



LICENCE SCIENCES DE LA MATIÈRE
École Normale Supérieure de Lyon
Université Claude Bernard Lyon I

Stage 2022–2023
Tangavelou Ganesh
L3 Physique

Migration de fluide dans un milieu granulaire bicouche immergé : Phénomènes aux interfaces.

Résumé : *Nous avons réalisé l'étude expérimentale de la migration de fluide dans un milieu granulaire immergé présentant une discontinuité. La discontinuité est due à la différence de granulométrie des grains. Ce stage s'intéresse aux phénomènes qui surviennent aux interfaces comme la décompaction du milieu (hauteur/aire atteinte), le temps/la remontée de ce front de décompaction. Les résultats obtenus dépendent fortement de la compacité locale des grains ainsi que de la topographie de l'interface entre les grains. L'étude ici menée se rapproche de phénomènes géophysiques tels que la remontée de fluides dans des bassins sédimentaires.*

Mots clefs : *milieux granulaires, fluides, écoulements multiphasiques, 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
Pl. Eugène Bataillon, 34090 Montpellier

<http://www.gm.univ-montp2.fr/>



*Lieu du stage

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier Valérie Vidal et Aurélien Gay, mes encadrants, pour leur aide, conseils et suivi tout au long du stage. Je n'oublie pas non plus l'ensemble du laboratoire de Physique, les chercheurs, les techniciens, les gestionnaires, les doctorants ainsi les autres stagiaires pour leur accueil et leur compagnie qui fut fort sympathique, et qui ancrera ce stage comme un bon souvenir dans ma mémoire.

Table des matières

1	Introduction	1
2	Méthodologie	2
2.1	Dispositif expérimental	2
2.2	Premières observations	3
3	Résultats	5
3.1	Hauteur/aire	5
3.2	Fluidisation	8
3.3	Influence de la topographie de l'interface	10
3.4	Lien géophysiques	11
4	Conclusion et perspectives	12

1 Introduction

Dans les bassins sédimentaires s'accumulent pendant des millions d'années un mélange de grains solides érodés des continents, de débris biologiques (matière organique et micro-squelettes pélagiques) et des fluides piégés dans la matrice de grains au moment du dépôt. Les fluides représentent alors 40 à 80 % du volume total en subsurface (fond de mer ou de lac). Pendant l'enfouissement progressif, ce volume décroît rapidement avec la profondeur, jusqu'à 5 à 15 % vers 6000 m sous la surface, dû à des processus bio-physico-chimiques complexes qui permettent aux fluides de s'échapper et de migrer par percolation simple vers la surface. C'est ce qu'on appelle la diagenèse, le processus le plus lent connu sur Terre. Cependant, la diagenèse est ponctuée d'événements beaucoup plus brutaux, voire catastrophiques, qui remobilisent de grandes quantités de fluides de formation et/ou de fluides néoformés (par transformation de la matière organique) et/ou de fluides profonds (hydrothermaux venant de la croûte inférieure). En surpression, ces fluides riches en eau, méthane, CO₂, sulfures et hydrocarbures remontent à travers des structures focalisées appelées « pipes » [1]. Lorsqu'ils sont expulsés sur le fond, ils forment des structures de plusieurs centaines de mètres à plusieurs kilomètres de diamètre [2-7] dans lesquelles des communautés biologiques profondes se développent grâce à la chimiosynthèse [8].

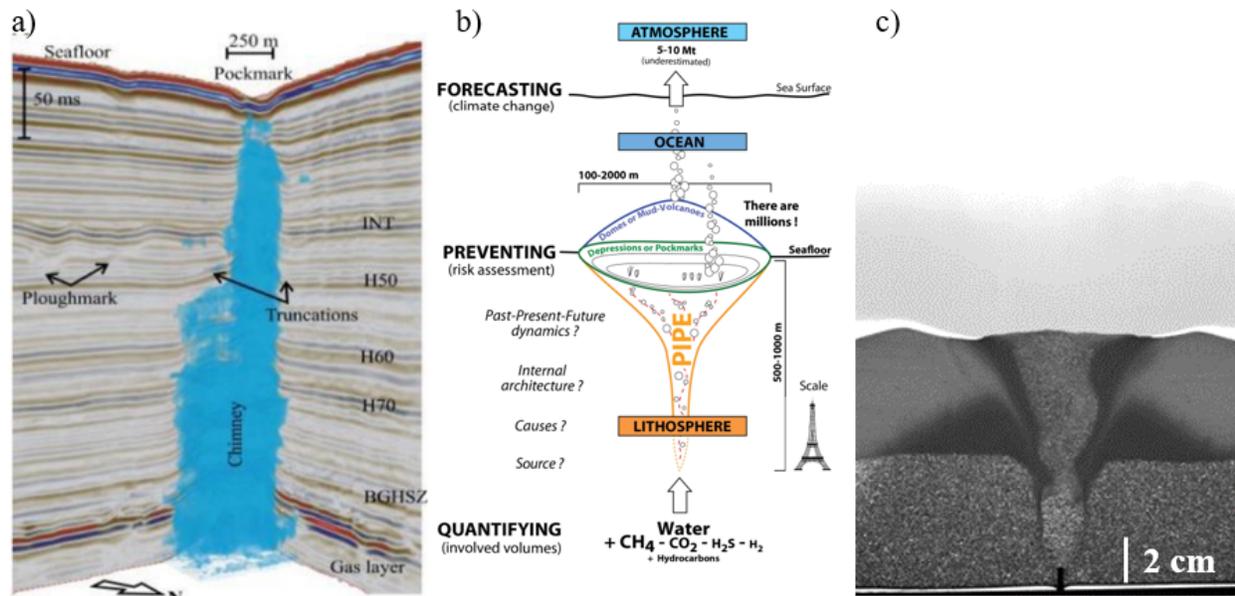


FIGURE 2 – a) Vue 3D d'une zone de migration de fluides alimentant un pockmark sur le fond de la mer [14]. b) Sketch des phénomènes géophysiques apparaissant lors de la remontée de fluide dans les bassins sédimentaires [15]. c) Formation d'une colonne fluidisée (liquide saturé en grains) lors de l'injection de fluide dans un milieu granulaire bicouche immergé.

Ces structures d'échappement de fluides focalisés (fig. 2a, fig. 2b), initialement considérées comme des curiosités dans les années 70, se comptent aujourd'hui par millions depuis que l'exploration océanique s'est étendue vers les grands fonds au-delà de 600 m de bathymétrie. Aujourd'hui elles représentent un enjeu majeur pour mieux comprendre leur contribution dans les émissions de gaz à effet de serre [9, 10], dans l'utilisation des réservoirs dont ils sont issus pour en faire des sites de stockage (CO₂ par exemple) [11] et pour le risque qu'elles engendrent sur les installations anthropiques sous-marines (câbles, fermes éoliennes, aquaculture etc.). En raison de leur contenu sous pression, ces structures n'ont jamais été forées et elles n'ont donc été qu'imaginées indirectement par méthodes géophysiques [1, 12, 13]. À ce jour, les processus mécaniques et physiques de remontée de fluides focalisés restent donc hypothétiques en l'absence de mesures in situ. Afin de contourner ces limitations techniques et technologiques, la modélisation (fig. 2c) peut permettre de mieux comprendre les processus en jeu en comparant les structures obtenues avec des analogues réels observés dans les bassins

sédimentaires.

C'est ce que nous nous proposons de réaliser dans le cadre de ce stage, qui a consisté en l'étude expérimentale de structures de migration de fluide dans un milieu granulaire bicouche immergé. De nombreux travaux précédents se sont déjà intéressés à la physique de ces structures, tant par des expériences de laboratoire [19–23] ou des simulations numériques [16, 24–26]. Ils ont permis de mettre en évidence différents régimes d'invasion : percolation (i.e. passage du fluide sans déplacement significatif des grains), fluidisation partielle (formation d'une cavité proche de l'injecteur) ou totale (depuis l'injecteur jusqu'à la surface libre), formation de motifs fractals, etc. Cependant, très peu d'études ont considéré la présence d'une interface - typiquement un milieu bi- ou multicouches - alors que c'est une situation typique dans les sols ou les bassins sédimentaires (voir fig.2a) et que cela peut modifier drastiquement la dynamique de fluidisation dans le cas d'une injection uniforme à la base [27]. Ici, nous considérons le cas d'une injection focalisée - analogue à la rupture d'un réservoir en profondeur, par exemple, à la base d'un milieu granulaire bicouche.

2 Méthodologie

2.1 Dispositif expérimental

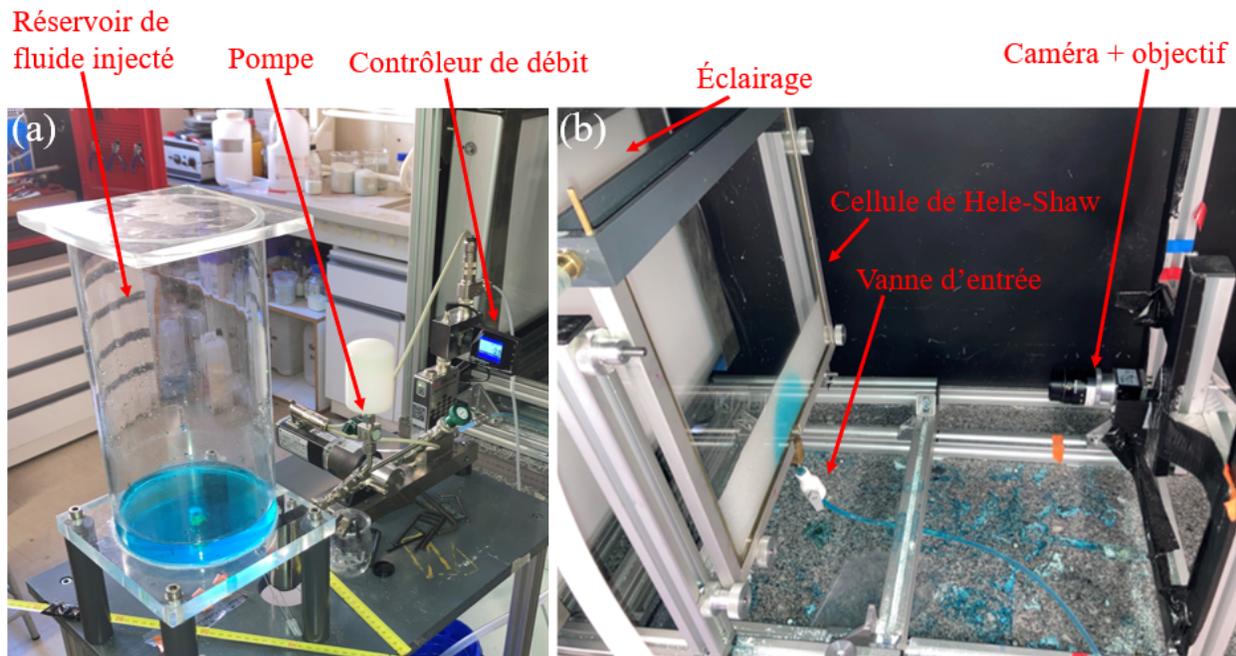


FIGURE 3 – a) Photo du dispositif d'injection de fluide. b) Photo de la cellule de Hele-Shaw utilisée, ainsi que de la caméra fixée en face de la cellule.

Le dispositif expérimental est une cellule de Hele-Shaw (fig.3) qui consiste en deux plaques de verre espacées de 2 mm, de hauteur 31.5 cm et de largeur 35 cm. Afin de modéliser les sédiments, nous utilisons deux types de billes de verre sphériques de granulométrie différente : des grains de $106\text{--}212\ \mu\text{m}$ (USF Matrasur), notés **petits grains** par la suite et des grains de $425\text{--}600\ \mu\text{m}$ (Wheelabator), notés **gros grains** par la suite. La granulométrie a été quantifiée précisément à l'aide d'un microscope (cf annexe 1).

La cellule est remplie d'eau distillée ($18\ \text{M}\Omega\cdot\text{cm}^{-1}$) puis on introduit par le haut (sédimentation) une hauteur h_g de gros grains sur laquelle on rajoute une hauteur h_p de petits grains. La hauteur totale de l'expérience est notée h_{tot} . Au temps $t = t_1$, on tourne la vanne d'entrée (fig.3b) et de l'eau distillée colorée en bleu (colorant alimentaire, la viscosité de l'eau n'est pas modifiée) à 0,6% en volume est injectée à débit constant Q au travers d'un injecteur cylindrique de diamètre interne 1.1 mm, lui-même

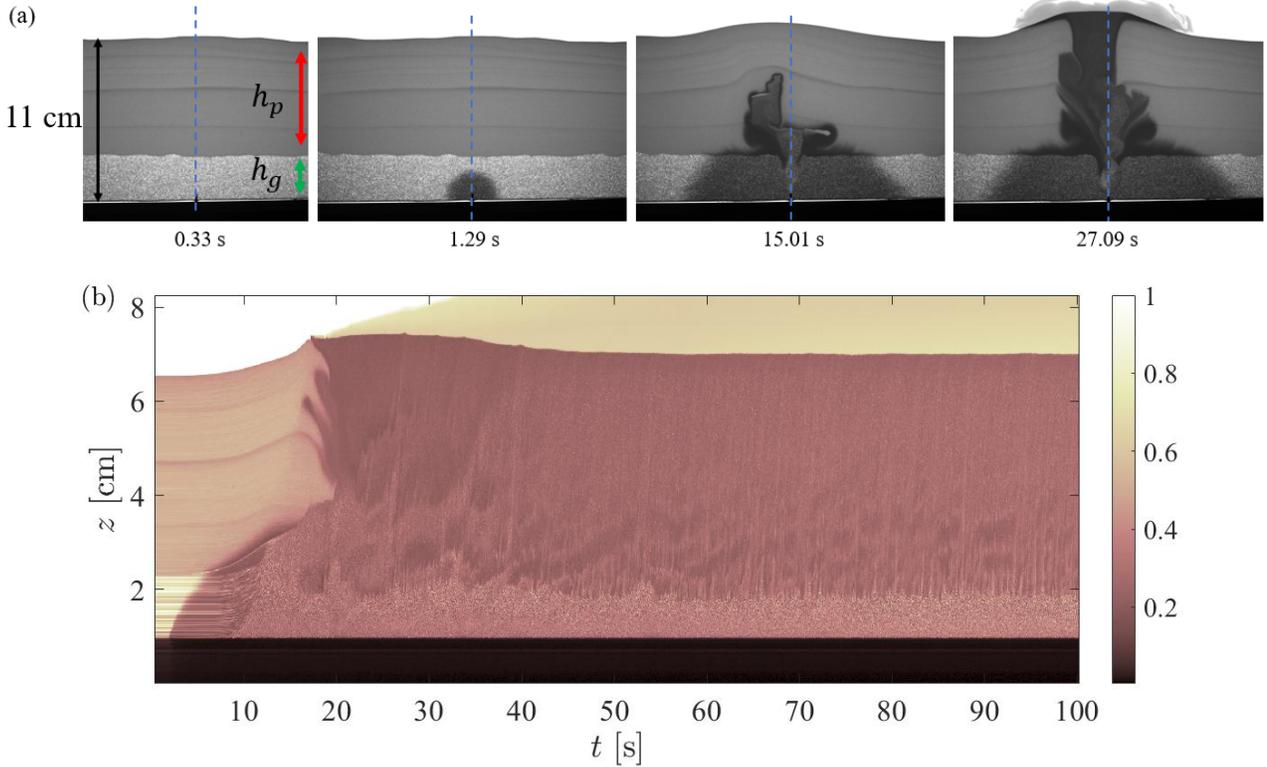


FIGURE 4 – Fluidisation dans un granulaire bicouche [$h_g = 3$ cm, $h_p = 8$ cm, $Q = 30$ mL/min]. (a) Évolution en fonction du temps. Le fluide injecté par le bas contient du colorant bleu foncé pour visualisation. (b) Spatiotemporel montrant l'intensité normalisée (échelle de couleur) selon la ligne verticale au-dessus de l'injecteur (ligne en pointillés bleu sur fig.4a) en fonction du temps.

fixé sur le bas de la cellule de Hele-Shaw. Le débit Q est imposé par un contrôleur Bronkhorst mini CORI-FLOW M14-AAD-22-0-S (2 – 100 mL/min), fixé sur une pompe Bronkhorst Tuthill 7.11.468. La cellule est éclairée par transmission d'un panneau Just NormLicht Classic Line et la visualisation sur l'ordinateur est faite avec une caméra CMOS 1" (BASLER monochrome acA2040-90um, de résolution 2048×2048 pixels) ainsi que des objectifs de 16 et 25 mm selon les expériences. Un code Matlab et une grille de calibration permettent ensuite de faire la correspondance pixel-cm. Les expériences ont été pour la plupart filmées à 36 fps (sauf mention contraire).

Les expériences ont été faites avec $Q = 30$ mL/min, cette valeur a été choisie car elle permet d'observer de la percolation pour une monocouche de gros grains et de la fluidisation pour une même monocouche de petits grains, ce qui permet d'espérer des effets intéressants pour du bicouche (cf Section 3). La température était d'environ 30°C .

2.2 Premières observations

La première remarque que l'on peut faire au vu des deuxièmes images sur les figures 4a) et 5a) est que le fluide injecté présente une zone d'invasion circulaire dans les gros grains, indiquant une invasion de type percolation [16]. Pour ces deux expériences, il y a tout d'abord un phénomène de percolation du fluide injecté dans les gros grains, c'est-à-dire que le fluide se déplace à travers les interstices entre les grains sans modifier la géométrie globale du système. On retrouve le fait que la géométrie globale n'est pas affectée sur les figures 4b) et 5b) lorsque l'on voit des lignes horizontales constantes dans le temps, sur la partie basse des spatiotemporels. Chaque ligne correspond à un gros grain sur la ligne pointillée bleue qui n'a pas bougé dans le temps.

Ensuite, on observe des différences selon les expériences :

- Sur la figure 4a), on voit qu'après le passage de l'interface, le fluide injecté fluidise la couche de

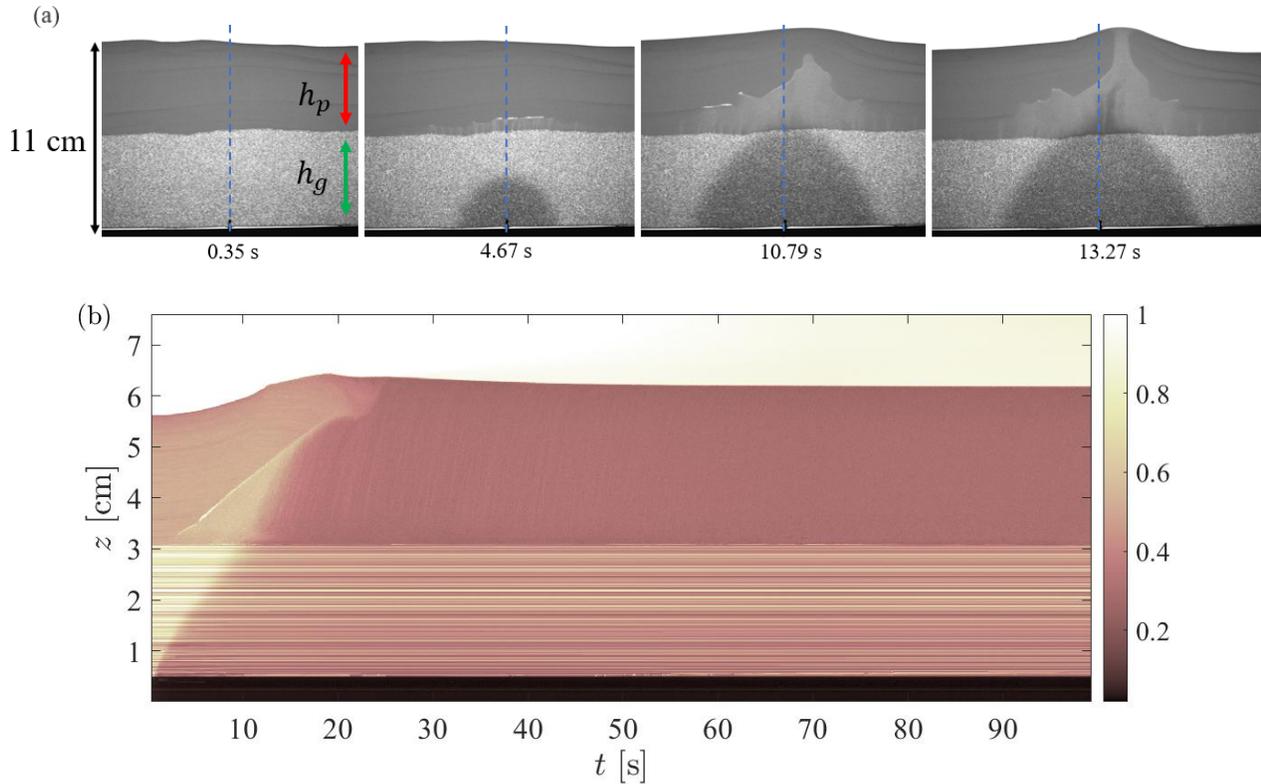


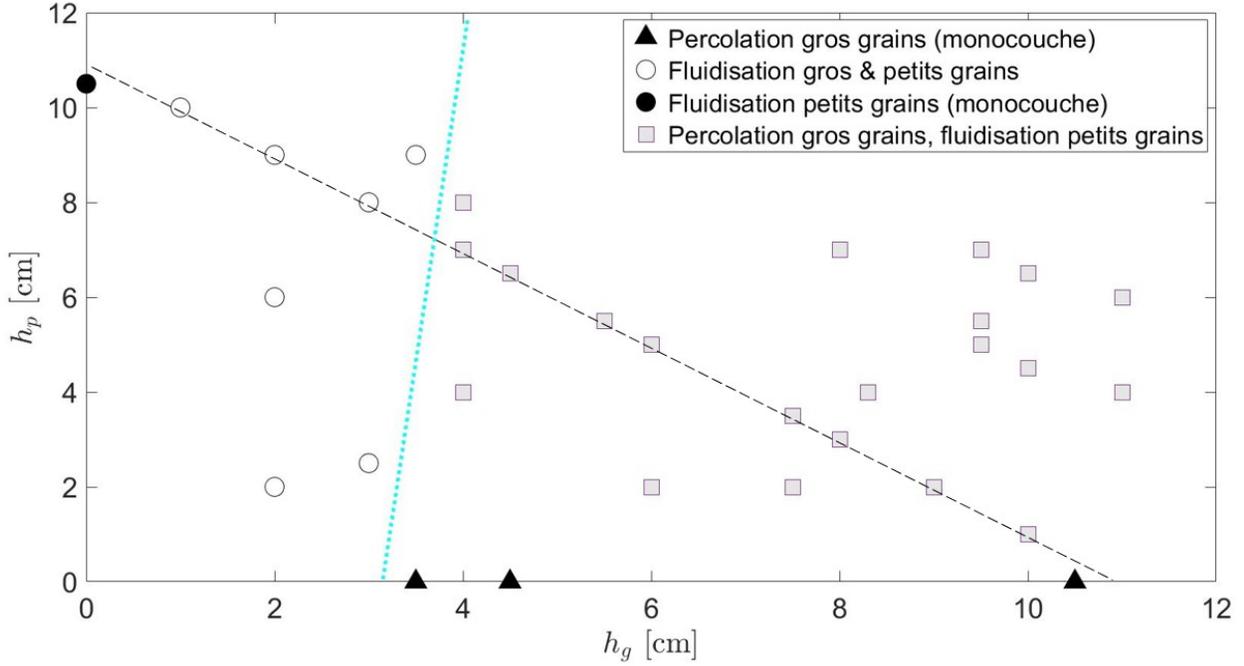
FIGURE 5 – Percolation dans les gros grains et fluidisation dans les petits grains. (a) Évolution en fonction du temps. Le fluide injecté par le bas contient du colorant bleu foncé pour visualisation [$h_g = 5.5$ cm, $h_p = 5.5$ cm, $Q = 30$ mL/min]. (b) Spatiotemporel montrant l'intensité normalisée (échelle de couleur) selon la ligne verticale au-dessus de l'injecteur (ligne en pointillés bleu sur fig. 5a) en fonction du temps.

petits grains, mais également la couche de gros grains. Le poids de la colonne de grains n'est donc plus suffisant pour maintenir la percolation dans les gros grains et la force de traînée du fluide l'emporte.

-Sur la figure 5a), on constate que la couche de petits grains est fluidisée car on voit la décompaction des petits grains juste au-dessus de l'interface petits grains-gros grains. En effet en entraînant le mouvement des grains, le fluide décompacte les grains et donc la luminosité (le panneau d'éclairage est derrière la cellule) augmente à travers les zones décompactées. Il faut néanmoins être prudent sur les interprétations car il pourrait très bien y avoir de la percolation de fluide au-dessus du front de décompaction dans les petits grains mais on ne peut pas le visualiser avec notre expérience. Ici, la force de traînée du fluide semble insuffisante (défocalisation de la sortie de fluide à l'interface entre les deux couches) pour entraîner la fluidisation des gros grains après la fluidisation des petits grains.

Dans les deux cas, on observe donc de la fluidisation. Il est aussi intéressant de noter que la position du contact entre le front de fluidisation et l'interface petits grains-eau immergente n'est pas située à la verticale de l'injecteur, mais dans un voisinage proche. Le fluide remonte par le chemin qui présente la résistance hydraulique la plus faible, et la compacité locale joue donc un rôle important dans le chemin emprunté.

On observe aussi que la hauteur et l'aire totale occupée par les grains augmente lorsqu'il y a de la fluidisation, car les grains sont moins compactés. Les figures 4b) et 5b) font état d'une hauteur plateau au-dessus de l'injecteur à temps long.

FIGURE 6 – Carte des régimes à débit fixé ($Q = 30$ mL/min).

3 Résultats

La figure 6 résume l'ensemble des expériences menées pour $Q = 30$ mL/min. Ce graphe fait apparaître deux zones (séparées par le trait pointillé bleu) de comportement différents pour des granulaires bicouche. On constate qu'il y a fluidisation des deux couches de granulaire pour des hauteurs "faibles" de gros grains, h_g semble jouer un rôle prépondérant sur le phénomène que l'on va obtenir.

On peut aussi noter la continuité des phénomènes, lorsqu'il y a percolation des gros grains en monocouche (▲), l'ajout de petits grains au-dessus ne change pas le fait que le fluide percole dans les gros grains.

Par la suite, nous allons étudier les expériences effectuées à $h_{tot} = 11$ cm (ligne pointillée noire fig.6).

3.1 Hauteur/aire

La figure 7 représente les variations temporelles de hauteur et d'aire. On notera h^* [cm] la variation de hauteur maximale atteinte sur la courbe $h(t)$ (non représentée); t_{h^*} [s] l'instant auquel h^* est atteint; h_{Rtot}^* [%] la variation de hauteur maximale relative par rapport à h_{tot} ; h_{Rp}^* [%] la variation de hauteur maximale relative par rapport à h_p (dans une partie du diagramme des régimes, seuls les petits grains sont fluidisés et donc décompactés, cela a donc du sens de considérer h_p). Les mêmes conventions de notation seront utilisées pour l'aire A , en notant A_{tot} l'aire initiale du milieu granulaire total et A_p l'aire initiale des petits grains.

Les courbes de la figure 7 font apparaître un plateau, ce qui semble indiquer un régime stationnaire à temps long. On constate aussi l'apparition de deux maxima h_{Rtot}^* et A_{Rtot}^* à des instants t_{h^*} et t_{A^*} différents, que l'on comparera dans la section suivante au temps de fluidisation.

La figure 8b) montre qu'en soustrayant l'aire initiale des petits grains à l'aire occupée par les grains en fonction du temps, les plateaux des courbes sont relativement bien ordonnés selon la proportion de gros grains.

Si on s'intéresse à la hauteur maximale atteinte par les grains pour chaque expérience de la série, on obtient le graphe 9. On observe deux tendances différentes selon le régime considéré, selon qu'il y ait fluidisation gros et petits grains ou percolation gros grains et fluidisation petits grains. Lorsqu'il y

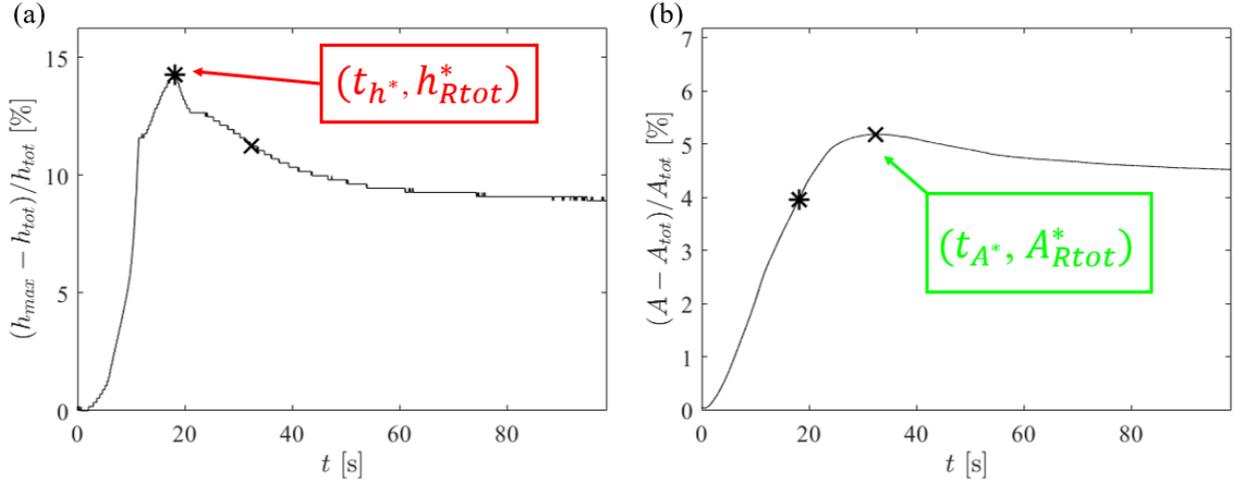


FIGURE 7 – a) Taux d’augmentation de la hauteur maximale (par rapport à la hauteur initiale, notée h_{tot}). b) Taux d’augmentation de l’aire maximale (par rapport à l’aire initiale notée A_{tot}) [$h_g = 5.5$ cm, $h_p = 5.5$ cm, $Q = 30$ mL/min].

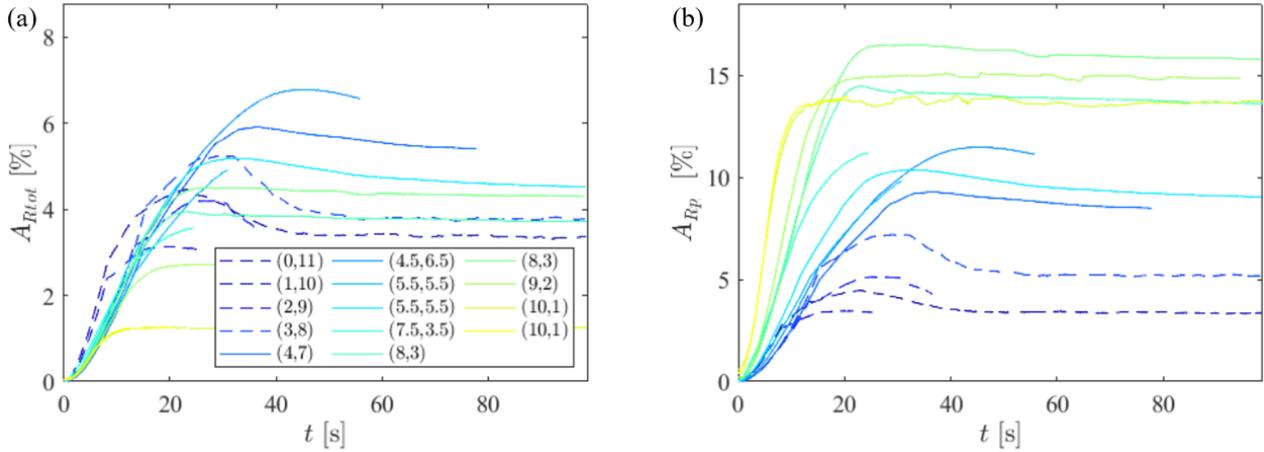


FIGURE 8 – a) Taux d’augmentation $A_{Rtot} [\%]$ pour la série $h_{tot} = 11$ cm. b) Taux d’augmentation $A_{Rp} [\%]$ pour la série $h_{tot} = 11$ cm. La légende fait apparaître la hauteur absolue de chaque type de grains pour l’expérience, avec la convention (h_g, h_p) .

a fluidisation des deux couches de granulaire, les taux d’augmentation de hauteur sont croissants (la hauteur totale est constante). En fait, à 0% de gros grains le front de fluidisation est très focalisé donc dès qu’il y a injection de fluide, il y a une remontée rapide. Lorsqu’on augmente le pourcentage de gros grains, le fluide injecté pénètre dans la couche supérieure en amenant les gros grains avec lui et il y a une propagation horizontale (type filon-couche en magmatisme) juste au-dessus de l’interface entre les deux couches qui permet de stocker du fluide. Ce fluide stocké, qui ne demande qu’à remonter, est expulsé très vite dès que le front de fluidisation atteint la surface libre, ce qui explique la croissance de cette partie de la courbe.

Lorsqu’il y a percolation gros grains et fluidisation petits grains, h_{Rp} est assez bruité tandis que h_{Rtot} décroît (fig.9). La décroissance s’explique par le fait que l’on observe de multiples sources secondaires à l’interface entre les deux couches de granulaire lorsque le pourcentage de gros augmente. En fait, le fluide pénètre la couche supérieure avec une source de largeur effective bien plus grande que la taille de l’injecteur (cela est dû à la propagation radiale du fluide lors de la percolation dans la couche inférieure). Le front de décompaction est donc quasi-horizontale et peine à se focaliser en un endroit lorsque h_p est faible, la couche supérieure est donc quasiment poussée en bloc (cf annexe 2).

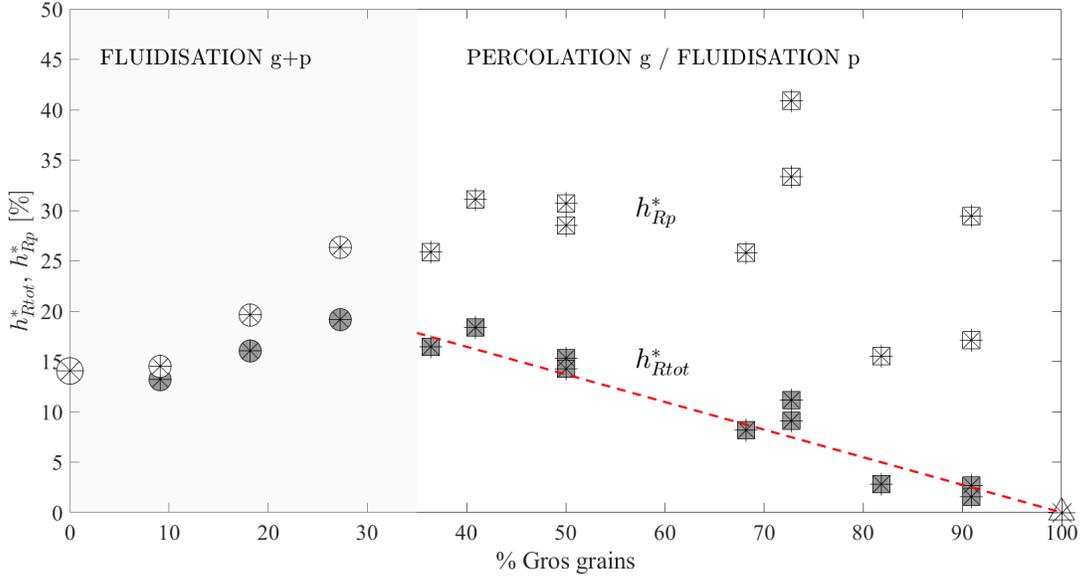


FIGURE 9 – Taux d'augmentation de la hauteur maximale en fonction du pourcentage de gros grains dans les expériences, selon que l'on prenne h_{tot} ou h_p comme référence.

L'augmentation de la taille de la couche inférieure a un effet défocalisant sur la remontée du fluide et la décroissance de h_{Rtot} interroge sur l'effet que pourraient avoir de multiples couches de granulaire.

Pour tenter de modéliser la décroissance de h_{Rtot} dans le régime perc g/fluid p, nous avons étudié la compacité des grains fluidisés (fig. 10), en sachant que la compacité initiale des grains est $\phi_0 \approx 60\%$ pour des grains aléatoirement empilés [17].

Par conservation du nombre de grains, on peut alors calculer ϕ_f dans un régime où l'on ne fluidise que les petits grains :

$$\phi_f = \phi_0 \times \frac{h_p}{h_p + h^*} \quad (1)$$

On constate que ϕ_f reste à peu près constant, on obtient alors $\phi_f \approx 47\%$ sur la figure 10.

Écrite différemment, l'équation (1) donne :

$$h^* = h_p \times \left(\frac{\phi_0}{\phi_f} - 1 \right) \quad (2)$$

En notant $\%_{gg}$ le pourcentage de gros grains, on combine avec :

$$h_p = h_{tot} \left(1 - \frac{\%_{gg}}{100} \right) \quad (3)$$

d'où :

$$h_{Rtot}^* = \left(1 - \frac{\%_{gg}}{100} \right) \left(\frac{\phi_0}{\phi_f} - 1 \right) \quad (4)$$

L'équation (4) permet de tracer la ligne pointillée rouge sur la figure 9. Le modèle semble bien correspondre ! Le modèle fonctionnait car ϕ_f peut être considéré constant dans le régime de percolation gros grains et fluidisation petits grains.

Attention, ϕ_0 (et donc ϕ_f) est certainement sur-estimé ici, car la polydispersité des grains n'est pas prise en compte.

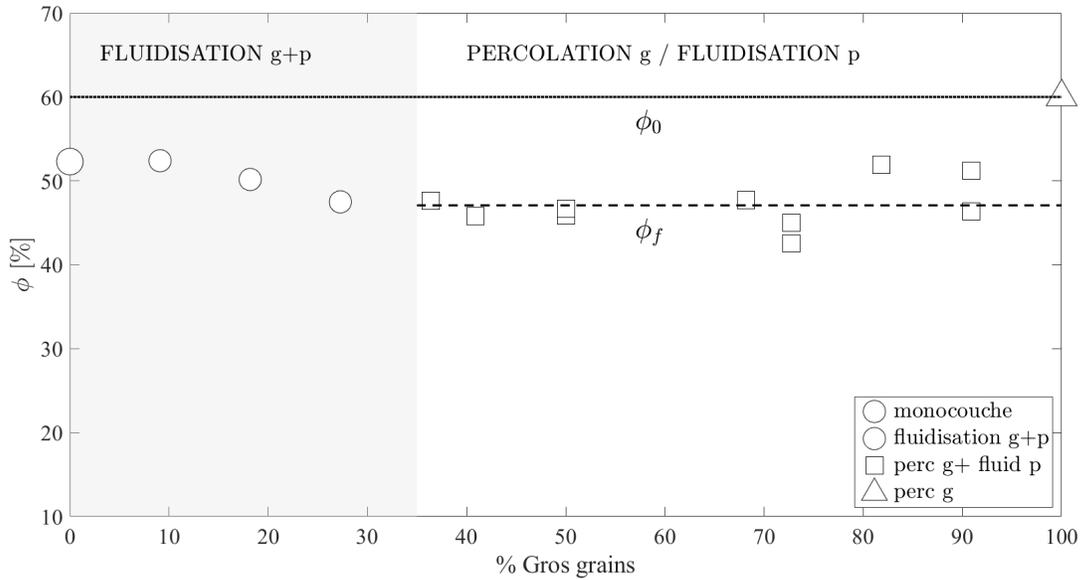


FIGURE 10 – Compacité des grains fluidisés en fonction du pourcentage de gros grains.

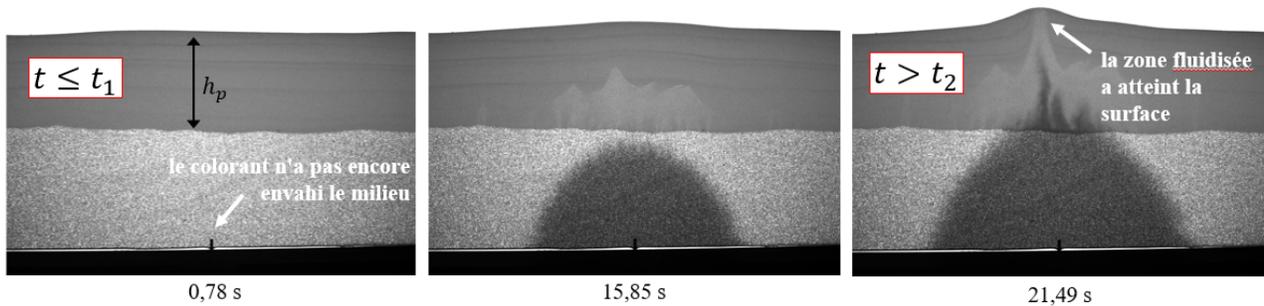


FIGURE 11 – Exemple de calcul du temps de fluidisation. [$h_g = 6$ cm, $h_p = 5$ cm, $Q = 20$ mL/min]

3.2 Fluidisation

Dans cette section, nous allons nous intéresser à la dynamique de fluidisation.

On définit t_f le temps de fluidisation comme $t_f = t_2 - t_1$ où t_2 est l'instant où le front de fluidisation atteint la surface libre, et t_1 l'instant où le fluide coloré est injecté (cf fig.11).

Attention, il ne s'agit pas là du temps que met le fluide injecté pour atteindre la surface ! En effet, lorsque du fluide est injecté, le liquide interstitiel entre les grains est repoussé vers la surface libre (incompressibilité du liquide) et c'est ce liquide interstitiel qui atteint la surface en premier, créant ainsi un chemin à suivre pour le fluide injecté. La décompaction fait apparaître des sources secondaires à l'interface entre les petits grains et les gros grains (fig.12a). Pour chaque expérience, après avoir choisi l'image qui faisait le mieux apparaître ces sources à l'interface, nous avons essayé plusieurs méthodes de détection automatique :

- Détection de l'interface puis détection de l'intensité sur une ligne parallèle à l'interface, sans succès car l'interface n'est jamais parfaitement horizontale.
- Récupération de l'intensité sur une ligne horizontale choisie par l'utilisateur, soustraction de l'enveloppe du signal (éclairage de fond) puis lissage spatial (moyenne ou médiane) sur la taille d'un gros grain (5 pixels), puis moyenne temporelle sur quelques images précédent et suivant l'image choisie (on effectuait une hypothèse de stationnarité des sources qui se vérifiait assez bien en visionnant les films). Nous avons ensuite essayé de tracer la fonction d'autocorrélation du signal d'intensité en cherchant le deuxième pic. Les résultats furent peu convaincants, nous

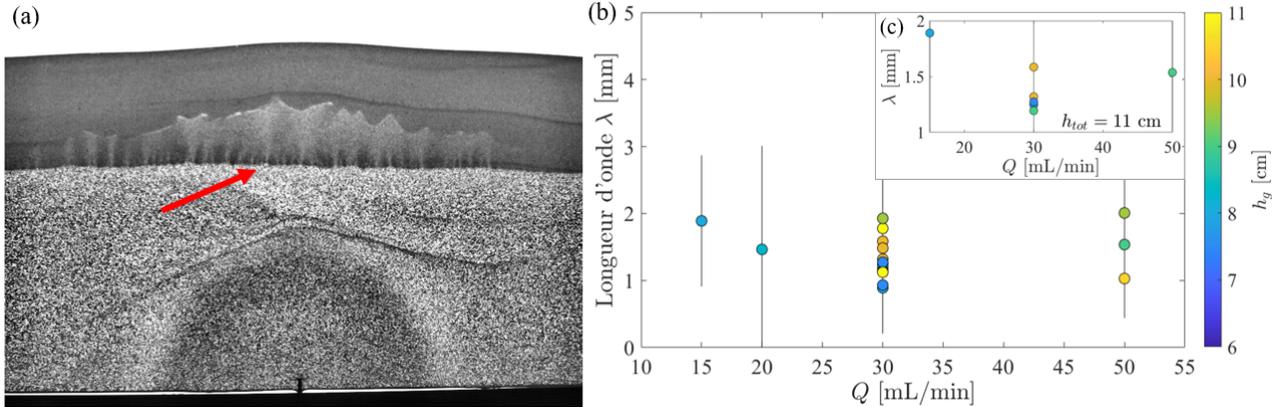


FIGURE 12 – a) Exemple d'apparition de sources secondaires à l'interface entre les deux couches, image obtenue en utilisant la fonction `adaphisteq` pour augmenter le contraste [$h_g = 8$ cm, $h_p = 3$ cm, $Q = 30$ mL/min]. b) Longueur d'onde des sources secondaires en fonction du débit pour toutes les expériences. c) Longueur d'onde en fonction du débit pour les expériences à $h_{tot} = 11$ cm.

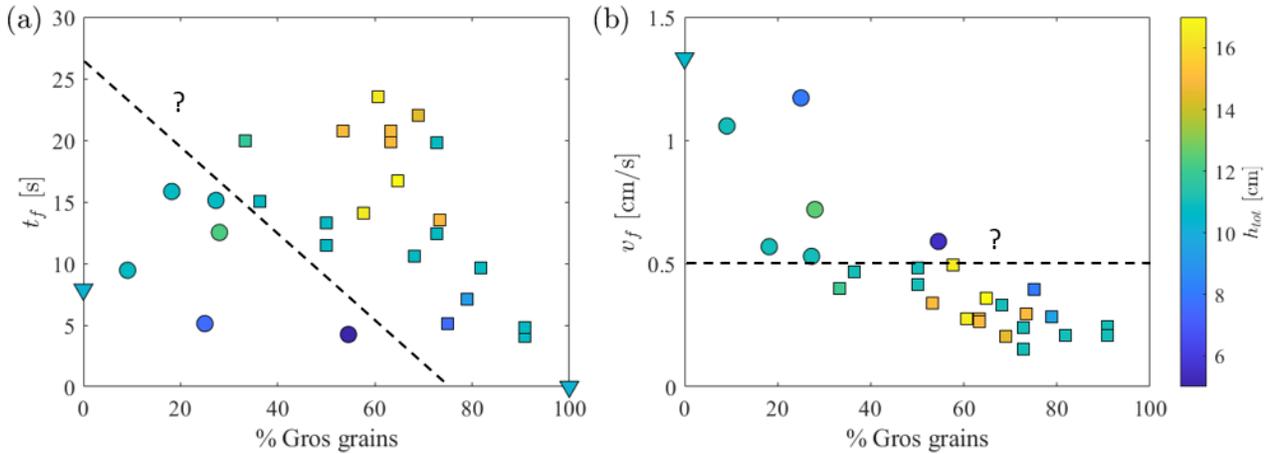


FIGURE 13 – Temps (a) et vitesse (b) de fluidisation en fonction du pourcentage de gros grains. \square : percolation gros grains, fluidisation petits grains, \circ : fluidisation gros et petits grains, ∇ : fluidisation en monocouche. Tout les points correspondent à des expériences avec $Q = 30$ mL/min. Les barres d'erreurs (3 images à 36 ips pour t_f soit ≈ 80 ms) sont plus petites que les symboles donc non représentées.

avons souvent des deuxième pics avec des amplitude très faibles, car la fonction d'autocorrélation est très sensible aux écarts entre les sources.

Finalement, nous avons détecté la position des sources manuellement car nous les voyions bien à l'œil sur la majorité des expériences. Les résultats sont obtenus figure 12b) pour différents débits et différentes hauteurs totales et figure 12c) pour différents débits avec $h_{tot} = 11$ cm. On remarque que la longueur d'onde affichée (≈ 2 mm) est environ quatre fois plus grande que la taille des gros grains (425-600 μm). Les barres d'erreurs sont relativement assez importantes pour chaque colonne de points et malgré tout, il ne semble pas y avoir de tendance marquée pour les variables étudiées : Q , h_g , h_{tot} et le pourcentage de gros grains. Peut-être que la longueur d'onde des sources secondaires dépend de paramètres qui étaient ici fixés, comme la taille des grains, le nombre d'interfaces traversé par le fluide interstitiel, l'épaisseur de la cellule de Hele-Shaw...

Pour la suite, on définit la vitesse moyenne de fluidisation comme $v_f = h_p/t_f$ où h_p désigne la hauteur de petits grains utilisés lors de l'expérience, et t_f le temps de fluidisation, et nous utiliserons les expériences $Q = 30$ mL/min. Sur la figure 13, on voit apparaître deux zones différentes sur chaque

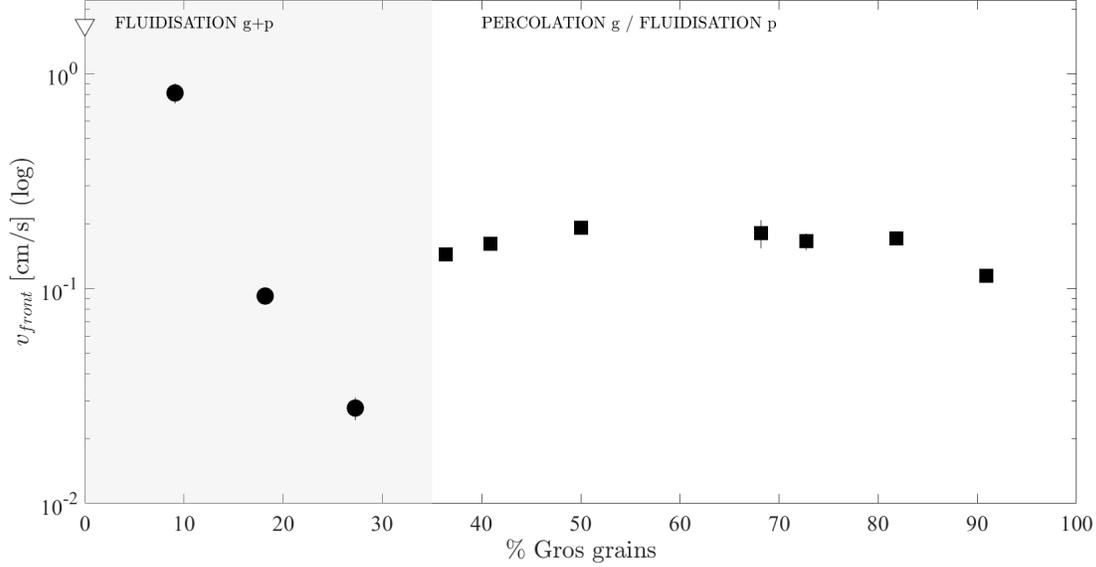


FIGURE 14 – Vitesse initiale du front de fluidisation en fonction du pourcentage de gros grains.

graphe (délimité par des pointillés), et cela en prenant en compte des expériences menées avec des hauteurs totales différentes. Il est intéressant de noter qu'il est possible d'avoir des t_f identiques pour des h_{tot} identiques mais des régimes différents (voir les points bleu turquoise fig.13a) de part et d'autre de la ligne pointillée). Les points bleus turquoises correspondent à la série $h_{tot} = 11$ cm, mais aucune tendance générale ne se dégage. Sur la figure 13b), on voit apparaître une vitesse moyenne critique de fluidisation (pointillés noirs) que l'on notera v_f^c , au-dessus de laquelle on observe la fluidisation des deux couches de granulaires.

Nous décidons alors de comparer ces vitesses aux vitesses instantanées du front de décompaction : nous avons accès au spatiotemporel qui donne l'altitude en fonction du temps, pour une position x qui est celle de l'injecteur (exemple fig.5b). Lorsqu'on observe les spatiotemporels, on voit la trace du front de décompaction qui remonte à la surface. On isole alors ces profils de décompaction (position verticale en fonction du temps) et on les dérive afin d'obtenir une vitesse initiale (la trace du front est plus bruitée sur le spatiotemporel, une fois passé les instants initiaux) de remontée, que l'on note v_{front} . On regroupe les résultats obtenus pour la série $h_{tot} = 11$ cm sur la figure 14. La courbe semble faire apparaître deux tendances différentes selon les régimes, d'une part une vitesse quasi-constante $v_{front} \approx 1.16$ cm.s⁻¹ lorsqu'il y a fluidisation uniquement de la couche supérieure, et une décroissance exponentielle de v_{front} lorsqu'il y a fluidisation des deux couches de granulaire. Il y a un phénomène intéressant ici : la décroissance exponentielle semble provenir du fait qu'il y a deux couches de granulaires qui sont fluidisées, on peut donc se demander ce qu'il se passerait s'il y avait plusieurs couches... Dans les deux régimes, nous avons $v_{front} < v_f^c$ donc il n'y aurait fluidisation que de la couche supérieure. Néanmoins, la fluidisation de la couche inférieure (régime fluidisation des gros grains et petits grains) s'explique par le fait que le front de fluidisation accélère une fois que ce dernier est focalisé (voir la forme convexe du profil du front de fluidisation sur fig.5b) donc pour ces expériences, la convexité du profil de décompaction est suffisante pour qu'à un instant donné, $v_{front} > v_f^c$.

3.3 Influence de la topographie de l'interface

Lors des expériences menées précédemment, il nous semblait apparaître que la forme de l'interface jouait un rôle non négligeable dans la focalisation du front de fluidisation. En effet, on voit (fig.15) que la fluidisation a lieu préférentiellement au-dessus des pics de gros grains. Le fluide interstitiel percole dans les gros grains et la fluidisation a lieu sur des zones où le poids de la colonne de petits grains est faible. La focalisation ne s'effectue donc pas nécessairement à la verticale de l'injecteur (ex : fig.4a,

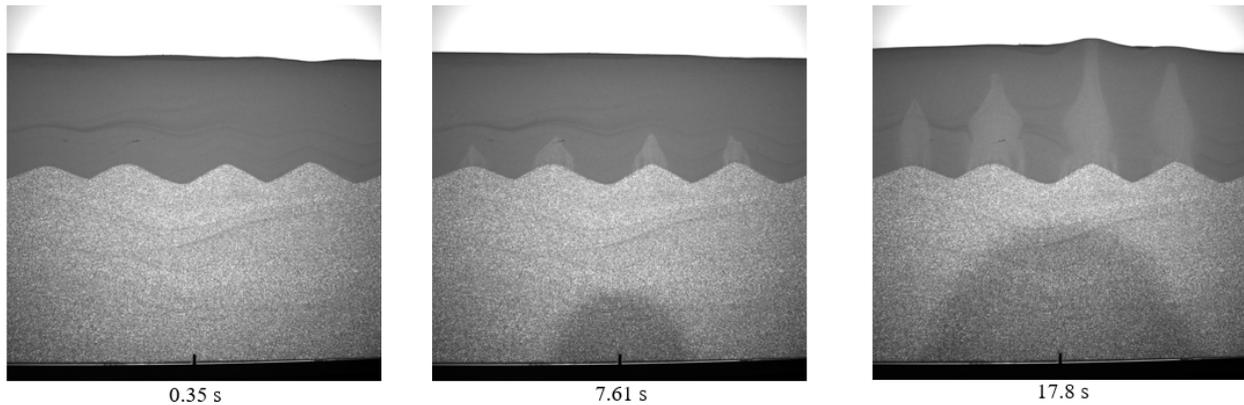


FIGURE 15 – *Expérience avec une interface volontairement non plane* [$h_{gmoy} = 10$ cm, $h_{pmoy} = 6.5$ cm, $Q = 30$ mL/min].

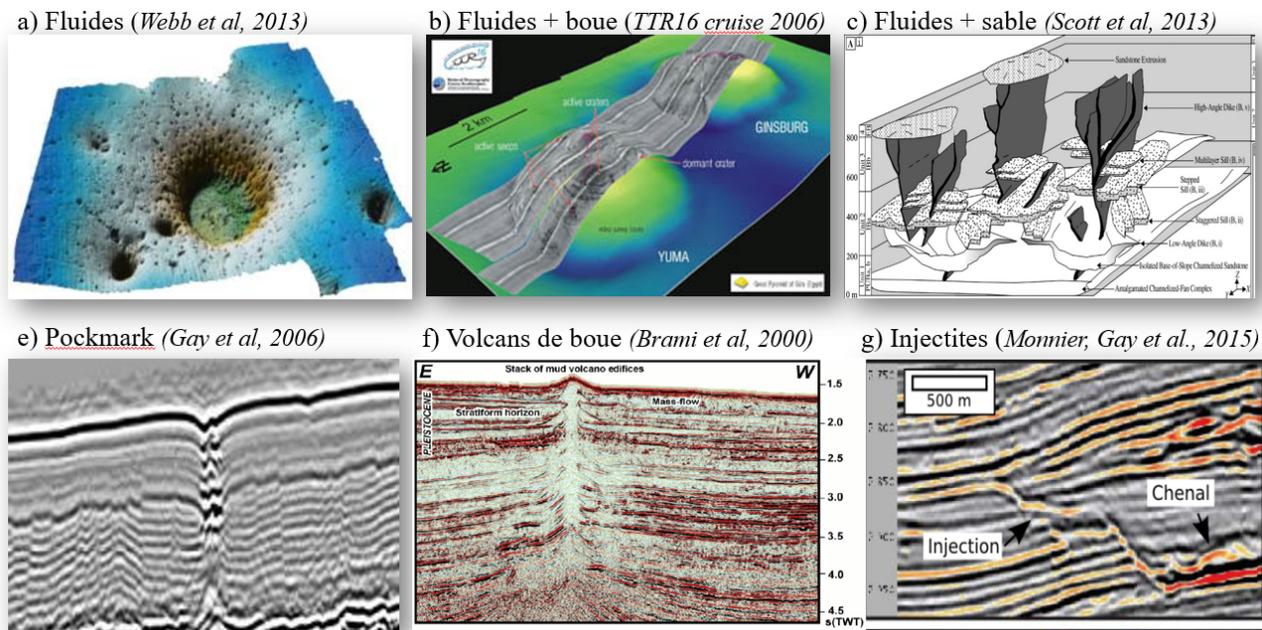


FIGURE 16 – Différents phénomènes observés dans les bassins sédimentaires.

fig.5a, fig.11, fig.15). Cela donne l'impression que le fluide choisit son chemin, la présence de bosses facilitant la focalisation.

Les résultats énoncés ci-dessus sont donc à prendre avec du recul car l'interface n'était jamais parfaitement plane lors de chaque expérience.

3.4 Lien géophysiques

Dans les bassins sédimentaires ont été identifiées depuis quelques décennies des structures d'échappements de fluides aux morphologies très variées (fig.16). Elles peuvent former des reliefs positifs (volcans de boue = transport de fluide+boue) ou négatifs (pockmarks = transport de fluide seul) qui ont toujours été considérées comme ayant été formées par des processus différents. Or, les prélèvements récents effectués dans ces structures montrent qu'à certaines périodes des volcans de boue ne transportent que du fluide et, a contrario, des pockmarks peuvent aussi transporter de la boue ou du sable [18]. La modélisation a ainsi montré que la morphologie d'une sortie de fluides sur le fond dépend surtout de son stade d'évolution dans le temps, avec un relief positif en début de vie qui se tasse progressivement et s'élargit dans un stade plus évolué (stage de Manon Pochet, 2018). Cela permettrait

de connaître le stade d'évolution d'une sortie de fluides à partir de sa morphologie et de ses propriétés physiques. La migration de fluides par percolation dans la couche inférieure induit très tôt une remobilisation du fluide de formation (interstitiel) qui va « pousser » le fluide dans la couche supérieure. C'est une notion extrêmement importante puisque cela signifie finalement que le stade précoce d'initiation d'une sortie de fluide est composé de fluides interstitiels qui tracent en quelque sorte le chemin pour les fluides qui arrivent de plus profond. Autrement dit, il doit exister des zones qui n'expulsent que des fluides interstitiels mais qui représentent le stade naissant de futures sorties de fluides plus profonds. La génération de sources secondaires est également très intéressante puisqu'elle suppose qu'une source unique en profondeur peut donner lieu à plusieurs conduits de migration de fluides au niveau d'une interface de granulométrie différente. Or, ces interfaces sont particulièrement fréquentes dans le millefeuille géologique. Ces résultats peuvent permettre d'améliorer l'interprétation des conduits de migration de fluides sur l'imagerie géophysique.

4 Conclusion et perspectives

Nous avons montré au cours de ce stage différents phénomènes pouvant apparaître lors de la remontée d'un fluide dans un milieu granulaire bicouche immergé :

- les différentes possibilités de remontée du fluide (percolation, fluidisation)
- le déplacement du fluide interstitiel lors de l'injection d'un fluide sous les couches de granulaire
- l'avancée radiale du fluide injecté lors de la percolation
- l'augmentation de la taille du milieu due à la décompaction
- la focalisation du front de fluidisation
- l'apparition de sources secondaires au-dessus de la première couche
- la vitesse du front de fluidisation qui semble avoir une tendance différente selon le nombre de couches fluidisées
- l'importance de la topographie de l'interface pour la focalisation du front de fluidisation

Toutefois, il reste de nombreuses possibilités à explorer sur ce sujet :

- vérifier la répétabilité des expériences en aplanissant les interfaces
- faire varier le débit à hauteur constante
- faire varier la taille de la cellule de Hele-Shaw afin de limiter le confinement et mieux modéliser les systèmes réels
- changer la granulométrie/le matériau des granulaires utilisés afin de mieux modéliser les bassins sédimentaires
- travailler à pression fixée plutôt que débit fixé pour finalement mieux modéliser les échappements de fluides naturels
- insérer un capteur de pression afin de vérifier certaines lois (Darcy, Ergun)
- étudier l'influence du nombre de couches de granulaire afin de mieux modéliser les multicouches observées sur les observations géologiques
- s'intéresser à la dynamique d'arrêt pour mieux comprendre la fin de vie des cheminées de remontée de fluide

Références

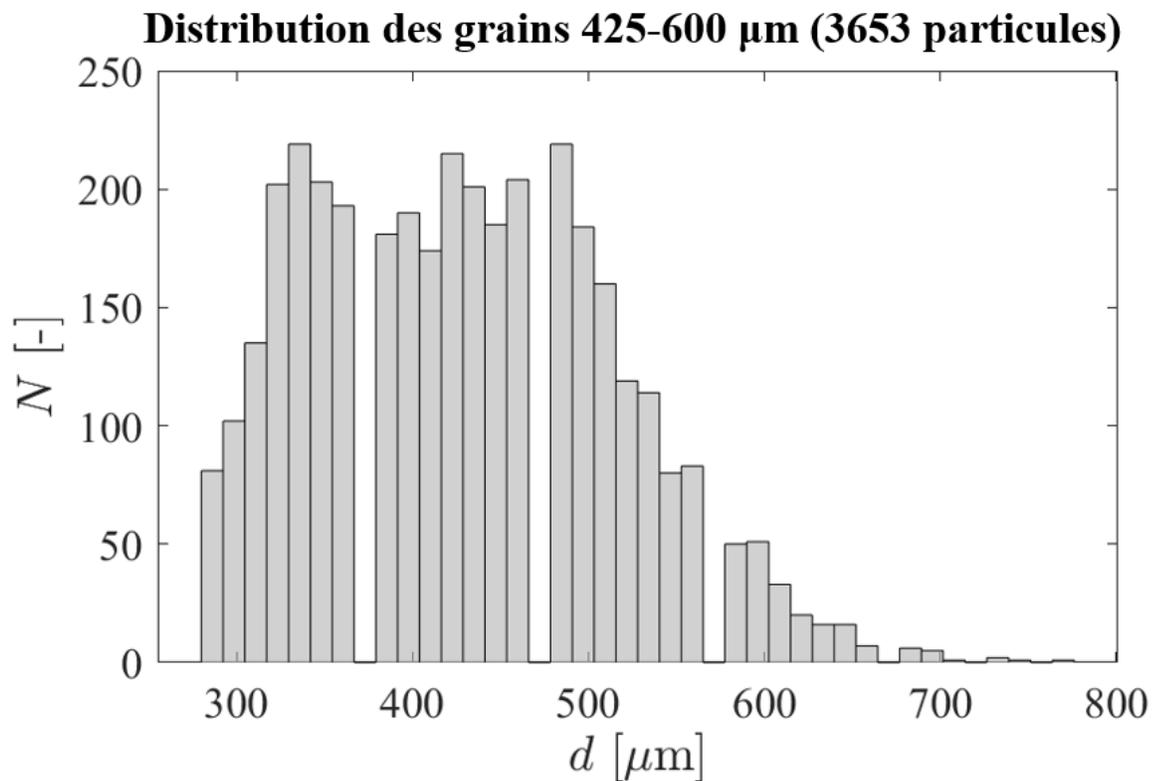
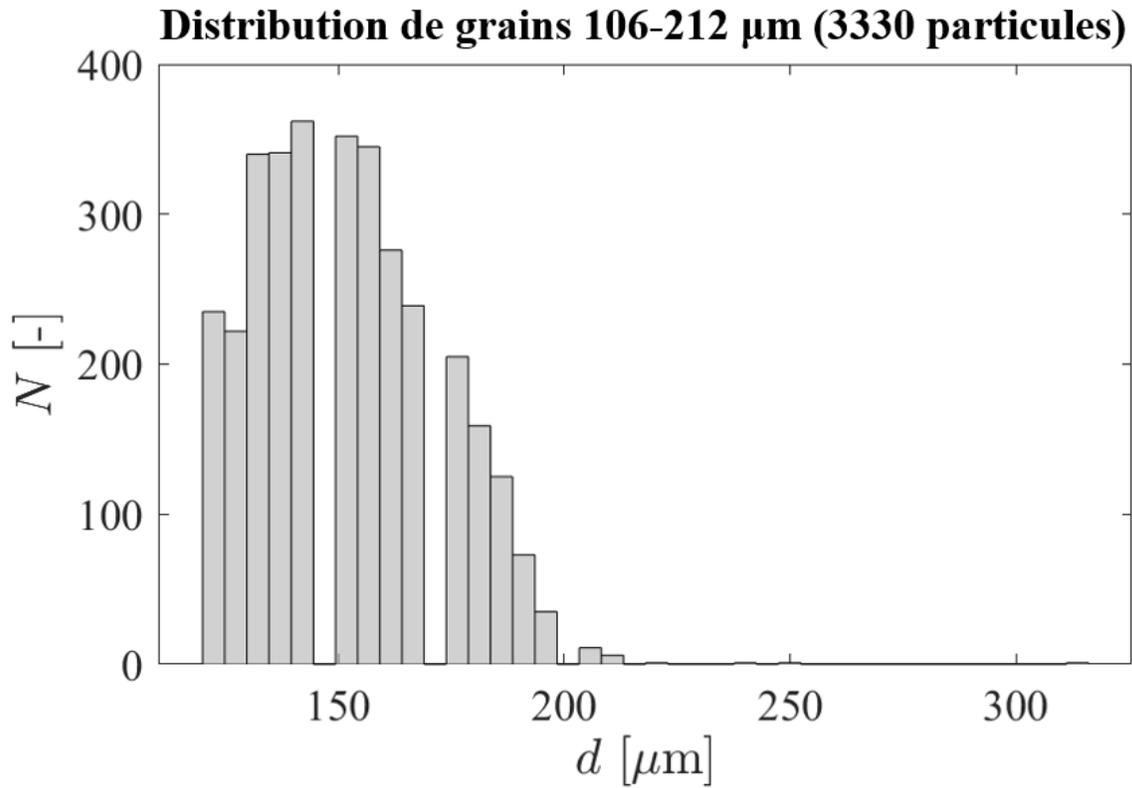
- [1] Gay, A., Lopez, M., Berndt, C. and Séranne, M. 2007. Geological controls on focused fluid flow associated with seafloor seeps in the Lower Congo Basin. *Marine Geology*, 244, 68-92, <https://doi.org/10/c7x8w7>.
- [2] Huuse, M., Jackson, C.A.-L., Van Rensbergen, P., Davies, R.J., Flemings, P.B. and Dixon, R.J. 2010. Subsurface sediment remobilization and fluid flow in sedimentary basins : an overview. *Basin Research*, 22, 342-360, <https://doi.org/10/c5xq3v>.
- [3] Anka, Z., Berndt, C. and Gay, A. 2012. Hydrocarbon leakage through focused fluid flow systems in continental margins. *Marine Geology*, 332-334, 1-3, <https://doi.org/10/gn2rrm>.
- [4] Monnier, D., Imbert, P., Gay, A., Mourgues, R. and Lopez, M. 2014. Pliocene sand injectites from a submarine lobe fringe during hydrocarbon migration and salt diapirism : a seismic example from the Lower Congo Basin. *Geofluids*, 14, 1-19, <https://doi.org/10/f5r5t8>.
- [5] Monnier, D., Gay, A., Imbert, P., Cavailhes, T., Soliva, R. and Lopez, M. 2015. Sand injectites network as a marker of the palaeo-stress field, the structural framework and the distance to the sand source : Example in the Vocontian Basin, SE France. *Journal of Structural Geology*, 79, 1-18, <https://doi.org/10/f7s979>.
- [6] Gay, A. and Migeon, S. 2017. Geological fluid flow in sedimentary basins Gay, A. and Migeon, S. (eds). *Bulletin de la Société géologique de France*, 188, E3, <https://doi.org/10/gn3m63>.
- [7] Zvirtes, G., Hurst, A., Philipp, R.P., Palladino, G. and Grippa, A. 2021. The Tumey Giant Injection Complex, Tumey Hill, California (USA). *Geological Society, London, Special Publications*, 493, 181-214, <https://doi.org/10/gn2xpv>.
- [8] Sahling, H., Borowski, C., et al. 2016. Massive asphalt deposits, oil seepage, and gas venting support abundant chemosynthetic communities at the Campeche Knolls, southern Gulf of Mexico. *Biogeosciences*, 13, 4491-4512, <https://doi.org/10/f83ws5>.
- [9] Saunois, M., Bousquet, P., et al. 2016. The global methane budget 2000-2012. *Earth System Science Data*, 8, 697-751, <https://doi.org/10/f3t6gf>.
- [10] Etiopé, G. and Oehler, D.Z. 2019. Methane spikes, background seasonality and non-detections on Mars : A geological perspective. *Planetary and Space Science*, 168, 52-61, <https://doi.org/10.1016/j.pss.2019.02.001>.
- [11] Furre, A.-K., Eiken, O., Alnes, H., Vevatne, J.N. and Kiær, A.F. 2017. 20 Years of Monitoring CO₂-injection at Sleipner. *Energy Procedia*, 114, 3916-3926, <https://doi.org/10/gn3w7h>.
- [12] Løseth, H., Wensaas, L., Arntsen, B., Hanken, N.-M., Basire, C. and Graue, K. 2011. 1000 m long gas blow-out pipes. *Marine and Petroleum Geology*, 28, 1047-1060, <https://doi.org/10/ft9cfq>.
- [13] Andresen, K.J. 2012. Fluid flow features in hydrocarbon plumbing systems : What do they tell us about the basin evolution? *Marine Geology*, 332-334, 89-108, <https://doi.org/10/gn2q69>.
- [14] Plaza-Faverola, A., Büinz, S. and Mienert, J. 2011. Repeated fluid expulsion through sub-seabed chimneys offshore Norway in response to glacial cycles, *Earth and Planetary Science Letters*, 305, 3-4, 297-308, <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2011.03.001>.
- [15] Vidal, V., and Gay, A. 2022. Future challenges on focused fluid migration in sedimentary basins : Insight from field data, laboratory experiments and numerical simulations. *Papers in Physics*, 14, 140011. <https://doi.org/10.4279/pip.140011>
- [16] Cui X., Li J., Chan A., and Chapman D. 2014. Coupled DEM-LBM simulation of internal fluidisation induced by a leaking pipe, *Powder Technology*, 254, 299-306, <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2014.01.048>.
- [17] Averardi, A., Cola, C., Zeltmann, S.E. and Gupta, N. 2020. Effect of particle size distribution on the packing of powder beds : A critical discussion relevant to additive manufacturing, *Materials Today Communications*, 24, 100964, <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.100964>.

- [18] Cao, L., Sun, Q., and Magee, C. 2023. Reutilization of fluid flow pathways over 54 million years, offshore New Zealand. *Basin Research*, 00, 1-15. <https://doi.org/10.1111/bre.12801>.
- [19] Zoueshtiagh, F. and Merlen, A. 2007. Effect of a vertically flowing water jet underneath a granular bed. *Physical Review E*, 75, 5. doi : 10.1103/PhysRevE.75.056313.
- [20] Nermoen, A., Galland, O., Jettestuen, E., Fristad, K., Podladchikov, Y., Svensen, H., and Malthe-Sørenssen, A. 2010. Experimental and analytic modeling of piercement structures, *J. Geophys. Res.*, 115, B10202, doi : 10.1029/2010JB007583.
- [21] Philippe, P. and Badiane, M. 2013. Localized fluidization in a granular medium, *Physical Review E*, 87, 4. doi : 10.1103/PhysRevE.87.042206.
- [22] Mena, S., Philippe, P., Brunier-Coulin, F. and Curtis, J. 2017. An experimental study of the transient regime to fluidized chimney in a granular medium, *EPJ Web Conf.*, 140. doi : 10.1051/epj-conf/201714009030
- [23] Juanes, R., Meng, Y., and Primkulov, B. K. 2020. Multiphase flow and granular mechanics, *Physical Review Fluids*, 5, 110516. doi : 10.1103/PhysRevFluids.5.110516.
- [24] Montellà, E. P., Toraldo, M., Chareyre, B. and Sibille, L. 2016. Localized fluidization in granular materials : Theoretical and numerical study, *Physical Review E.*, 94, 052905. doi : 10.1103/PhysRevE.94.052905.
- [25] Ngoma, J., Philippe, P., Bonelli, S., and Radjaï, F. and Delenne, J.-Y. 2018. 2D numerical simulation of chimney fluidization in a granular medium using a combination of discrete element and lattice Boltzmann methods, *Physical Review E.*, 97, 052902. doi : 10.1103/PhysRevE.97.052902.
- [26] Carrara, A., Breard, E. C. P., Dufek, J. and Fullard, L. 2020. The basal friction coefficient of granular flows with and without excess pore pressure : Implications for pyroclastic density currents, water-rich debris flows, and rock and submarine avalanches. *Journal of Geophysical Research : Solid Earth*, 125, e2020JB020203. <https://doi.org/10.1029/2020JB020203>.
- [27] Nichols, R.J., Sparks, R.S.J. and Wilson, C.J.N. 1994. Experimental studies of the fluidization of layered sediments and the formation of fluid escape structures. *Sedimentology*, 41, 233-253. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.1994.tb01403.x>

Annexes

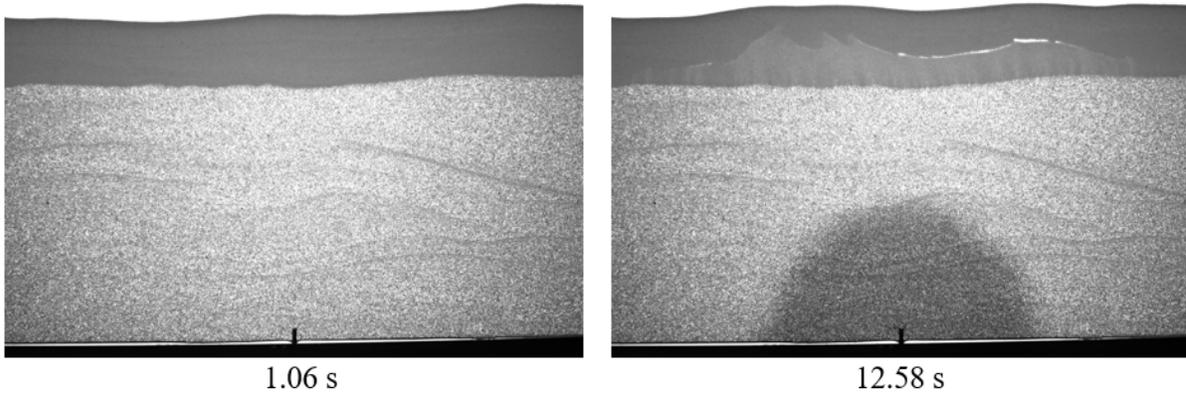
Annexe 1

Sur ces deux graphes sont représentés les histogrammes qui représentent la distribution des tailles de particules pour les différents échantillons.



Annexe 2

[$h_g = 9$ cm, $h_p = 2$ cm, $Q = 30$ mL/min]



Ici, on voit que pour des hauteurs de petits grains faibles, le front de fluidisation peine à se focaliser en un endroit pour remonter à la surface libre. Les petits grains sont alors poussés en bloc.