; Gay et Migeon, 2017; Gay *et al.*, 2024). Sur le plancher océanique, ces structures se trahissent par l'échappement de fluide et des anomalies de topographie qui peuvent varier de quelques mètres à quelques kilomètres (Gay *et al.*, 2012), que l'on appelle des pockmarks ou des volcans de boue (voir FIGURE 1a) (Hovland *et al.*, 2002; Gay *et al.*, 2012; Cartwright et Santamarina, 2015; Gay et Migeon, 2017; Xu *et al.*, 2020; Gay et Vidal, 2022). Les pockmarks sont définies comme des dépressions concaves, semblables à des cratères (Hovland *et al.*, 2002); seul du fluide s'en échappe. Les volcans de boue, eux, forment un relief positif à cause de l'échappement d'un mélange de liquide et de boue ou de sable (Gay et Vidal, 2022).

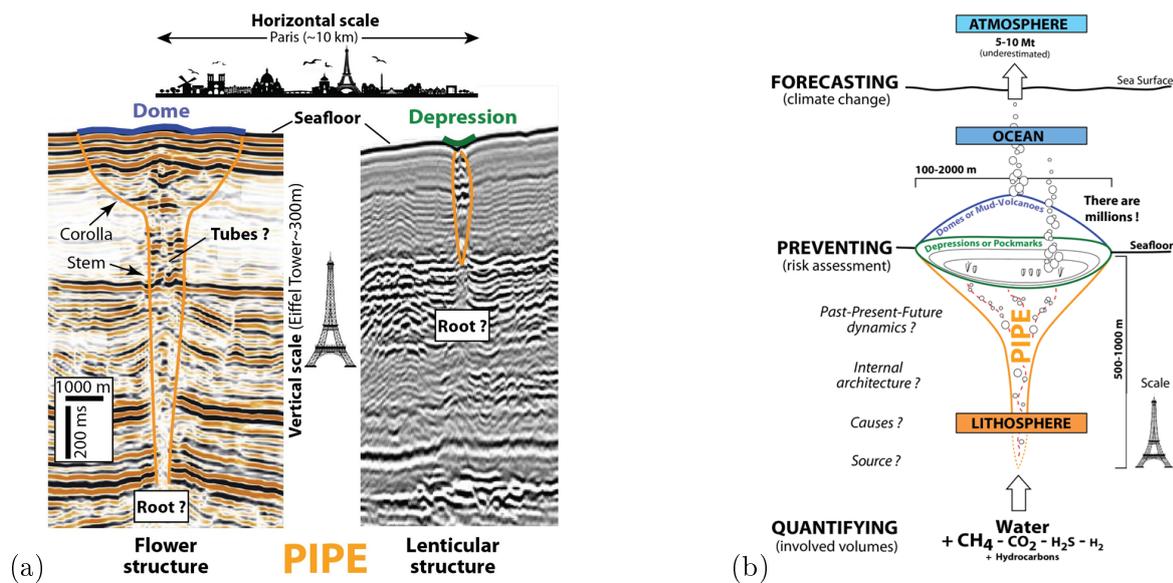


FIGURE 1 – (a) Profils sismiques montrant différentes structures de cheminées pour l'échappement de fluide (Gay et Vidal, 2022). (b) Schéma explicatif récapitulant les enjeux liés à la migration de fluide dans les bassins sédimentaires. Du point de vue physique, un bassin sédimentaire peut être assimilé à un milieu granulaire saturé en liquide (Gay et Vidal, 2022).

Comprendre l'impact de ces sorties de fluide en surface est complexe et nécessite de quantifier leur dynamique en profondeur, comme illustré en FIGURE 1b. Il y a tout d'abord des enjeux liés à l'activité anthropique (voir FIGURE 2a et b), tels que la recherche de ressources fossiles, la construction de plateformes offshore ou encore la pose de fibres optiques transocéaniques (Ismail *et al.*, 2020; Xu *et al.*, 2020; Gay *et al.*, 2024). Toutes ces activités humaines peuvent être mises en péril si elles sont localisées dans une zone de sortie de fluide, ce qui est quasi-systématiquement le cas pour les plateformes offshore puisqu'elles sont justement localisées dans les bassins sédimentaires où se trouvent les réservoirs de pétrole. Le problème qui se présente alors est le suivant : on connaît mal ces structures, et il est impossible d'aller les échantillonner directement. En effet, le seul navire scientifique à avoir tenté une expédition a fait naufrage (voir FIGURE 2c)... Enfin, il y a aussi des enjeux à l'échelle plané-

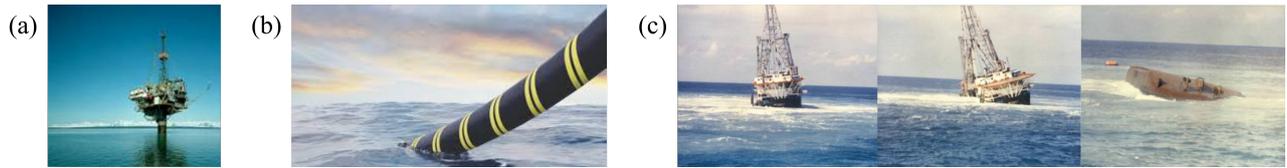


FIGURE 2 – (a) Une plateforme offshore ; (b) une fibre optique transocéanique et (c) des images du naufrage du Petromar V suite au forage d’une poche de gaz en 1981, en Mer du Chine du Sud. Images données par A. GAY.

taire : il a été montré que les trois plus grands changements climatiques de l’Histoire avaient été causés par des relargages massifs de CO_2 ou de méthane (Svensen *et al.*, 2004). Une meilleure compréhension des phénomènes à l’œuvre dans ces bassins sédimentaires permettrait de réduire certains de ces risques.

1.2 Travaux précédents et premières observations

Les échappement de fluide au niveau des bassins sédimentaires ont suscité l’intérêt des scientifiques depuis la fin du XX^e siècle, avec l’observation de pockmarks au large de l’Écosse (King et MacLean, 1970). Depuis, de nombreuses études ont été menées pour chercher à comprendre l’origine de ces dépressions ainsi que les mécanismes qui régissent l’échappement de fluide : observations de terrain, expériences en laboratoire (2D et 3D) et simulations numériques.

Malgré les progrès faits en imagerie sismique ces dernières années (Gay *et al.*, 2012; Ismail *et al.*, 2020; Yarushina *et al.*, 2022), on obtient seulement des images à l’instant t de l’acquisition. On n’a aucune information sur l’évolution dans le temps, et donc sur la dynamique de ces structures, qui pourraient évoluer sur quelques milliers à quelques millions d’années. On peut tout de même identifier globalement la nature du milieu traversé qui se présente comme une succession de couches de sédiments aux propriétés physiques variées, et certaines structures d’échappement (les cheminées). À cause de l’impossibilité de réaliser des forages dans une cheminée active à cause des risques potentiels (en SECTION 1.1), de nombreuses études expérimentales et numériques ont donc été menées pour tenter de modéliser et comprendre ce phénomène.

À l’heure actuelle, deux grandes hypothèses sont proposées pour expliquer l’origine des cheminées dans les sédiments. D’une part, la fracturation hydraulique : elle est plutôt attendue dans les roches dures et cassantes, lorsque la pression de fluide dépasse une contrainte horizontale minimum. Cela génère des structures planes (Gay et Migeon, 2017; May *et al.*, 2019; Hudec et Soto, 2021). Les fractures sont toujours connectées à un réservoir initial en profondeur, et leur orientation est contrôlée par la contrainte principale (Wandge, 2020; Yarushina *et al.*, 2022). Une hypothèse alternative, plus récente, suppose que l’auto-localisation du flux ascendant qui donne naissance à des ondes de porosité solitaires. Celles-ci sont plutôt attendues dans des matériaux mous et déformables, pour des pressions de fluides moindres (Cartwright et Santamarina, 2015). Elles produisent des conduits cylindriques qui se propagent verticalement vers le haut de manière autonome, en perdant leur connexion avec le réservoir d’origine (Räss *et al.*, 2018; Yarushina *et al.*, 2020; Yarushina *et al.*, 2022). Un exemple de simulation numérique associée à cette hypothèse est présenté en FIGURE 3. On remarque la formation de motifs périodiques lors du passage d’une couche de grains à l’autre.

Ces deux hypothèses s’appuient sur des simulations numériques et des relevés de terrain. De nombreuses études théoriques, numériques et expérimentales se sont intéressées à l’injection d’un fluide dans une matrice granulaire immergée (Shi *et al.*, 1984; Zoueshtiagh et Merlen, 2007; Philippe et Badiane, 2011; Philippe et Badiane, 2013; Cui *et al.*, 2014; Montellà *et al.*, 2016; Mena *et al.*, 2017; Mena *et al.*, 2018; Carrara *et al.*, 2020). Cependant, ces études se sont essentiellement focalisées sur la transition entre un régime de percolation, pour lequel le fluide passe dans le réseau de pores sans bouger significativement les grains, et un régime de fluidisation, dans lequel la vitesse du fluide est suffisamment

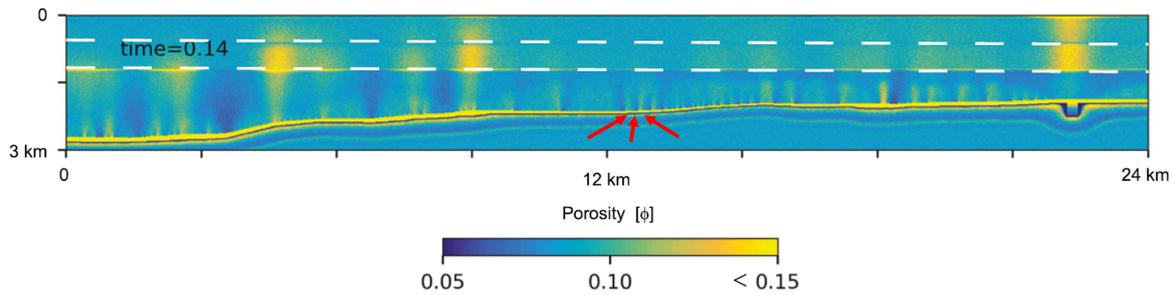


FIGURE 3 – Figure extraite de (Yarushina *et al.*, 2022) : Résultats de la simulation montrant la formation de cheminées. Les zones plus claires sont celle de porosité plus élevée, correspondant aux zones de fluidisation. Les flèches rouges indiquent un exemple de cheminées formées, bien qu'elles soient présentes tout le long de l'interface.

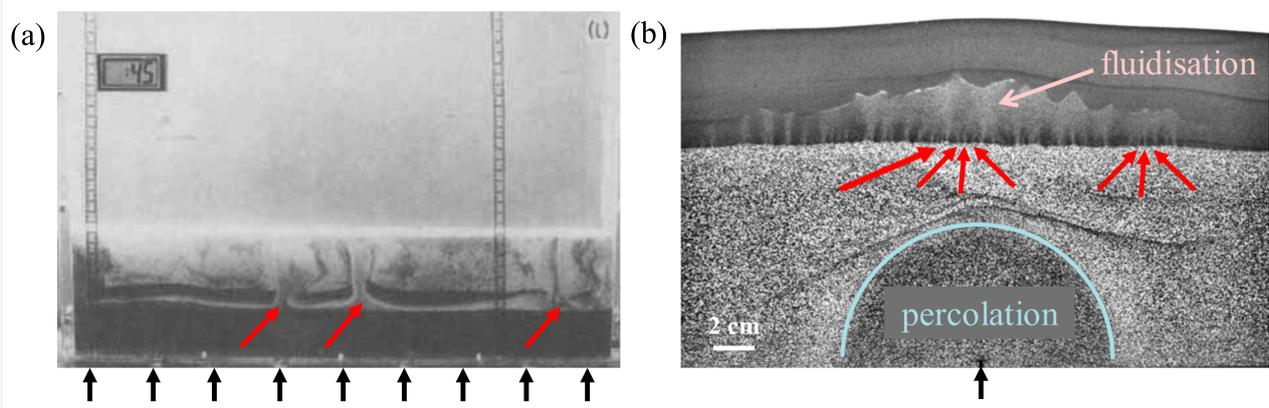


FIGURE 4 – Exemple d'apparition de motif périodique (flèches rouges) de fluidisation dans un système bicouche dans lequel on injecte du fluide par en-dessous (flèches noires). (a) Injection continue. Photo extraite de (Nichols *et al.*, 1994), à la fin de l'expérience (grains immergés). La couche de grains blancs est constituée de billes de verre de diamètre entre 74 et 125 μm . La couche supérieure (ici, elle a "coulé") est en noir, et est constituée d'une couche de 1 cm de grains en carbure de silicium, cohésifs (de diamètre entre 125 et 250 μm). (b) Injection localisée. Photo extraite du rapport de stage de L3 de G. Tangavelou (2023). La couche inférieure est constituée de billes de verre de diamètre 700 μm ; la couche supérieure (non cohésive) est elle aussi constituée de billes de verre, mais avec un diamètre compris entre 106 et 212 μm . Ici, on remarque des zones plus claires (flèche rose) qui sont dues à une augmentation de la porosité et donc à des zones "fluidisées", espacées périodiquement au niveau de l'interface (flèches rouges).

importante pour emporter les grains. Les études concernant la géométrie ou la dynamique des zones dites fluidisées sont bien moins nombreuses (Nichols *et al.*, 1994; Geistlinger *et al.*, 2006; Juanes *et al.*, 2020; Gay *et al.*, 2024), ou concernant l'injection d'air en milieu granulaire sec (Nermoen *et al.*, 2010b; Nermoen *et al.*, 2010a).

Parmi ces travaux, on en trouve encore moins qui traitent de systèmes multicouches (Nichols *et al.*, 1994) (voir FIGURE 4a). Lors du stage de L3 de Ganesh Tangavelou au laboratoire de Physique de l'ENS de Lyon en 2023 (Tangavelou, 2023), des comportements surprenants ont été observés à l'interface entre les deux couches de grains de granulométrie différentes lorsque de l'eau est injectée dans une cellule de Hele-Shaw, comme on peut le voir en FIGURE 4b : des "sources secondaires" apparaissent, ce qui ressemble fortement aux cheminées dans les sédiments, dont la racine n'est pas bien définie.

De novembre à décembre 2023, j'ai effectué mon projet expérimental de M2 sur ce sujet. Le but

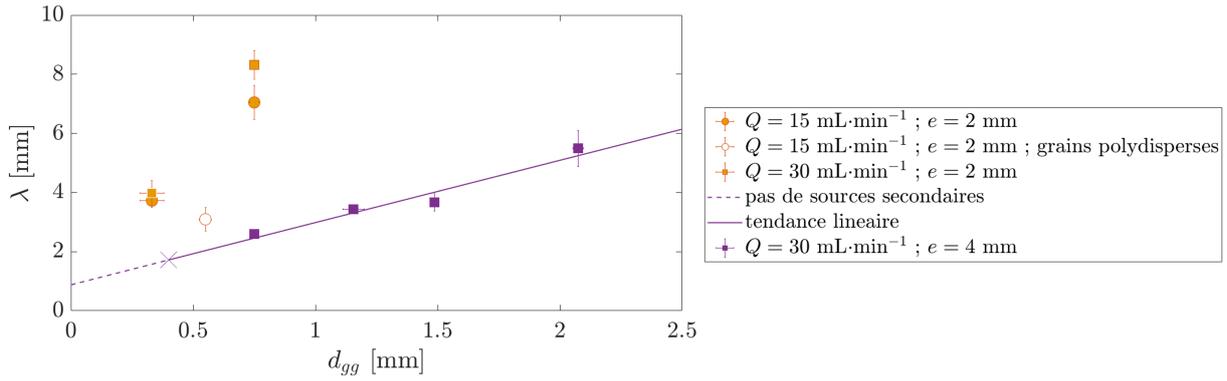


FIGURE 5 – Espacement entre les sources secondaires λ en fonction du diamètre des gros grains d_{GG} de la couche inférieure. Les points pleins correspondent aux expériences faites avec des distributions mono-disperses de gros grains ; le point vide correspond à une distribution poly-disperse. Deux débits différents ont été utilisés : $Q = 15$ ou $30 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$. Les deux cellules utilisées ont des gaps e et e' différents, mais sont identiques par ailleurs.

était de vérifier si l'espacement des sources secondaires dépendait du diamètre des grains de la couche inférieure, dans la même configuration expérimentale que pendant le stage de G. TANGAVELOU. Les résultats obtenus sont présentés en FIGURE 5. Pour un milieu bicouche avec la couche inférieure constituée de "gros grains" (dans lesquels le fluide percole) monodisperses, des sources secondaires apparaissent à l'interface entre les deux couches de grains. L'espacement λ entre les sources secondaires semble augmenter lorsque la diamètre des gros grains d_{GG} augmente (dans la cellule de gap $e' = 4 \text{ mm}$), comme on peut le voir sur la FIGURE 5. Pour la cellule de gap $e = 2 \text{ mm}$, le nombre de points expérimentaux n'est pas suffisant pour conclure mais on observe également une augmentation de λ lorsque d_{GG} augmente, ainsi qu'une faible dépendance en fonction du débit d'injection Q . On peut noter cependant que lorsque le milieu devient fortement polydisperse (point orange, symbole ouvert), λ ne suit plus la tendance croissante observée. Le diamètre des gros grains ne semble donc pas être un paramètre caractérisant l'espacement des sources secondaires. On remarque également que le débit pourrait influencer λ , mais des expériences supplémentaires sont nécessaires pour vérifier cette hypothèse.

D'autres expériences réalisées au cours de ce projet expérimental (voir FIGURE 6) ont permis de tirer des conclusions supplémentaires : tout d'abord, le flux se focalise au niveau des défauts à relief positif au niveau de l'interface GG/PG. Ensuite, on a observé un phénomène intrigant : si le fluide injecté percole dans les deux couches de grains, des sources secondaires se forment dans la poussière au-dessus du milieu granulaire, directement dans l'eau. Cette dernière observation semble indiquer qu'il n'y a pas besoin d'une interface entre deux couches granulaires pour générer ces sources secondaires, et ouvre la voie aux expériences en monocouche pour l'observation de ces sources.

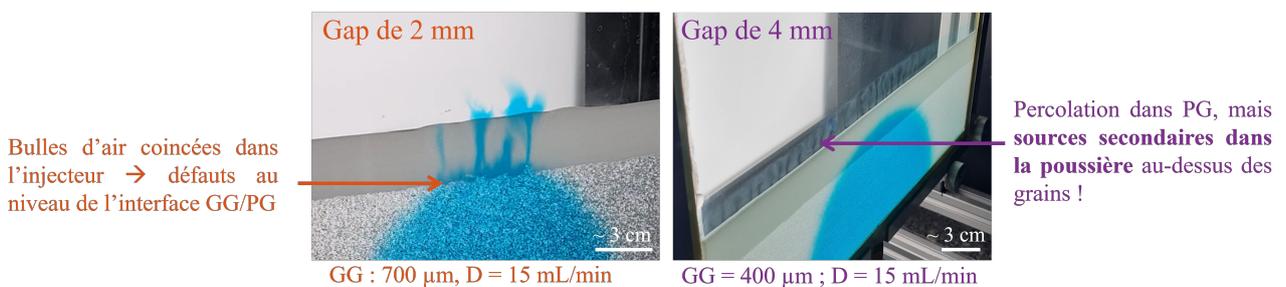


FIGURE 6 – Photos d'expériences menées au cours du projet expérimental de M2, 2023.

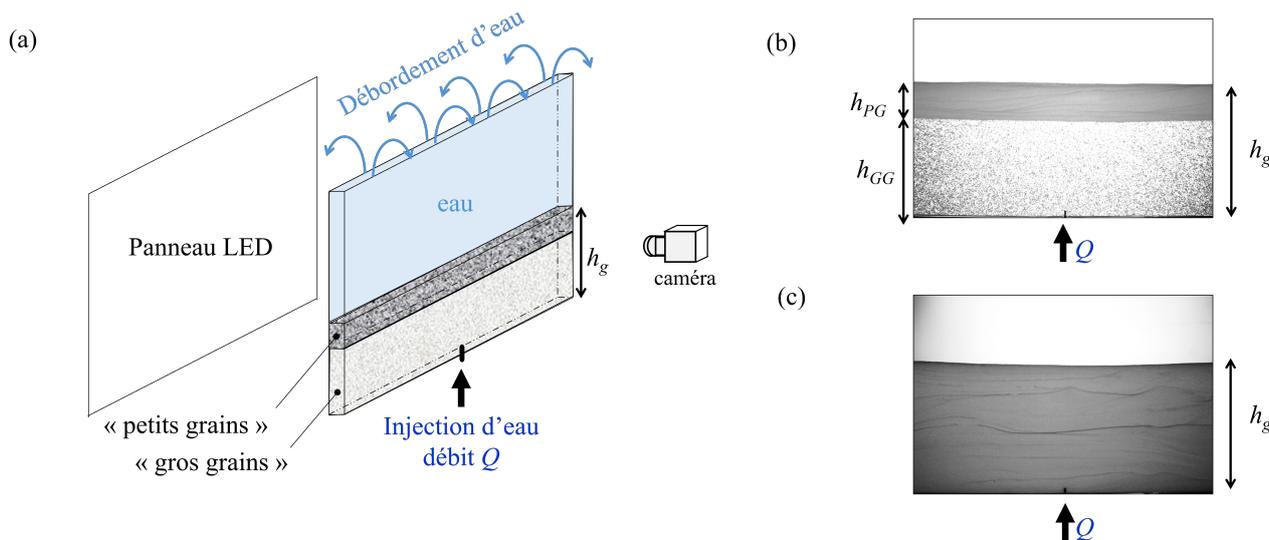


FIGURE 7 – (a) Schéma du dispositif expérimental. La cellule de Hele-Shaw est maintenue en trois points à l'aide d'un châssis. On injecte de l'eau à débit constant Q en bas au centre de la cellule. Un système de débordement permet d'avoir toujours la même quantité d'eau au-dessus du lit de grains. La hauteur totale du lit de grains est notée h_g . (b,c) Exemple d'état initial de l'expérience à $t = 0$ pour un système bicouche (b) (h_{PG} désigne la hauteur de la couche de petits grains, et h_{GG} désigne la hauteur de la couche de gros grains) et pour un système monocouche (c).

1.3 Objectifs du stage

Pendant mon stage de M2 qui a suivi, j'ai travaillé sur la remontée de liquide à travers un milieu granulaire bicouche et monocouche, constitué de billes de verre sphériques pour simplifier le problème initial du millefeuille sédimentaire. Les sédiments sont composés de particules diverses dont le diamètre varie de quelques dizaines de microns au millimètre. J'ai travaillé avec une cellule de Hele-Shaw, donc en quasi-2D, ce qui permet une observation directe de la migration du fluide à travers la ou les couche(s) granulaire(s).

Les objectifs de ce stage sont les suivants :

- caractériser les sources secondaires (espacement, vitesse de migration quand elle existe) en modifiant certains paramètres pour trouver une dépendance éventuelle, voire un modèle,
- travailler avec un milieu granulaire bicouche puis monocouche pour voir les différences et similitudes d'apparition et de caractéristiques des sources secondaires dans ces deux configurations.

Je commencerai par présenter le dispositif expérimental ainsi que le protocole utilisé pour mener les différentes expériences, puis j'expliquerai les différentes techniques d'analyse d'images qui ont été utilisées pour extraire les données présentées dans la partie présentant les résultats.

2 Dispositif expérimental

2.1 Présentation du dispositif

2.1.1 Cellule de Hele-Shaw

Afin de modéliser expérimentalement la migration de fluide à travers un milieu granulaire immergé, on utilise le dispositif expérimental présenté en FIGURE 7. Il est constitué d'une cellule de Hele-Shaw (deux plaques de verre, de 35.0 ± 0.1 cm de largeur, 30.0 ± 0.1 cm de hauteur et de gap $e = 2.35 \pm 0.02$ mm) dans laquelle on immerge des grains dans de l'eau (cf SECTION 2.1.3). Certaines expériences réalisées pendant mon projet expérimental ont été effectuées dans une autre cellule de gap

$e' = 4$ mm, de dimensions égales par ailleurs.

À la base de la cellule, du fluide est injecté au moyen d'une buse de 1.1 mm de diamètre interne grâce à une pompe¹ reliée à un contrôleur de débit², permettant d'injecter un débit constant Q (2 – 100 mL). À la base de l'injecteur, un système anti-reflux a été installé pour éviter le passage de grains dans le système d'injection.

La cellule est éclairée par un panneau lumineux³, qui dispose d'un variateur d'intensité lumineuse et qui fournit un éclairage stable et homogène. Par l'avant, on filme la cellule grâce à une caméra CMOS 1" ⁴, munie d'un objectif de focale 16 mm. Les images sont acquises via un code Matlab, pendant cinq minutes à 10 fps. Cela permet d'acquérir des images sur toute la durée du phénomène d'intérêt.

2.1.2 Fluide utilisé

Les grains sont immergés dans de l'eau distillée ($18 \text{ M}\Omega\text{-cm}^{-1}$) pour éviter toute interaction entre des minéraux et les particules, qui sont en verre. Le fluide injecté est lui aussi de l'eau distillée ($18 \text{ M}\Omega\text{-cm}^{-1}$), colorée en bleu⁵ pour pouvoir suivre la progression de l'eau injectée dans le milieu granulaire. La coloration ne modifie pas significativement la densité ni la viscosité du l'eau au point de devoir prendre en compte ces variations dans les expériences effectuées.

2.1.3 Grains utilisés

On utilise des billes de verre sphériques (sodosilicate, $\rho = 2300 \text{ kg}\cdot\text{m}^3$). Un microscope⁶ et une caméra⁷ pilotée par Matlab permettent de quantifier la distribution des tailles des différentes particules utilisées. Un programme avec reconnaissance de cercles permet de quantifier le diamètre des grains, d , dont on peut ensuite tracer les distributions. La FIGURE 8 présente deux exemples de distribution de taille pour les grains qui ont été les plus utilisés lors de nos expériences. La granulométrie détaillée pour l'ensemble des particules utilisées est donnée en ANNEXE A. Les diamètres médians sont donnés dans la TABLE 1. Dans la suite, on sera aussi amené à utiliser la compacité ϕ :

$$\phi = \frac{\text{volume occupé par les grains}}{\text{volume total}}$$

et la porosité $\epsilon = 1 - \phi$.

distribution du fournisseur (μm)	diamètre mesuré (mm)
106 – 212	0.15 ± 0.02
400	0.3 ± 0.1
425 – 600	0.55 ± 0.05
700	0.75 ± 0.04
1000	1.16 ± 0.09
1500	1.49 ± 0.03
2000	2.07 ± 0.04

TABLE 1 – Tableau récapitulatif de la granulométrie des particules utilisées.

2.1.4 Protocole expérimental

J'ai travaillé d'une part avec deux couches de grains de granulométries différentes, et d'autre part avec une monocouche de grains de même granulométrie.

1. Bronkhorst Tuthill 7.11.468
2. Bronkhorst mini CORI-FLOW M14-AAD-22-0-S
3. Just NormLicht Classic Line
4. BASLER monochrome acA2040-90um, 2048×2048 pixels
5. colorant bleu, E133 hydrosoluble, Meilleur du Chef.com à environ 1.2% en volume
6. Wild Makroskop M420 1.25 \times avec objectif Makrozoom Leica 1 :5
7. BASLER monochrome acA2440-75um, 2464×2056 pixels

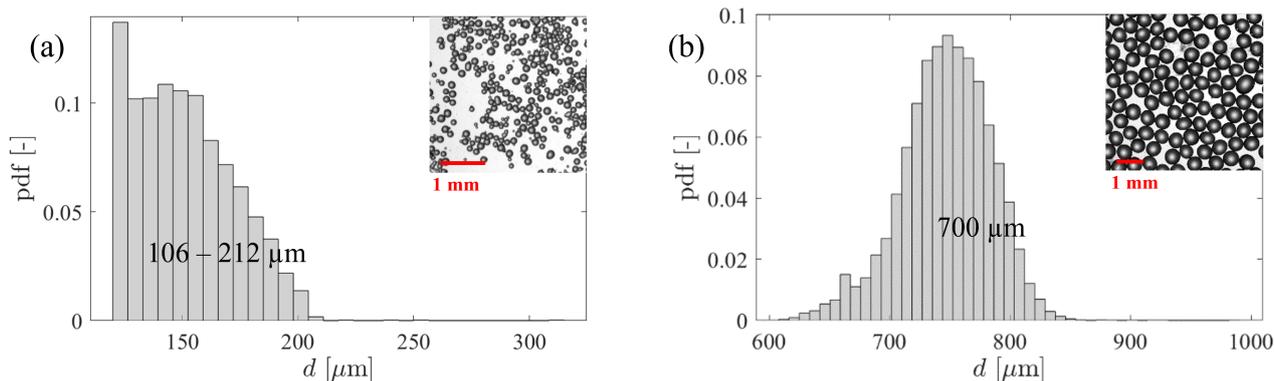


FIGURE 8 – Granulométrie des particules le plus souvent utilisées dans nos expériences. On représente ici la distribution de taille des grains d (diamètre). Les inserts montrent des photos des grains correspondants. (a) Billes de verre USF Matrasur, $106 - 212 \mu\text{m}$; (b) billes de verre Sigmund-Lindner, $700 \mu\text{m}$.

Préparation de la couche de grains : on commence par régler l'horizontalité de la cellule puis on la fixe sur le châssis. Ensuite, on remplit la cellule d'eau distillée jusqu'à atteindre une hauteur de l'ordre de la dizaine de centimètres. On veille à ce que l'eau ne ruisselle que d'un côté de la cellule pour que la surface intérieure des plaques reste sèche. À l'aide d'un entonnoir plat, on verse les grains doucement dans la cellule en faisant des allers-retour de droite à gauche pour les déposer par sédimentation sur toute la largeur de la cellule et jusqu'à atteindre la hauteur désirée. La dernière étape est le lissage de la couche de grains : avec un réglet fin et souple, on répartit délicatement les grains selon une ligne horizontale, sans les tasser (voir ANNEXE B) pour l'influence des vibrations éventuelles sur la compacité initiale des grains). Selon les expériences, on peut choisir de déposer une seconde couche de grains de diamètre différent en procédant de la même manière. La couche inférieure sera alors constituée de "gros grains" (GG) dans lesquels l'eau injectée percole, et la couche supérieure sera constituée de "petits grains" (PG), choisis pour fluidiser au passage de l'eau, dans les conditions de l'expérience.

Lancement de l'expérience : on allume le panneau lumineux et on règle les paramètres de la caméra pour obtenir une image de bonne qualité (mise au point, zone d'intérêt, ouverture). Ceux-ci sont enregistrés et gardés en mémoire pour toutes les expériences. Ensuite, la caméra est pilotée par Matlab pour l'acquisition des images. On allume ensuite la pompe et on règle le débit voulu ; comme le débit de commande met un certain temps à s'établir, un système de vannes (non représenté sur le schéma du dispositif expérimental, en FIGURE 7) permet de récupérer le fluide pendant l'établissement du débit demandé. Au lancement du programme d'acquisition d'images, il suffit alors de tourner la vanne principale pour rediriger l'écoulement vers la cellule.

Fin de l'expérience : une fois que toutes les images ont été enregistrées (après cinq minutes d'expérience au plus), on vide la cellule et on récupère les grains. Il faut ensuite les laver et les faire sécher avant de pouvoir les tamiser et les réutiliser.

2.2 Expériences menées

Le TABLEAU 2 récapitule les expériences menées au cours de mon stage.

Pour pouvoir comparer les caractérisations des sources secondaires en bicouche et en monocouche, j'ai fait varier les mêmes paramètres dans la mesure du possible. Cependant, en ce qui concerne la variation du débit d'injection, on ne peut pas descendre en-dessous de $3 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ à cause de l'instabilité de la pompe. Si au contraire on l'augmentait, le lit de grains ($106 - 212 \mu\text{m}$) se fluidiserait et on ne pourrait pas observer de sources secondaires. Nous nous sommes donc limités à un seul débit,

En bicouche	En monocouche
variation de h_{PG} 7, 9, 15, 20, 30, 40, 52, 62, 70, 80 et 90 mm	variation de la hauteur totale h_g 2, 5, 8, 11, 15, 17, 20 cm
variation de d_{GG} de la couche inférieure 400, 500 – 630, 700, 1000, 1500, 2000 μm	variation du diamètre des grains 106 – 212, 400 et 700 μm
variation de Q à composition et h_g fixés 5, 15, 30 et 50 $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$	Variation de Q à h_g fixée 5 $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$ uniquement

TABLE 2 – Résumé des expériences menées. En bicouche, deux cellules de Hele-Shaw différentes ont été utilisées : une de gap $e = 2$ mm, et l'autre de gap $e' = 4$ mm. Les hauteurs h_{PG} et h_{GG} indiquent respectivement les hauteurs de petits et de gros grains. h_g désigne la hauteur totale de la couche de grains (ici, $h_g = h_{PG} + h_{GG}$). En monocouche, seule la cellule de gap $e = 2$ mm a été utilisée.

$Q = 5 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$, pour les expériences en monocouche (TABLE 2).

3 Premières observations et analyse d'images

3.1 En milieu granulaire bicouche

Pour les expériences menées en bicouche, c'est-à-dire avec deux couches de grains, l'objectif était de récupérer, à partir des images acquises, l'espacement des sources secondaires à l'interface entre les deux couches de grains (indiqué par les flèches rouges sur la FIGURE 4b).

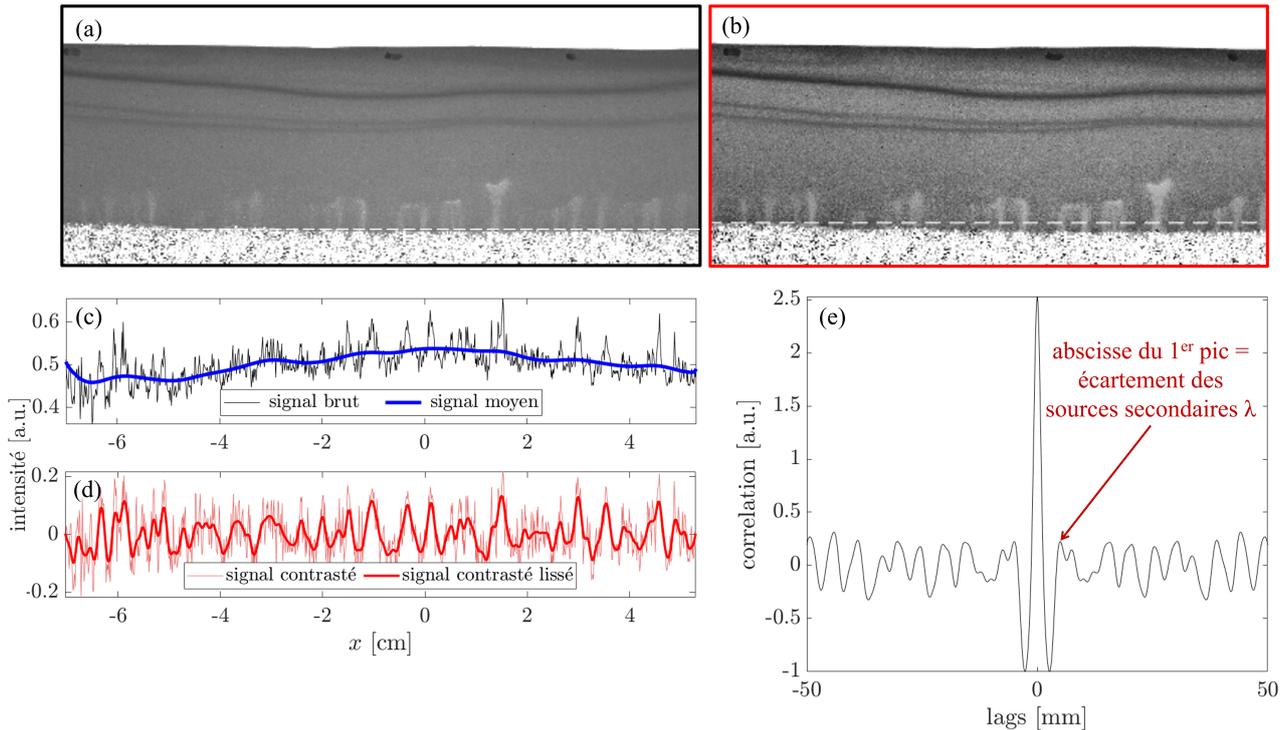


FIGURE 9 – Exemple d'analyse d'une image pour une expérience en bicouche [$e = 2$ mm ; $d_{GG} = 700 \mu\text{m}$; $d_{PG} = 106 - 212 \mu\text{m}$; débit $Q = 30 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$; $h_{GG} = 8$ cm ; $h_{PG} = 3$ cm]. (a) Image originale. On étudie l'intensité lumineuse le long de la ligne pointillée. (b) Image avec un contraste augmenté grâce à la fonction Matlab `adaphisteq`. (c) Profil d'intensité lumineuse le long de la ligne pointillée pour l'image originale. On calcule par moyennes glissante sa moyenne. (d) Profil d'intensité lumineuse sans sa valeur moyenne pour l'image contrastée, et son lissage. (e) Fonction d'autocorrélation pour le signal lissé issu de l'image contrastée.

Pour cela, on suit le protocole suivant :

1. On commence par définir la ligne de pixels selon laquelle on va relever l'intensité lumineuse (FIGURE 9a). Pour que l'analyse soit correcte et la moins bruitée possible, on se place aussi proche que possible de l'interface GG/PG. Ainsi, les panaches sont plus localisés et la différence d'intensité lumineuse entre les zones fluidisées ou non est plus importante.
2. Comme les variations de l'intensité lumineuse sont plutôt bruitées, on améliore le contraste de l'image originale à l'aide de la fonction `adapthisteq` (FIGURE 9b).
3. Le panneau lumineux ne délivrant pas un éclairage totalement uniforme, il était nécessaire de calculer la valeur moyenne et de soustraire la moyenne glissante du signal obtenu le long de la ligne de pixels choisie (FIGURE 9c).
4. On soustrait ensuite ce signal moyen au profil d'intensité, et on obtient la FIGURE 9d. Le signal en trait fin correspond au signal sans sa moyenne pour l'image contrastée (FIGURE 9b). Le trait plus épais correspond au lissage de ce signal. On a intérêt à travailler sur l'image contrastée car les pics d'intensité sont plus grands et donc plus visibles.
5. La dernière étape consiste à tracer la fonction d'auto-corrélation du signal : l'abscisse du premier pic significatif nous donne ainsi la première fois où le signal d'intensité est "en phase" avec lui-même, et donc la périodicité spatiale (ou "longueur d'onde") de l'instabilité observée (FIGURE 9e). Cependant, il faut être très vigilant avec cette méthode : parfois, le premier "vrai" pic de la fonction d'auto-corrélation correspond à 2 voire trois fois la longueur d'onde observée... et ce qui correspond à la "bonne" valeur (vérifiée avec ImageJ) est seulement présent via un point d'inflexion ou un pic de très petite amplitude devant le premier pic principal. Il s'agit donc de prendre les résultats qui vont suivre avec du recul, en notant que la plupart des valeurs ont cependant été vérifiées à la main sur ImageJ.

3.2 En milieu granulaire monocouche

Pour les expériences menées en monocouche de grains, des analyses supplémentaires ont été nécessaires. On observe également des sources secondaires à l'interface grains/eau (et leur espacement a été récupéré grâce à la méthode présentée au paragraphe précédent), mais celles-ci se déplacent horizontalement au-dessus de la couche granulaire. Pour saisir leur dynamique, les étapes d'analyse étaient les suivantes :

1. À partir de la série d'images enregistrées, on choisit une ligne horizontale de pixels proche de l'interface grains/eau, le long de laquelle les sources secondaires sont bien visibles (FIGURE 10a ; la ligne pointillée correspond à la ligne horizontale choisie).
2. On crée ensuite une image qui correspond au spatio-temporel de l'expérience (FIGURE 10b. Le "temps 0" est en bas de l'image.)
3. Sur ce spatio-temporel, on voit que des lignes plus foncées apparaissent : elles correspondent aux sources secondaires qui se déplacent et migrent vers le centre de la cellule au cours du temps. Pour connaître leur vitesse, on utilise la transformée de Hough. Cette technique permet de détecter des segments sur une image ; on peut les voir sur la FIGURE 10b, en bleu. Les extrémités de chaque segment sont marquées par un point vert et un point rouge. Ce repérage permet de quantifier le sens de la vitesse de migration, selon que la source secondaire se situe dans la partie gauche (migration vers la droite) ou dans la partie droite (migration vers la gauche) de la cellule.
4. On récupère ensuite les coordonnées des segments, et on calcule leur coefficient directeur, ce qui nous donne la vitesse horizontale de déplacement des sources secondaires. Dans la suite, cette vitesse est appelée "vitesse de migration" v_m .

4 Résultats

Tous les résultats présentés dans cette partie ont été obtenus via des expériences effectuées dans la cellule de Hele-Shaw de gap $e = 2$ mm.

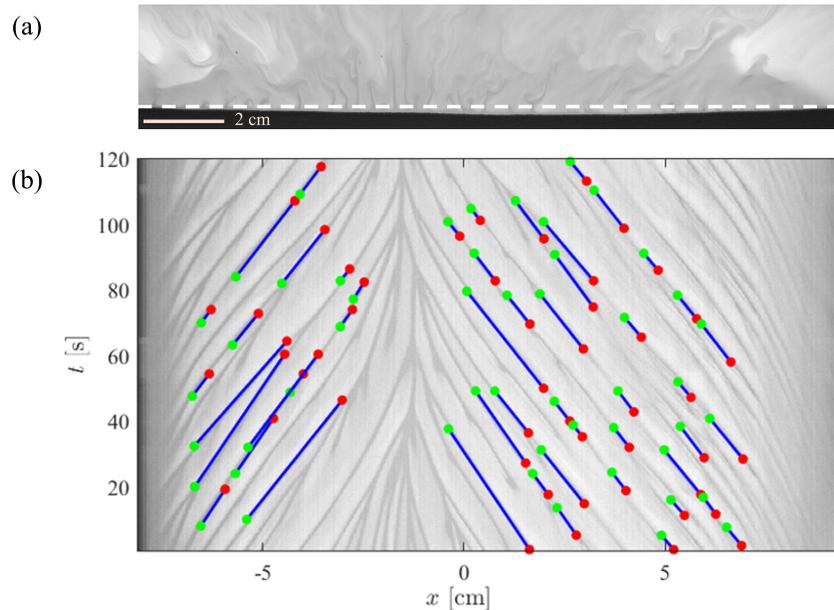


FIGURE 10 – Illustration de l’analyse d’une image issue d’une expérience en monocouche. (a) Image originale. La ligne pointillée est celle que l’on suit au cours du temps. (b) Spatiotemporel. La transformée de Hough permet ensuite de détecter des segments, qui permettent de remonter à la vitesse de migration des sources secondaires à l’interface grains/eau.

4.1 En bicouche

4.1.1 Variation de la hauteur de petits grains h_{PG}

La FIGURE 11 présente une image pour chaque expérience réalisée. Les paramètres expérimentaux sont les suivants : $d_{GG} = 700 \mu\text{m}$; $d_{PG} = 106 - 212 \mu\text{m}$; $Q = 30 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$; $h_{GG} = 8 \text{ cm}$; $h_{PG} = 0.7 - 9 \text{ cm}$. On note l’existence des sources secondaires, quelle que soit la hauteur de la couche de petits grains. Le graphique associé représentant λ en fonction de h_{PG} est celui de la FIGURE 12.

Deux valeurs typiques de λ apparaissent pour chaque expérience, λ_1 et λ_2 . On a $\lambda_1 \simeq 2\lambda_2$, ce qui pourrait s’expliquer par le fait que certaines sources secondaires n’apparaissent pas à cause d’un creux dans l’interface GG/PG. Dans chaque groupe, on ne peut pas vraiment conclure à une tendance décroissante à cause des incertitudes.

4.1.2 Variation de la porosité de la couche de gros grains h_{GG}

On a vu sur la FIGURE 6 qu’il semblait y avoir une tendance linéaire croissante de λ en fonction du diamètre de gros grains d_{GG} . Cette tendance n’était pas vérifiée pour la cellule de gap $e = 2 \text{ mm}$ car l’un des échantillons de grains utilisés est fortement polydispersé. L’une des hypothèses discutées pendant ce stage est que l’espacement des sources secondaires pourrait être contrôlé non pas par le diamètre moyen des grains, mais plutôt par la porosité de la couche granulaire, ce qui pourrait expliquer la faible valeur de λ pour les grains polydispersés. Nous avons donc au cours de ce stage quantifié la porosité de l’ensemble des échantillons utilisés (voir ANNEXE B). La FIGURE 13 présente les résultats obtenus pendant mon projet expérimental de M2 (ceux présentés en FIGURE 6, en orange), mais en fonction de la porosité, dont les mesures sont détaillées en ANNEXE B. et qui ont été réalisées durant ce stage.

Il semblerait que l’espacement entre les sources secondaires diminue lorsque la porosité augmente, mais plus de mesures seraient nécessaires pour conclure. Pour explorer un plus grand domaine de porosité, il faudrait continuer ces expériences avec plusieurs distributions de tailles de grains, monodisperses et polydispersés.

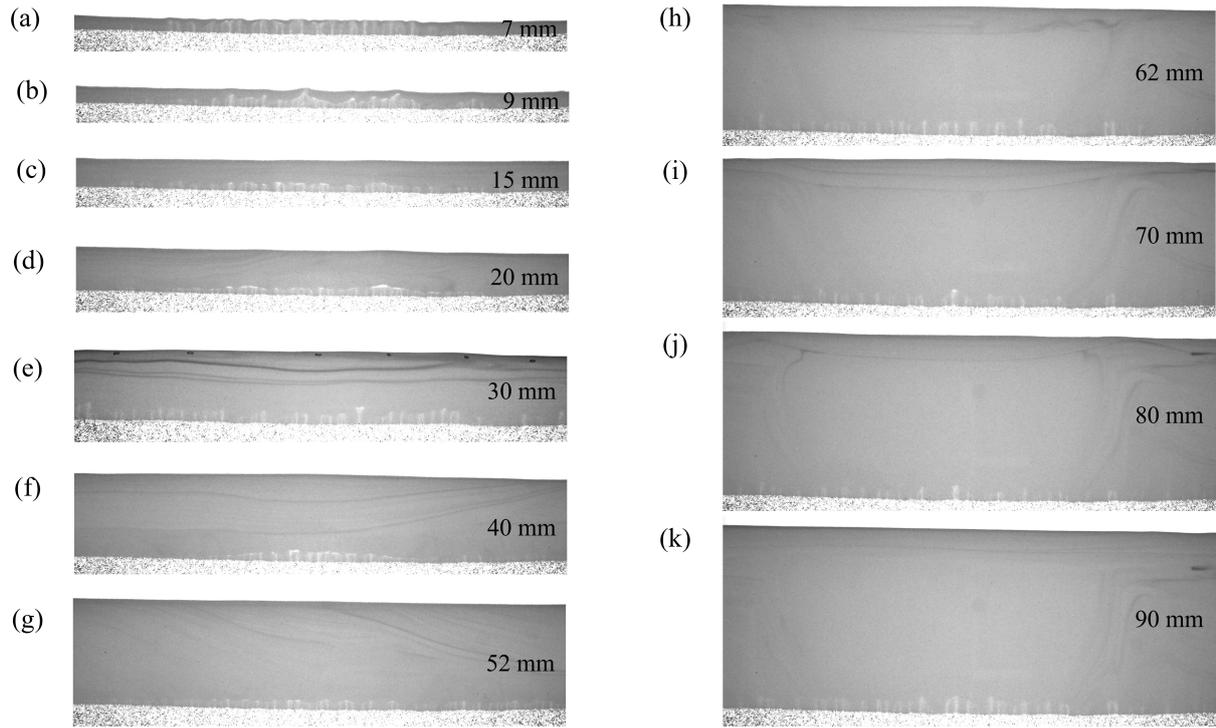


FIGURE 11 – Photos des différentes expériences en bicouche menées en faisant varier la hauteur de la couche de petits grains [$d_{GG} = 700 \mu\text{m}$; $d_{PG} = 106 - 212 \mu\text{m}$; $Q = 30 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$; $h_{GG} = 8 \text{ cm}$; $h_{PG} = 0.7 - 9 \text{ cm}$].

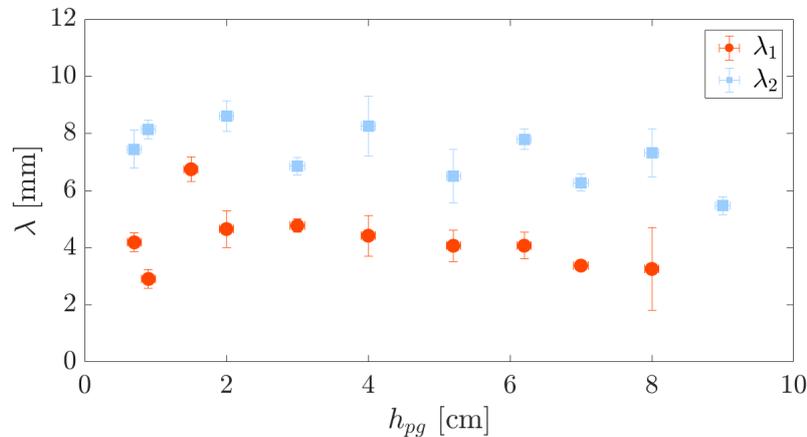


FIGURE 12 – Espacement des sources secondaires λ en fonction de la hauteur de la couche de petits grains h_{PG} pour un milieu granulaire bicouche. Les analyses à l'aide de la fonction d'auto-corrélation suggèrent l'existence de deux longueurs d'onde λ_1 et λ_2 .

4.1.3 Variation du débit d'injection Q

Sur la FIGURE 14, on a représenté l'espacement des sources secondaires en fonction du débit d'injection, pour les paramètres suivants : $h_{GG} = 8 \text{ cm}$; $h_{PG} = 3 \text{ cm}$; $d_{GG} = 700 \mu\text{m}$; $d_{PG} = 106 - 212 \mu\text{m}$. Là encore, deux groupes de longueur d'onde apparaissent, mais les valeurs ne semblent pas dépendre de Q . Pour $Q = 5 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$, l'eau injectée percole dans les petits grains, et l'on n'observe pas de sources secondaires à l'interface GG/PG.

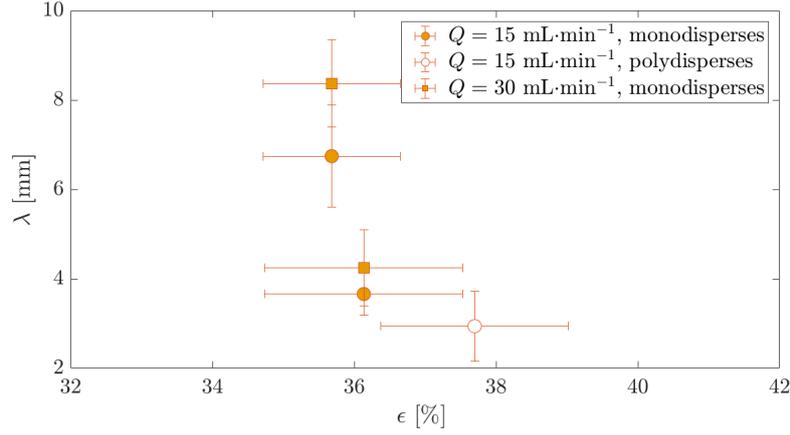


FIGURE 13 – Espacement des sources secondaires λ en fonction de la porosité de la couche de gros grains ϵ pour un milieu granulaire bicouche [$e = 2$ mm, $h_{GG} = 8$ cm, $h_{PG} = 3$ cm, $d_{PG} = 106 - 212$ μm].

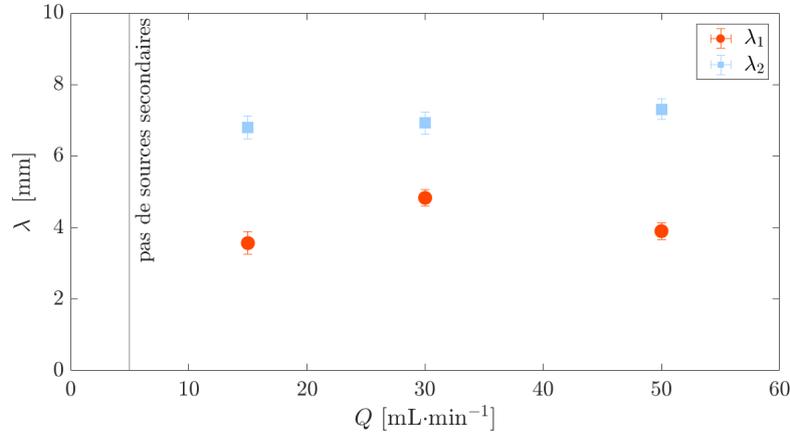


FIGURE 14 – Espacement des sources secondaires λ en fonction du débit d'injection pour un milieu granulaire bicouche. Pour $Q = 5$ mL·min⁻¹, on n'observe pas de sources secondaires à l'interface GG/PG, ce qui est symbolisé par le trait noir vertical [$e = 2$ mm, $h_{GG} = 8$ cm, $h_{PG} = 3$ cm, $d_{GG} = 700$ μm , $d_{PG} = 106 - 212$ μm].

expérience n°	1	2	3	4	5	6
d_{GG} [μm]	106 – 212	106 – 212	106 – 212	106 – 212	400	700
λ [mm]	2.7 ± 0.4 5.9 ± 0.2	4.7 ± 0.2	5.9 ± 0.3	5.5 ± 0.5	9.30 ± 0.08	inexistantes

TABLE 3 – Espacement des sources secondaires pour les différentes expériences menées en monocouche [$e = 2$ mm ; $h_g = 11$ cm ; $Q = 5$ mL·min⁻¹].

4.2 En monocouche

4.2.1 Espacement des sources secondaires

La TABLE 3 récapitule les λ pour les expériences en monocouche. Trois tailles de grains ont été utilisées ici : $d_g = 106 - 212$, 400 et 700 μm . Pour ces derniers, on n'observe pas de sources secondaires, bien que cette expérience à été effectuée plusieurs fois.

L'espacement des sources secondaires en monocouche est assez délicat à interpréter. En effet, comme évoqué en SECTION 3.2, les sources secondaires qui apparaissent dans l'eau ne sont pas toujours au même endroit au fil du temps : elles migrent, ce qui peut expliquer la dispersion des mesures pour les

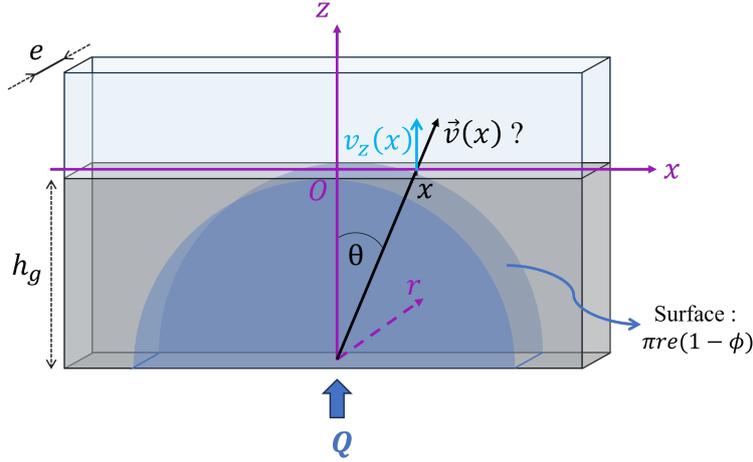


FIGURE 15 – Schéma de la situation étudiée avec les notations utilisées dans le calcul présenté. La zone grisée représente le lit granulaire immergé, et la zone bleue indique la zone envahie par le fluide entrant (percolation).

grains de diamètre 106 – 212 μm .

4.2.2 Champ des vitesses dans l'eau

Afin d'expliquer la migration vers le centre des sources secondaires que l'on observe au cours du temps, dans la configuration monocouche, on cherche à déterminer l'expression analytique du champ de vitesse dans l'eau, juste au-dessus de la couche de grains. Le schéma avec les notations utiles est présent en FIGURE 15. On suppose tout d'abord que l'on se trouve dans un régime de percolation dans la couche de grains. Donc le champ de vitesse dans le milieu granulaire est supposé semi-cylindrique (vérification de cette hypothèse en ANNEXE C) et prend la forme suivante :

$$v(r) = \frac{Q}{\pi r e (1 - \phi)} \tag{1}$$

En écrivant $\sin(\theta) = \frac{x}{r}$, on peut exprimer la vitesse en fonction de x :

$$v(x) = \frac{Q \sin(\theta)}{\pi x e (1 - \phi)}$$

puis comme $\tan(\theta) = \frac{x}{h_g}$, à l'interface on a l'expression suivante :

$$v(x) = \frac{Q \sin(\arctan(\frac{x}{h_g}))}{\pi x e (1 - \phi)} .$$

En utilisant quelques relations trigonométriques, on arrive à l'expression de la norme de la vitesse du fluide au-dessus des grains en fonction de x :

$$v(x) = \frac{Q |\frac{x}{h_g}|}{\pi x e (1 - \phi) \sqrt{1 + (\frac{x}{h_g})^2}} \tag{2}$$

En multipliant l'expression (2) respectivement par $\cos(\theta)$ ou $\sin(\theta)$, on obtient les composantes verticale et horizontale de la vitesse au-dessus des grains :

$$\begin{cases} v_z(x) &= \frac{Q h_g}{\pi e (1 - \phi) (h_g^2 + x^2)} \\ v_x(x) &= \frac{Q x h_g^2}{\pi e (1 - \phi) (h_g^2 + x^2)} \end{cases} \tag{3}$$

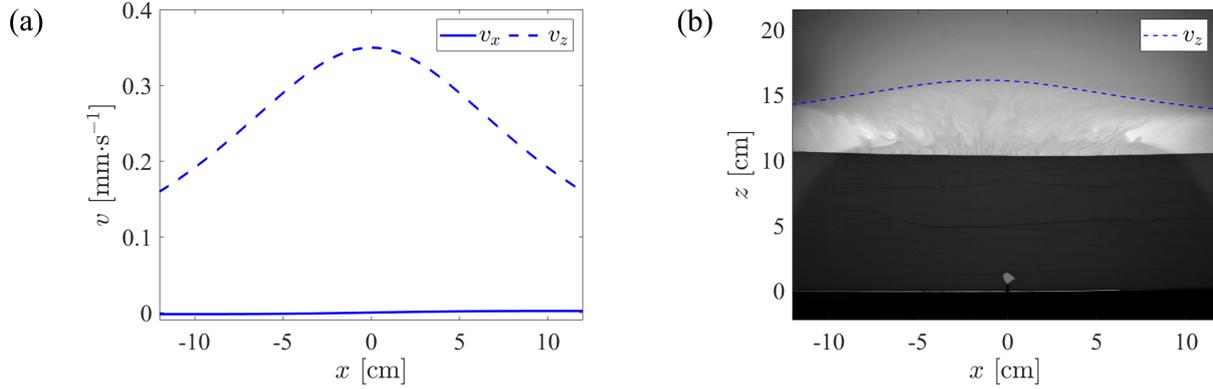


FIGURE 16 – (a) Représentation graphique des composantes du champ de vitesse du liquide injecté, au-dessus des grains [$Q = 5 \text{ mL}\cdot\text{s}^{-1}$; $h_g = 11 \text{ cm}$; $e = 2.3 \text{ mm}$; $\phi = 0.7$]. (b) Superposition d'une image avec le champ de vitesse calculé. Le champ de vitesse théorique est en accord avec celui trouvé expérimentalement, à un facteur multiplicatif près qui permet de calculer la position en ayant la vitesse.

La FIGURE 16a donne la représentation graphique des expressions de v_z et v_x en fonction de x . Sur la FIGURE 16b on a superposé la position théorique du front du fluide injecté au-dessus des grains (obtenue par le calcul, à un facteur multiplicatif près) à sa position réelle. On constate que la théorie et l'expérience sont en accord. On trouve une vitesse verticale théorique de l'ordre de $0.32 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ au centre. Expérimentalement, on trouve une vitesse verticale de $0.13 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ au centre, grâce à une analyse spatio-temporelle sous ImageJ. En effet, le spatio-temporel selon la ligne verticale au-dessus de l'injecteur montre la progression du front de fluide injecté dans l'eau, et la pente de la frontière eau claire/ eau colorée nous donne la valeur de v_z expérimentalement. Il y a un facteur 2 d'écart entre ces valeurs, mais l'ordre de grandeur est le bon.

Cependant, si on revient aux sources secondaires, les ordres de grandeur ne sont plus du tout les mêmes pour la composante horizontale quand on compare expérience et théorie. Tout d'abord, le champ de vitesse v_x uniquement dû à la remontée par percolation du fluide dans la couche de grains aurait tendance à éloigner les sources secondaires du centre, puisque v_x est du même signe que x : positive à droite de l'injecteur, négative à gauche. Mais expérimentalement, on observe un comportement opposé à la théorie : les sources secondaires migrent vers le centre, à la vitesse $v_m \neq v_x$. En effet, on trouve les valeurs suivantes, respectivement expérimentalement grâce à la transformée de Hough, et par le calcul :

$$v_m \simeq 0.6 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1} \text{ alors que } v_x \simeq 0.002 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1} \quad (4)$$

On pourrait penser que v_m est induite par la convection du liquide au-dessus de la couche de grains. Dans ce cas, une estimation grossière en considérant une sortie principale de fluide au niveau du centre de la cellule à la surface libre des grains, pourrait se baser sur la formation de deux rouleaux de convection, ayant une vitesse verticale v_z et une vitesse horizontale (que l'on obtient par conservation de la masse) :

$$v_{x,c} = \frac{2(h_{\text{eau}} - h_g)}{W} v_z \simeq 0.38 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1},$$

où $W = 35 \text{ cm}$ est la largeur de la cellule de Hele-Shaw. Cette valeur est plus de la réalité que v_x , mais si cette hypothèse était valable, alors on verrait nettement des mouvements de convection à l'échelle de la cellule grâce au colorant présent dans l'eau, ce qui n'est pas le cas. On peut donc dire que le(s) mécanisme(s) à l'origine de la migration des sources secondaires ne sont pas connus ; a priori, il ne s'agit pas de convection à l'échelle de la cellule, mais peut-être entre les sources secondaires.

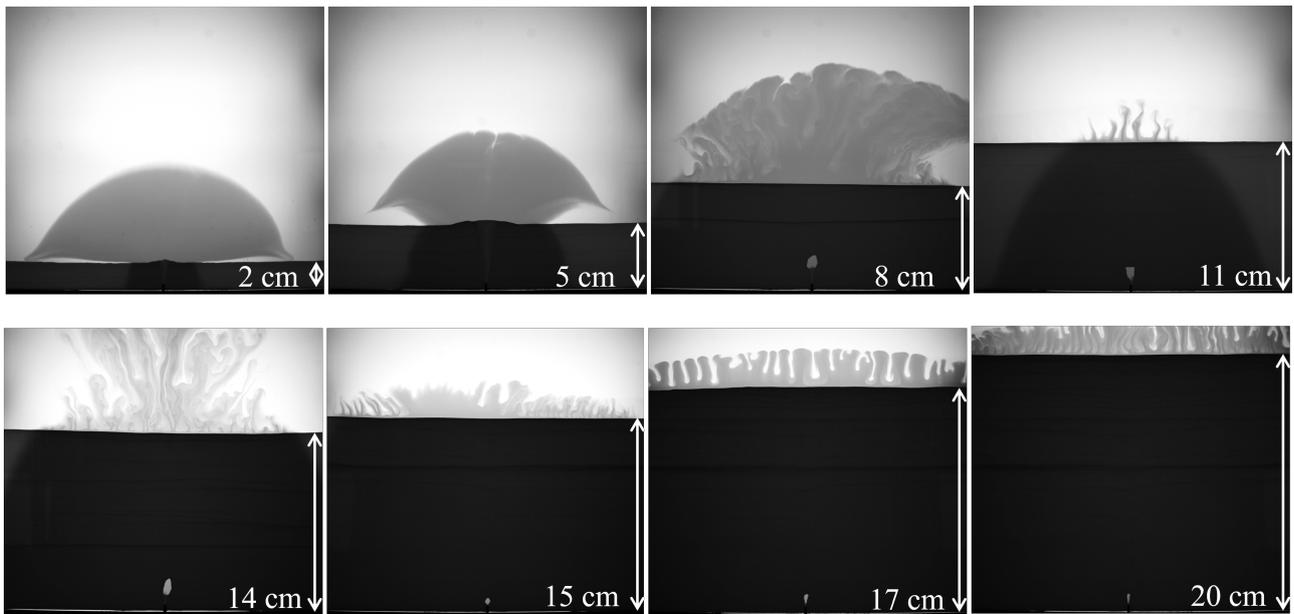


FIGURE 17 – Photos des expériences en monocouche [$d_g = 106 - 212 \mu\text{m}$; $Q = 5 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}$; h_g varie de 2 cm à 20 cm].

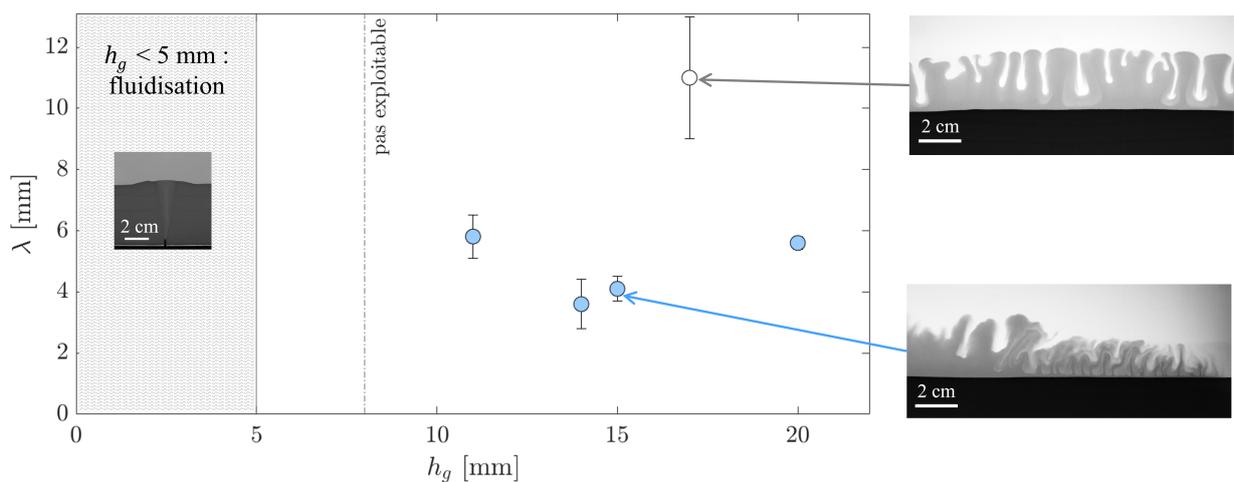


FIGURE 18 – Espacement des sources secondaires en fonction de la hauteur de la couche de grains pour un milieu granulaire monocouche [$d_g = 106 - 212 \mu\text{m}$; $Q = 5 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}$].

4.2.3 Variation de la hauteur de la couche de grains h_g

Les photos des expériences réalisées en monocouche en faisant varier h_g sont présentées en FIGURE 17. On a injecté de l'eau à $Q = 5 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ dans un lit de grains composé de particules de diamètre $d_g = 106 - 212 \mu\text{m}$.

La FIGURE 18 présente les résultats issus de l'analyse des images. En-dessous de $h_g = 5 \text{ cm}$, l'eau injectée fluidise le lit de grains sur toute la hauteur et on n'observe pas de sources secondaires. L'expérience à $h_g = 8 \text{ cm}$ a été effectuée deux fois, mais pour des raisons inconnues les sources secondaires ne sont pas clairement visibles; ces images n'ont donc pas été analysées. Au-delà, on observe systématiquement la formation de ces instabilités à l'interface grains/eau, et leur espacement semble à peu près constant. L'expérience à $h_g = 17 \text{ cm}$ donne un résultat surprenant, mais que l'on ne sait pas expliquer.

5 Conclusions et perspectives

Les expériences menées au cours de mon stage de M2 ont permis de caractériser en partie les sources secondaires qui apparaissent à l'interface GG/PG en bicouche et à l'interface grains/eau en monocouche. Tout d'abord, comme cette instabilité apparaît à la fois pour des systèmes bicouches et monocouches, on peut en déduire que la nature de l'interface ne joue pas un grand rôle dans son existence et l'espacement des sources secondaires. La seule différence majeure entre les deux cas est la migration ou non des instabilités. La couche supérieure de grains semble alors agir comme un "fixateur" des sources secondaires.

En ce qui concerne les systèmes bicouches :

- h_{PG} n'a aucune influence sur l'existence et l'écartement des sources secondaires,
- la porosité semble être un paramètre pertinent pour l'étude de ces sources secondaires, mais des expériences complémentaires sont à mener (notamment les mesures de porosité dans la cellule de gap $e' = 4$ mm) pour confirmer cette hypothèse,
- le débit d'injection d'eau ne semble pas affecter l'espacement des sources secondaires.

Pour les systèmes en monocouche de grains, on peut déduire que :

- des sources secondaires existent et apparaissent à l'interface grains/eau,
- l'espacement des sources secondaires est plutôt régulier, mais est délicat à trouver compte tenu de leur migration,
- le champ de vitesse global dans l'eau au-dessus des grains dû à la percolation du fluide dans la couche de grains est connu, mais ce qui permet d'expliquer sa forme ne donne pas de réponse par rapport à la vitesse de migration des sources secondaires...
- lorsque l'on fait varier la hauteur de grains à condition d'être dans le régime de percolation dans la couche de grains, λ ne semble pas dépendre significativement de la hauteur totale de grains h_g ,
- la polydispersité et donc la porosité joue un rôle non négligeable. En effet, on n'observe pas de sources secondaires avec des grains lavés et tamisés ($d_g = 106 - 212 \mu\text{m}$), même en reproduisant les mêmes conditions expérimentales (même Q , même h_g) qu'avec ces mêmes grains "bruts".

Un autre résultat se dégage des diverses analyses et expériences menées : les sources secondaires ne sont pas instantanées, mais elles apparaissent après un régime transitoire, qu'il faudrait caractériser (voir FIGURE 19).

Malgré ces conclusions, de nombreuses perspectives s'ouvrent encore sur le sujet, sur lequel je vais poursuivre les recherches en thèse à partir de la rentrée de septembre 2024. Pour explorer une gamme plus large de porosités, il faudrait faire plus d'expérience en bicouche (et peut-être en monocouche) en faisant varier la taille et la dispersité des grains, potentiellement en changeant de cellule pour vérifier si le confinement joue un rôle important ou non. Toujours en faisant varier la porosité de la couche inférieure, il serait intéressant de vérifier l'existence des sources secondaires en fonction de la porosité et d'avoir un diagramme d'existence.

Une autre piste de recherche serait de changer la topographie de l'interface. Au lieu de préparer des couches de grains les plus lisses possibles, on pourrait créer des anomalies de topographie à la manière de la FIGURE 20. Ainsi, on pourrait voir de quelle manière la topographie de l'interface affecte ou non les sources secondaires et leurs caractéristiques.

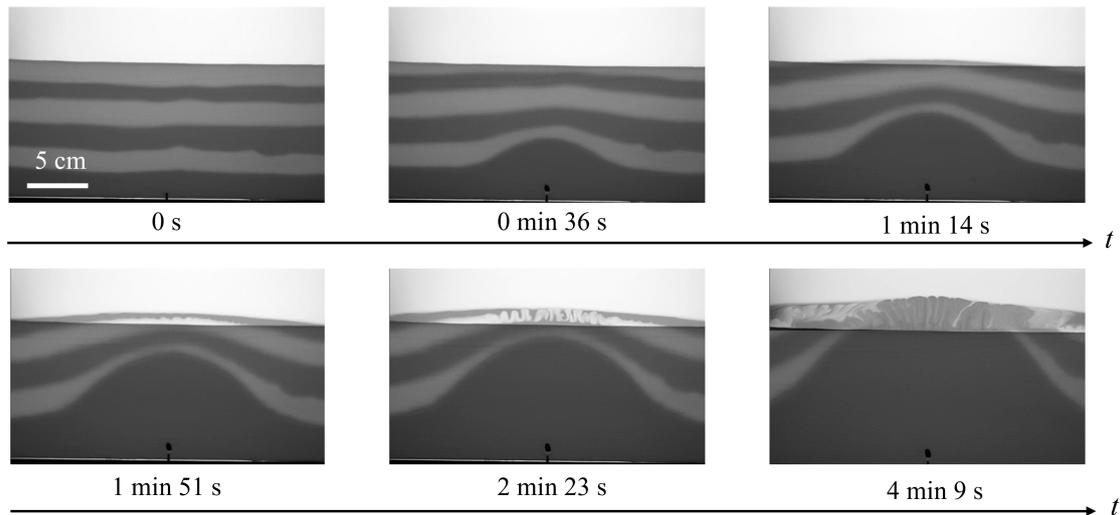


FIGURE 19 – Photos d’une expérience en monocouche de grains, avec une alternance eau colorée/eau claire dans le lit de grains, pour visualiser le front de fluide injecté au cours du temps. On voit que les sources secondaires apparaissent après un temps transitoire (ici $t \simeq 1 \text{ min } 50$) [$d_g = 106 - 212 \mu\text{m}$; $Q = 5 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$; $e = 2 \text{ mm}$].

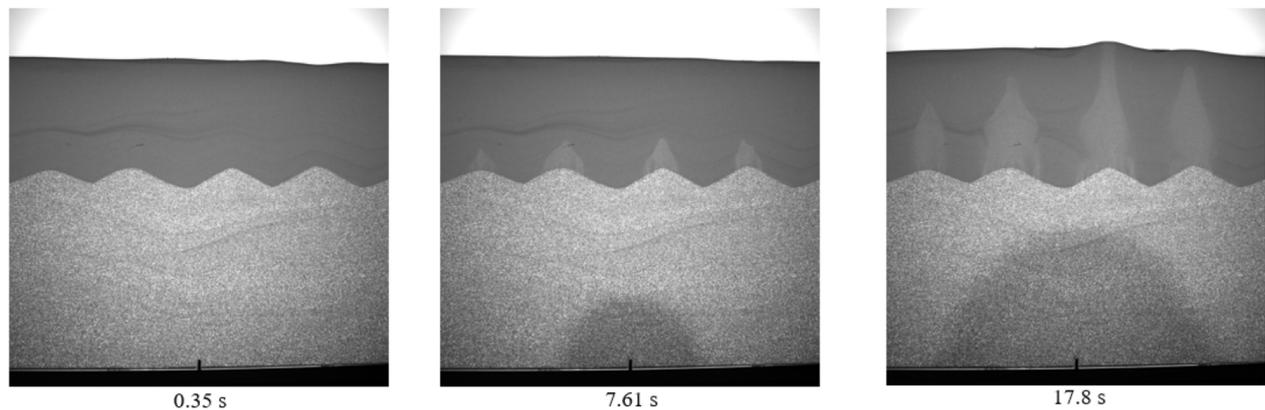


FIGURE 20 – Exemple d’expérience réalisée par G. TANGAVELOU avec une interface volontairement non plate [$h_{GG,moy} = 10 \text{ cm}$; $h_{PG,moy} = 6.5 \text{ cm}$; $Q = 30 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$] (Tangavelou, 2023).

Références

- CARDOSO, S. et CARTWRIGHT, J. (2016). Increased methane emissions from deep osmotic and buoyant convection beneath submarine seeps as climate warms. *Nature Communications*, 7:13266.
- CARRARA, A., BURGISSER, A. et BERGANTZ, G. W. (2020). The architecture of intrusion in magmatic mush. *Earth and Planetary Science Letters*, 549:116539.
- CARTWRIGHT, J. et SANTAMARINA, C. (2015). Seismic characteristics of fluid escape pipes in sedimentary basins : Implications for pipe genesis. *Marine and Petroleum Geology*, 65:126–140.
- CUI, X., LI, J., CHAN, A. et CHAPMAN, D. (2014). Coupled DEM–LMB simulation of internal fluidisation induced by a leaking pipe. *Powder Technology*, 254:299–306.
- GAY, A. et MIGEON, S. (2017). Geological fluid flow in sedimentary basins. *Earth Sciences Bulletin*, 188(4):E3.

- GAY, A., MOURGUES, R., BERNDT, C., BUREAU, D., PLANKE, S., LAURENT, D., GAUTIER, S., LAUER, C. et LOGGIA, D. (2012). Anatomy of a fluid pipe in the Norway Basin : Initiation, propagation and 3D shape. *Marine Geology*, 332-334:75–88.
- GAY, A., TANGAVELOU, G. et VIDAL, V. (2024). Pipe formation by fluid focalization in bilayered sediments. *Fluids*, 9:66.
- GAY, A. et VIDAL, V. (2022). Future challenges on focused fluid migration in sedimentary basins : Insight from field data, laboratory experiments and numerical simulations. *Papers in Physics*, 14:140011.
- GEISTLINGER, H., G., F., LAZIK, D. et LUCKNER, L. (2006). Direct gas to injection into saturated glass beads : Transition from incoherent to coherent gas flow pattern. *Water Resources Research*, 42:W07403.
- HOVLAND, M., GARDNER, J. V. et JUDD, A. G. (2002). The significance of pockmarks to understanding fluid flow processes and geohazards. *Geofluids*, 2:127–136.
- HUDEC, M. R. et SOTO, J. I. (2021). Piercement mechanisms for mobile shales. *Basin Research*, 33(5):2862–2882.
- ISMAIL, A., EWIDA, H. F., AL-IBIARY, M. G., NAZERI, S., SALAMA, N. S., GAMMALDI, S. et ZOLLO, A. (2020). The detection of deep seafloor pockmarks, gas chimney, and associated features with seafloor seeps using seismic attributes in the West offshore Nile Delta, Egypt. *Exploration Geophysics*, 52(4):388–408.
- JUANES, R., MENG, Y. et PRIMKULOV, B. K. (2020). Multiphase flow and granular mechanics. *Physical Review Fluids*, 5:110516.
- KING, L. H. et MACLEAN, B. (1970). Pockmarks on the Scotian Shelf. *GSA Bulletin*, 81(10):3141–3148.
- MAY, F., WARSITZKA, M. et KUKOWSKI, N. (2019). Analogue modelling of leakage processes in unconsolidated sediments. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 90:102805.
- MENA, S. E., BRUNIER-COULIN, F., CURTIS, J. S. et PHILIPPE, P. (2018). Experimental observation of two regimes of expansion in localized fluidization of a granular medium. *Physical Review E*, 98:042902.
- MENA, S. E., LUU, L.-H., CUÉLLAR, P., PHILIPPE, P. et CURTIS, J. S. (2017). Parameters affecting the localized fluidisation in a particle medium. *American Institute of Chemical Engineers Journal*, 63(5):1529–1542.
- MONTELLÀ, E. P., TORALDO, M., CHAREYRE, B. et SIBILLE, L. (2016). Localized fluidization in granular materials : Theoretical and numerical study. *Physical Review E*, 94:052905.
- NERMØEN, A., GALLAND, O., JETTESTUEN, E., FRISTAD, K., PODLADCHIKOV, Y., SVENSEN, H. et MALTHE-SØRENSEN, A. (2010a). Experimental and analytic modeling of piercement structures. *Journal of Geophysical Research*, 115:B10202.
- NERMØEN, A., RAUFASTE, C., de VILLIERS, S. D., JETTESTUEN, E., MEAKIN, P. et DYSTHE, D. K. (2010b). Morphological transitions in partially gas-fluidized granular mixtures. *Physical Review E*, 81:061305.
- NICHOLS, R. J., SPARKS, R. J. S. et WILSON, C. (1994). Experimental studies of the fluidization of layered sediments and the formation of fluid escape structures. *Sedimentology*, 41:233–253.
- PHILIPPE, P. et BADIANE, M. (2011). Chimney of fluidization and "sandboil" in a granular soil. In BONELLI, S., DASCALU, C. et NICOT, F., éditeurs : *Advances in Bifurcation and Degradation in Geomaterials*, pages 125–129. Springer Netherlands.
- PHILIPPE, P. et BADIANE, M. (2013). Localized fluidization in a granular medium. *Physical Review E*, 87:042206.
- RÄSS, L., SIMON, N. S. C. et PODLADCHIKOV, Y. Y. (2018). Spontaneous formation of fluid escape pipes from subsurface reservoirs. *Scientific Reports*, 8.

- SHI, Y.-F., YU, Y. S. et FAN, L. T. (1984). Incipient fluidization condition for a tapered fluidized bed. *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*, 23(4):484–489.
- SVENSEN, H., PLANKE, S., MALTHE-SØRENSEN, A., JAMTVEIT, B., MYKLEBUST, R., T., R. E. et REY, S. S. (2004). Release of methane from a volcanic basin as a mechanism for initial Eocene global warming. *Nature*, 429(6991):542–545.
- TANGAVELOU, G. (2023). Migration de fluide dans un milieu granulaire bicouche immergé : phénomènes aux interfaces.
- WANDGE, M. (2020). A 3D model for chimney formation in sedimentary basins. *Computers & Geosciences*, 137:104429.
- XU, C., XU, G., XING, J., SUN, Z. et WU, N. (2020). Research progress of seafloor pockmarks in spatio-temporal distribution and classification. *Journal of Ocean University of China*, 19:69–80.
- YARUSHINA, V. M., PODLADCHIKOV, Y. Y. et WANG, L. H. (2020). Model for (de)compaction and porosity waves in porous rocks under shear stress. *Journal of Geophysical Research : Solid Earth*, 12:e2020JB019683.
- YARUSHINA, V. M., WANG, L. H., CONNOLLY, D., KOCSIS, G., FÆSTØ, I., POLTEAU, S. et LAKHLIFI, A. (2022). Focused fluid-flow structures potentially caused by solitary porosity waves. *Geology*, 50(2):179–183.
- ZOUESHTIAGH, F. et MERLEN, A. (2007). Effect of vertically flowing water jet underneath a granular bed. *Physical Review E*, 75:056313.

ANNEXES

A Granulométrie détaillée

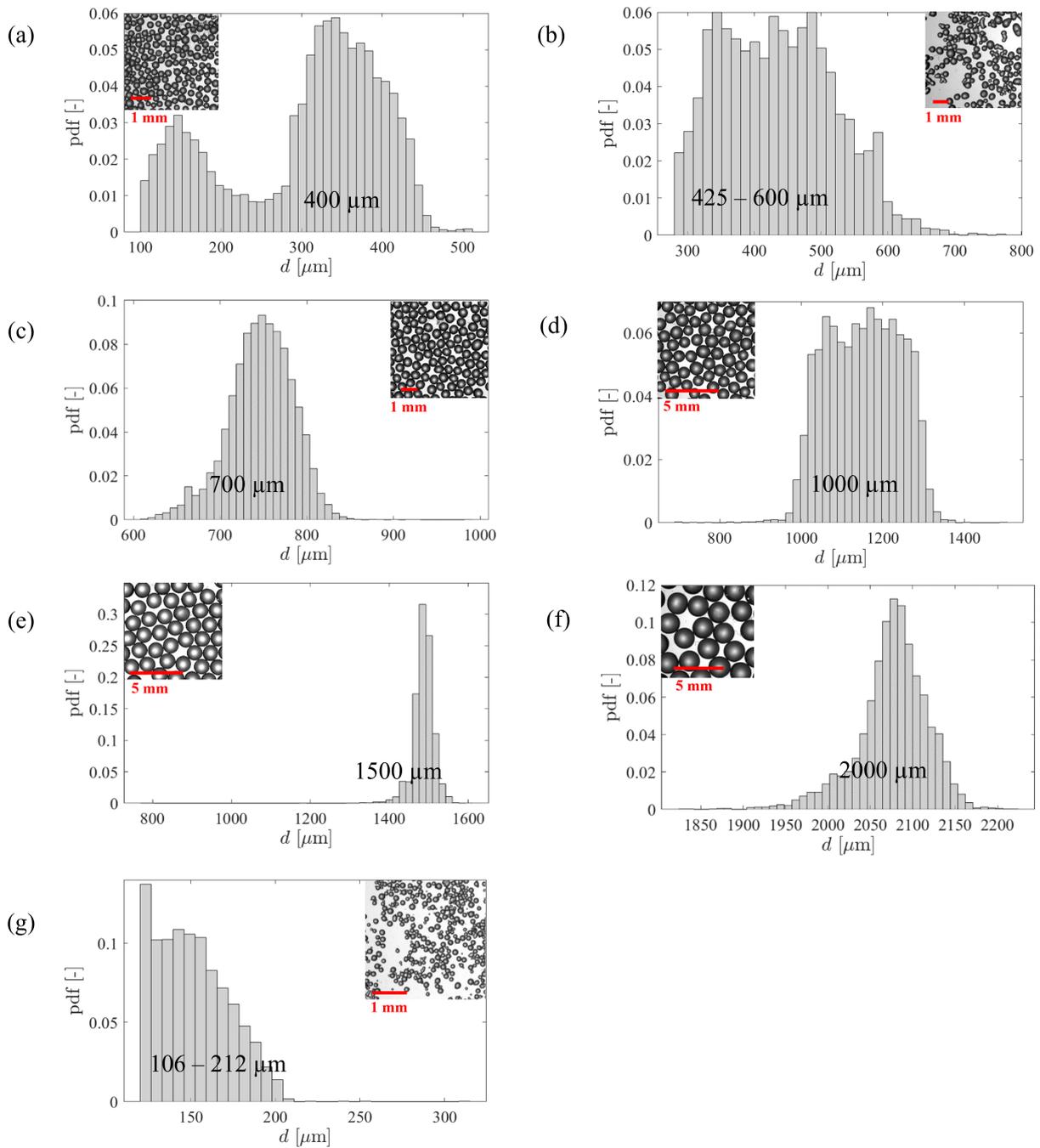


FIGURE 21 – Granulométrie détaillée des particules utilisées.

B Mesure de compacité

Protocole pour la mesure de la compacité pour des grains immergés :

1. On remplit la cellule de Hele-Shaw avec de l'eau distillée à la hauteur voulue.
2. On pèse une masse m_1 de grains, que l'on introduit dans la cellule (en évitant les secousses le plus possible).
3. On lisse délicatement l'interface à l'aide d'un réglet, sans tasser les grains. On s'assure de l'horizontalité de l'interface à l'aide d'un niveau.
4. On finit de remplir la cellule avec de l'eau distillée, jusqu'au débordement (voir FIGURE 7).
5. On mesure la hauteur du lit de grains en plusieurs points le long de l'interface, et on note la hauteur moyenne $h_{g,1}$.
6. On retire une partie de l'eau à l'aide d'une seringue, on sèche l'intervalle entre les deux plaques de verre et on répète l'opération, en notant les m_i et $h_{g,i}$.

Ces mesures permettent ensuite, connaissant les dimensions de la cellule et la masse volumique des billes de verre, de calculer la compacité ϕ du système.

Protocole pour la mesure de la compacité pour des grains secs : On procède de la même manière que pour les grains immergés, mais sans mettre d'eau dans la cellule de Hele-Shaw.

On constate, sur les FIGURES 22a, b, c que la compacité du lit de grains sec et immergé n'est pas la même en fonction de la hauteur des grains. Dans tous les cas, ϕ semble atteindre un plateau à partir d'une quinzaine de centimètres de grains. Sur la FIGURE 22e, on constate que les grains polydisperses $500 - 630 \mu\text{m}$ sont ceux avec la compacité la plus faible, donc la porosité ϵ la plus grande.

Les points avec un contour noir sur la FIGURE 22 correspondent à des mesures de compacités obtenues après avoir tassé les grains immergés en tapant doucement sur les plaques de verre à la main. Ces vibrations provoquent des réarrangements au niveau des grains et augmentent leur compacité de plusieurs pour-cents.

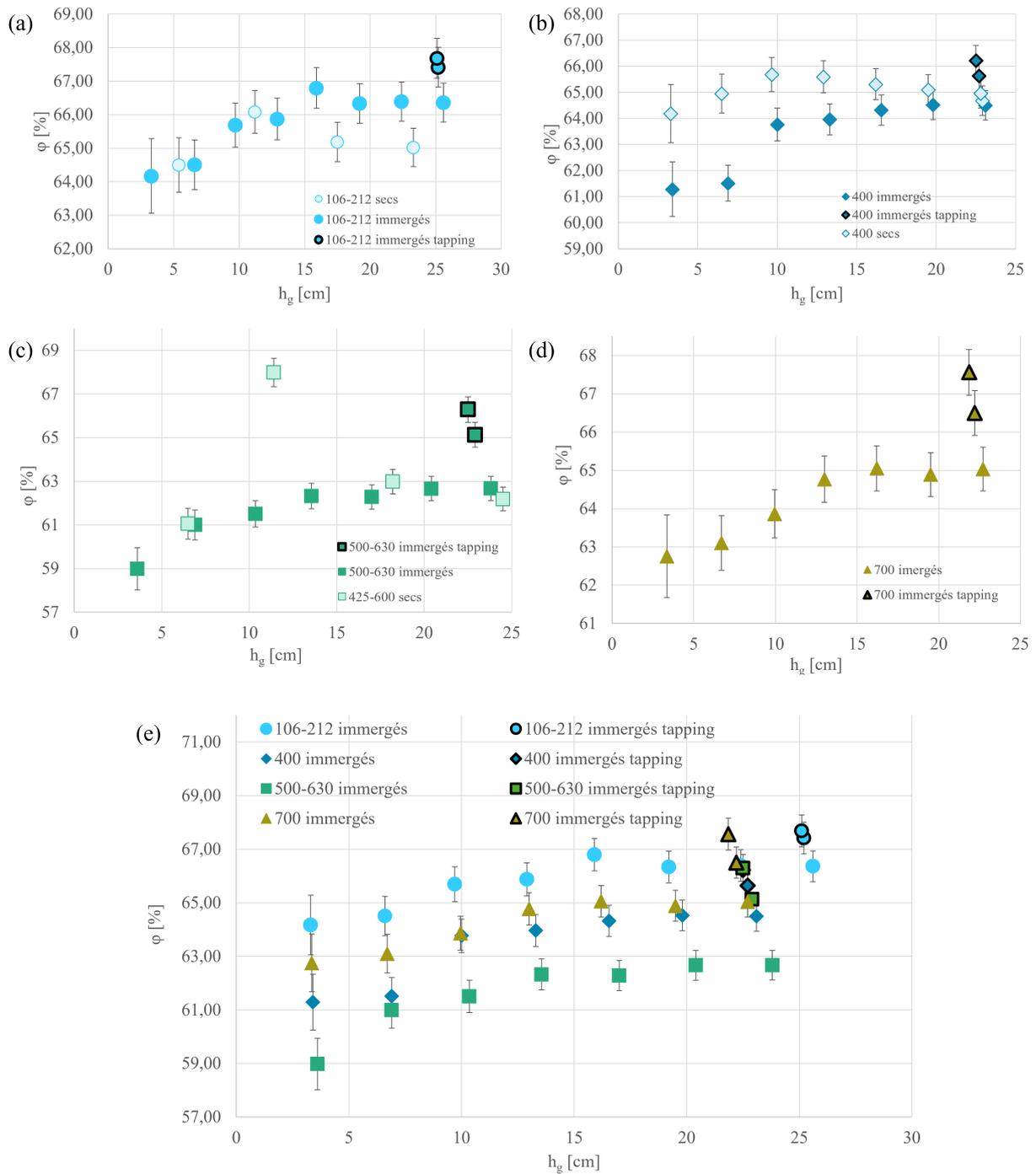


FIGURE 22 – Mesures de compacité. (a) Grains 106 – 212 μm , USF Matrasur ; (b) grains 400 μm , Sigmund-Lindner ; (c) grains 500 – 630 μm , issus du tamisage de grains 425 – 600 μm , Wheelabator ; (d) grains 700 μm , Sigmund-Lindner. (e) Superposition de tous les graphes pour une meilleure comparaison des mesures.

C Profil de vitesse du fluide dans les grains en monocouche

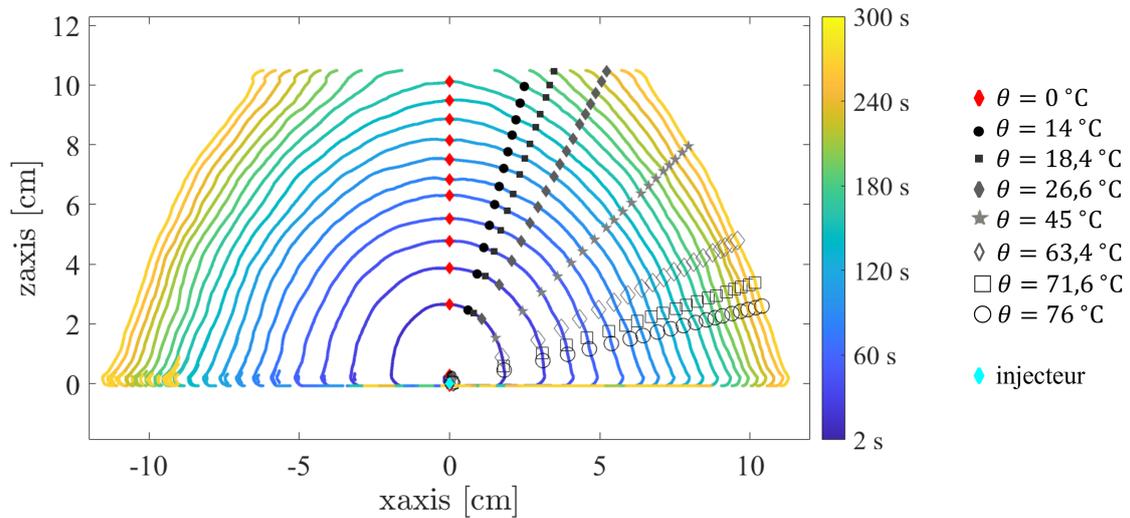


FIGURE 23 – Suivi expérimental du front de percolation de l’eau injectée au sein d’une monocouche de grains [106 – 212 μm ; 11 cm ; $Q = 5 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$]. Les lignes colorées représentent le front de percolation à des temps différents, données par l’échelle de couleurs. Les différents marqueurs donnent l’intersection de ces profils avec différentes droites.

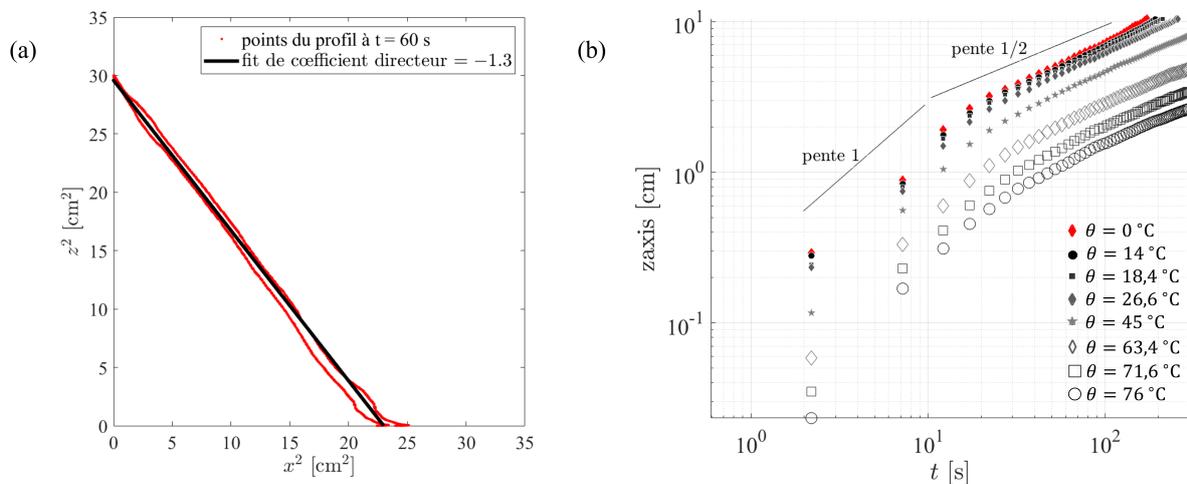


FIGURE 24 – (a) Vérification de l’hypothèse semi-cylindrique dans la matrice granulaire : on trace z^2 en fonction de x^2 . L’ajustement linéaire donne un coefficient en valeur absolue proche de 1. + (b) Évolution temporelle de z en échelle logarithmique, à des angles différents par rapport à la verticale. Des droites de pente 1 et 1/2 ont été positionnées sur le graphique pour faciliter la lecture.

Vérification expérimentale d’une des hypothèses faites dans la SECTION 4.2.2 (à savoir : profil de vitesse semi-cylindrique dans la couche de grains). Sur la FIGURE 23, on a représenté le front de percolation dans une monocouche de grains à différents instants (symbolisés par l’échelle de couleurs). Pour quantifier la progression de ce front, on récupère les coordonnées selon l’intersection avec plusieurs droites (symboles).

On récupère ensuite les points d’un des profils, et on trace z^2 en fonction de x^2 . C’est ce qui est représenté sur la FIGURE 24a, pour le profil à $t = 60 \text{ s}$. Un ajustement linéaire donne une pente, en

valeur absolue, de 1.3. Compte tenu du traitement numérique pour récupérer le front de percolation (dont la frontière entre eau claire/eau bleue n'est pas toujours bien visible, même si la concentration en colorant est plutôt élevée), on peut valider l'hypothèse d'un champ de vitesse semi-cylindrique dans la matrice de grains. La FIGURE 24b présente l'évolution temporelle (en échelle log log) de l'intersection entre le profil de percolation et différentes droites (respectivement de coefficients directeurs 4, 3, 2, 1, 1/2, 1/3 et 1/4). On peut remarquer la présence de deux régimes pour l'avancée du front de percolation : dans un premier temps, on a régime balistique (pente de 1 en échelle logarithmique, pendant les premières secondes) puis un régime diffusif (pente de 1/2 en échelle logarithmique, ensuite). Lorsque l'angle avec la verticale θ est petit, on est même dans un régime sur-diffusif puisque la pente (en échelle logarithmique) est supérieure à 1/2. Cela peut s'expliquer par le fait que le liquide injecté atteint l'interface grains/eau.