
Mise en suspension d'un milieu granulaire immergé par remontée de bulles d'air

Résumé :

Les écoulements triphasiques, comme un système liquide-solide-gaz par exemple, s'avèrent intéressants d'un point de vue fondamental car ils font intervenir différents mécanismes physiques à différentes échelles spatiales et temporelles (écoulement dans un milieu poreux, forces sur des grains de la centaine de micromètre...). D'autre part, au niveau pratique, ce type d'écoulement se retrouve en géophysique, pour comprendre des phénomènes tels que le piégeage de bulles de dioxyde de carbone dans des sédiments, ou dans l'industrie pour la catalyse hétérogène.

Le but de ce stage fût l'étude d'un écoulement de bulles à travers d'un milieu granulaire immergé dans un liquide, et du comportement du milieu granulaire. L'étude s'est portée notamment sur la mise en suspension de ce dernier, et sur les paramètres gouvernant ce type d'écoulement, comme la masse volumique des grains par exemple.

Mots clefs : *Milieux granulaires immergés, bulles, sédimentation, écoulements triphasiques*

Stage encadré par : **Sylvain Joubaud**

sylvain.joubaud@ens-lyon.fr / tél. (+33) 4 72 72 83 79

Laboratoire de physique de l'ENS de Lyon

Laboratoire de Physique (UMR CNRS 5672), ENS de Lyon 46 allée d'Italie F-69364

LYON CEDEX 07 FRANCE

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



Remerciements

Je voudrais tout d'abord remercier Thierry Dauxois, directeur du Laboratoire de Physique de l'ENS de Lyon, pour son accueil chaleureux dans son laboratoire.

Ensuite, je voudrais grandement remercier mes encadrants de stage et futurs directeurs de thèse, Sylvain Joubaud et Valérie Vidal, avec qui j'ai eu plaisir à travailler durant ces quatre mois, plaisir qui durera j'en suis sûr, au cours des trois prochaines années.

Je souhaiterais remercier aussi Tess Homan, post-doctorante au laboratoire, pour son encadrement et son aide précieuse pendant ces quatre mois de stage.

Je voudrais aussi remercier l'ensemble du laboratoire, dans lequel les chercheurs sont souriants et souvent de bonne humeur, et donc où il est très agréable de travailler, le tout dans une excellente ambiance.

J'aimerais remercier particulièrement les personnes du labo ayant participé aux matchs de foot le vendredi midi, qui permettait de finir la semaine de façon sportive et détendue.

Enfin j'aimerais remercier les collègues avec qui je prenais mes repas le midi au RU, dont les conversations permettaient la détente et le repos nécessaire pour continuer le travail l'après-midi, ainsi que les gens du foyer avec qui je buvais une petite bière rafraichissante (voire deux...) après le boulot pour bien terminer la journée.

Ce travail a été réalisé grâce au soutien financier du LABEX iMUST (ANR-10-LABX-0064) de l'Université de Lyon, dans le cadre du programme Investissements d'Avenir" (ANR-11-IDEX-0007) géré par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR).

Table des matières

1	Suspensions et milieux granulaires immergés : Écoulement biphasique	2
1.1	Vitesse de Stokes	2
1.2	Loi de Darcy	3
1.3	Etude expérimentale de la sédimentation	3
2	Mise en suspension du PVC : Écoulement triphasique	5
2.1	Description du phénomène	5
2.2	Etude expérimentale de la "zone morte"	6
2.3	Etude expérimentale de la suspension	10
3	Mise en évidence des paramètres contrôlant l'écoulement triphasique	11
3.1	Taille des bulles	12
3.2	Influence de la différence de densité	15
3.3	Influence de la largeur de la cuve	16

Introduction

Les écoulements diphasiques eau-grains ou gaz-grains [1, 2] ainsi que les écoulements dans les milieux poreux fixes [3, 4] ou au travers de milieux granulaires non contraints [5, 6] sont étudiés depuis longtemps. Cependant, le cas triphasique (liquide-grains-gaz) reste peu ou mal compris. L'étude d'un écoulement de gaz à travers un milieu granulaire immergé est une chose plutôt difficile : celui-ci faisant intervenir trois phases différentes, il y a beaucoup d'interactions à prendre en compte (interactions entre phases, interactions hydrodynamiques entre les grains...) et plusieurs mécanismes, qui n'agissent pas tous à la même échelle spatiale ou temporelle. On retrouve ces phénomènes dans des domaines industriels et géophysiques (cf. figure 1). En effet la présence de gaz dans des sédiments se révèle importante, notamment sous l'effet de fortes contraintes où le gaz est relâché et peut provoquer alors des fissures [7–10]. Dans le contexte industriel (pétrochimie, alimentaire...), ce type de mélange triphasique est très intéressant car certaines réactions nécessitent les trois phases et le but est d'optimiser l'écoulement pour augmenter l'aire de contact, mais aussi de favoriser le transfert de masse entre les phases gazeuses et liquides [11–13].

Dans ce type d'écoulement, des études précédentes ont montré que le débit d'air injecté est un paramètre déterminant [14–18]. Ce stage a pour but de d'étendre ces expériences à des grains de densité voisine de celle du liquide et d'observer les ressemblances et les différences. L'étude de l'influence du poids apparent des grains permettrait de mettre en évidence certains paramètres importants qui gouvernent ces écoulements triphasiques.

Dans un premier temps, nous effectuerons une approche théorique, basée sur le comportement d'une sphère solide (modélisant un grain) dans un liquide, afin d'avoir une idée des paramètres importants de l'écoulement. Par la suite, je m'attarderai sur les méthodes de mesures et d'analyses effectuées lors de ce stage sur un exemple d'expériences particulières où seul le débit d'air injecté change. On discutera aussi dans cette partie des premiers résultats et de leurs interprétations. Enfin j'exposerai les résultats obtenus sur d'autres expériences, où nous avons fait varier d'autres paramètres comme le poids apparent des grains ou la largeur de la cellule pour l'étude d'effets de bord, pour en dégager un ou deux paramètres importants de l'écoulement en question.

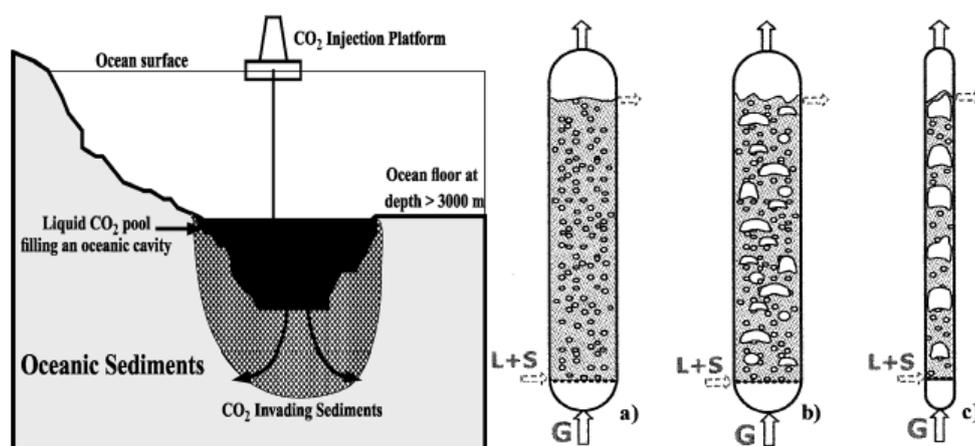


FIGURE 1 – À gauche : Schéma représentant le piégeage de bulles de dioxyde de carbone dans l'océan. Figure tirée de [8]. À droite dispositif de réacteur catalytique pour mélange liquide-solide. Figure tirée de [13].

1 Suspensions et milieux granulaires immergés : Écoulement biphasique

Dans cette partie du rapport, il s'agit d'étudier ce qu'il se passe lorsqu'on immerge un milieu granulaire dans un liquide sans injection d'air. Nous décrirons en particulier le phénomène de sédimentation du milieu granulaire.

1.1 Vitesse de Stokes

Avant de s'intéresser au milieu granulaire dans son ensemble, intéressons nous d'abord à ce qu'il se passe pour un seul grain supposé sphérique en sédimentation dans un liquide. Un simple bilan des forces sur ce dernier montre qu'il subit une force de friction fluide de la part du liquide noté \vec{F}_l , et une force dite de flottaison, noté \vec{F}_f , résultant de la poussée d'Archimède. Ces deux forces s'écrivent :

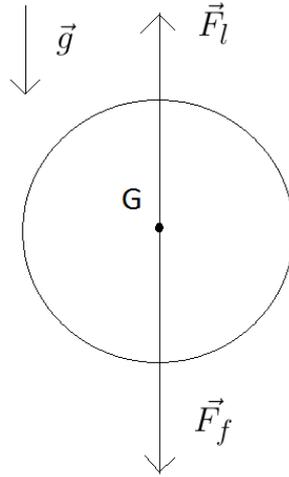


FIGURE 2 – Représentation d'un grain sphérique immergé dans un liquide subissant les forces \vec{F}_f et \vec{F}_l .

$$\vec{F}_l = -6\pi\eta R\vec{U} \quad \text{et} \quad \vec{F}_f = \frac{4}{3}\pi R^3 \Delta\rho \vec{g} \quad (1)$$

où η est la viscosité dynamique du liquide, R le rayon du grain, \vec{U} sa vitesse, $\Delta\rho = \rho_g - \rho_l$ la différence de masse volumique entre le grain et le liquide, et \vec{g} le champ de pesanteur.

Le principe fondamental de la dynamique nous donne l'évolution de la vitesse en fonction du temps :

$$\vec{U} = [\vec{U}(t=0) - \vec{U}_s] \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) + \vec{U}_s \quad (2)$$

où τ est le temps caractéristique de relaxation et \vec{U}_s , la vitesse de Stokes, définis par les expressions suivantes [19] :

$$\tau = \frac{2R^2\rho_g}{9\eta} \quad \text{et} \quad \vec{U}_s = \frac{2R^2\Delta\rho}{9\eta}\vec{g} \quad (3)$$

Estimons la valeur de τ pour nos expériences : on prend des grains de PVC de masse volumique $\rho_g = 1.38 \text{ g.cm}^{-3}$, de rayon $230 \text{ }\mu\text{m}$, immergé dans l'éthanol de viscosité $\eta = 1.2 \cdot 10^{-3} \text{ Pa.s}$, et on obtient $\tau \approx 13.5 \text{ ms}$. On peut ainsi considérer que l'on atteint le régime stationnaire quasi-instantanément et considérer que le grain se sédimente à la vitesse de Stokes, ici $U_s \approx 5.7 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}$. De cette expression, trois paramètres importants se dégagent pour l'étude de l'écoulement biphasique, et triphasique qui va suivre : $\Delta\rho$, R et η .

1.2 Loi de Darcy

Passons à présent à la sédimentation de l'ensemble des particules. Pour cela, au lieu de se placer dans le référentiel du laboratoire où les grains sédimentent dans le liquide, on se place dans le référentiel des particules qui sédimentent. Ainsi on a à faire à l'écoulement d'un liquide à travers un milieu poreux, qui suit donc la loi de Darcy

$$\vec{u} = -\frac{K}{\eta} \vec{\nabla} p \quad (4)$$

où K est le coefficient de perméabilité du milieu poreux, η la viscosité dynamique du fluide et $\vec{\nabla} p$ le gradient de pression au sein du fluide, ici son origine est purement hydrostatique, ainsi, la hauteur de fluide initialement fixée est potentiellement un autre facteur déterminant.

1.3 Etude expérimentale de la sédimentation

On utilise une cellule de Hele-Shaw (136 mm x 300 mm x 2 mm), avec un trou de diamètre $\approx 0.5 \text{ mm}$ à la base, au centre, pour injecter le gaz (air) avec un débit volumique noté Q . On ajoute alors une certaine masse de grains pour que le milieu granulaire aît une hauteur $h_g = 9 \text{ cm}$ après sédimentation, immergé dans de l'éthanol à hauteur totale $h_l = 18 \text{ cm}$ (voir figure 3). Ces deux valeurs restent constantes dans l'ensemble de nos expériences. Les grains utilisés ici seront des particules de PVC de rayon $R = 230 \text{ }\mu\text{m} \pm 100 \text{ }\mu\text{m}$ (Goodfellow LS 417326), à priori non sphérique. Le gap de la cellule étant de 2 mm, on considère l'écoulement quasiment à deux dimensions. L'injection d'air à 2 L/min permettra de mettre les particules en suspension, que l'on laissera sédimenter pour former un lit granulaire de fraction volumique homogène (qui sera le point de départ de nos expériences en écoulement triphasique). Pour filmer la sédimentation, on place un panneau LED (EuroshopLED SC-PSC24CE3060-C24W) derrière la cellule et on filme la sédimentation à l'aide d'une caméra (voir figure 3).

Dans un premier temps, nous avons étudié expérimentalement cette "zone morte". Pour cela, nous utilisons une technique d'ombroscopie : nous éclairons la cellule de Hele-Shaw par derrière grâce à un panneau LED, et nous filmons l'écoulement (cf. figure 3), ainsi plus il y a de grains dans une zone, plus l'intensité perçue est faible. On contrôle d'autre part l'écoulement de bulles grâce à un contrôleur de débit qui permet d'imposer le débit des bulles d'air envoyées dans la cellule. Etant donné que c'est l'état stationnaire qui nous intéresse dans un premier temps, la caméra prend une image par seconde.

Pour mesurer la vitesse et le temps de sédimentation des grains de PVC dans l'éthanol, on suit la hauteur du front de la suspension au cours du temps normalisé à la hauteur initiale de la suspension $\frac{h_f}{h_i}$ (voir figure 4).

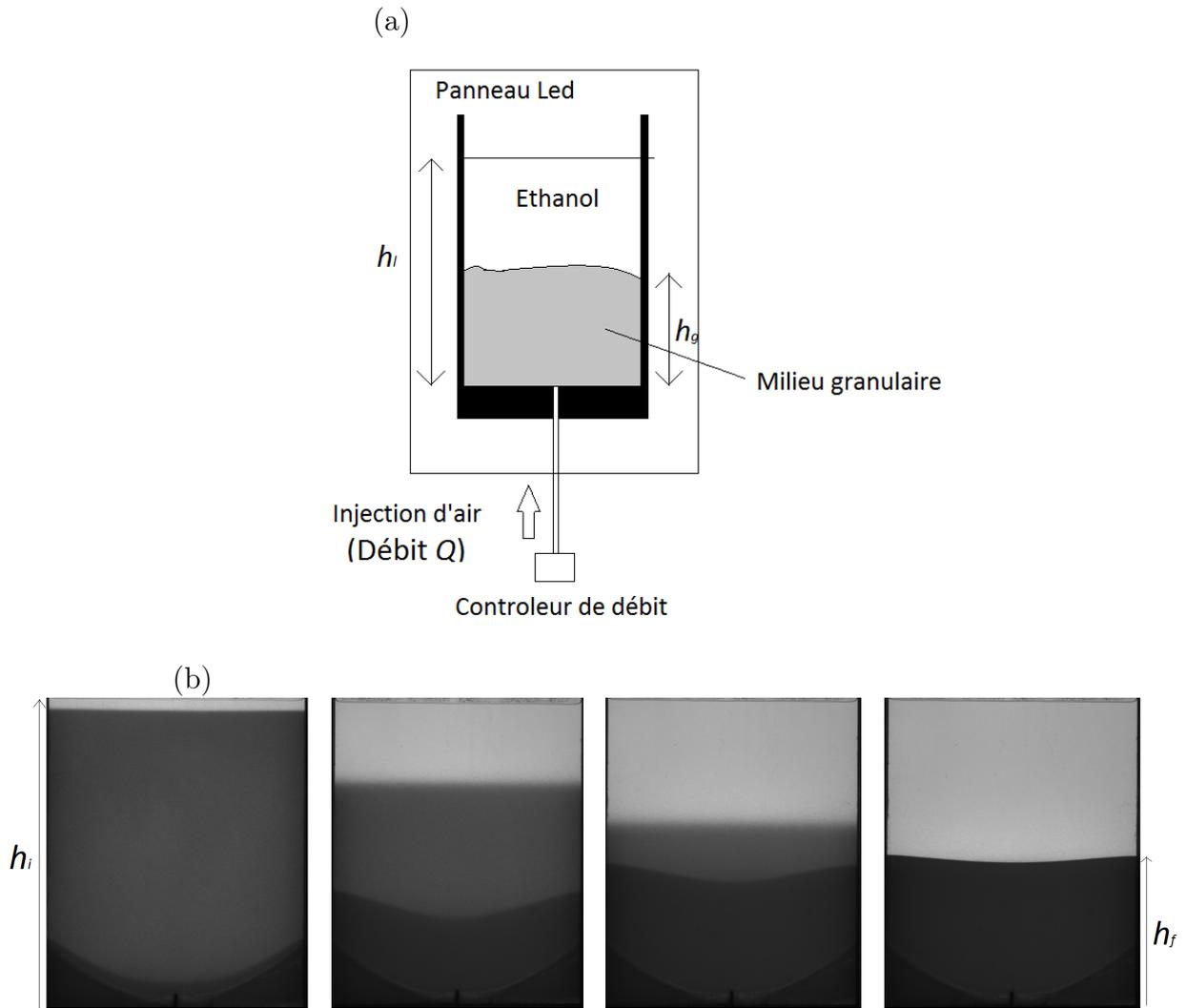


FIGURE 3 – (a) Schéma du dispositif de l'expérience. (b) Photos issues de l'expérience de sédimentation respectivement à 53 s, 615 s et 973 s. La largeur de la cuve est de 13.6 cm

On peut tirer plusieurs résultats de cette courbe (figure 4). D'abord la hauteur de la suspension décroît linéairement avec le temps, ce qui signifie que la sédimentation du PVC dans l'éthanol se fait à vitesse constante, mesuré à $U_{sedim} = (7.1 \pm 0.4) \cdot 10^{-5}$ m/s (erreur estimée sur 5 mesures). Ensuite on mesure un temps de sédimentation $\tau_{sedim} = 1262 \pm 11$ s, cette valeur sera utile pour les expériences sur l'écoulement triphasique, pour lesquelles le temps caractéristique de montée des bulles τ_b est de l'ordre de la seconde, ainsi $\tau_b \ll \tau_{sedim}$: les particules entraînées par les bulles sédimentent après.

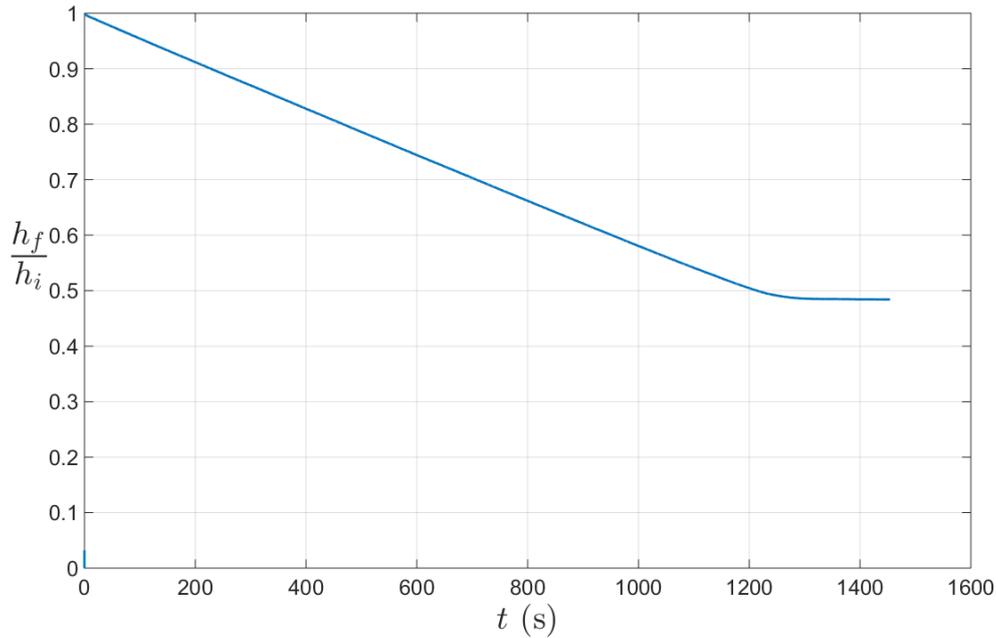


FIGURE 4 – Hauteur du front de la suspension normalisée à la hauteur initiale au cours de la sédimentation. On observe une décroissance linéaire permettant d'affirmer que la vitesse de sédimentation est constante.

2 Mise en suspension du PVC : Écoulement triphasique

Après avoir étudié la sédimentation du milieu granulaire, nous allons étudier la mise en suspension de celui-ci par injection d'air sous le lit granulaire. Pour créer un lit granulaire initialement homogène, on impose un débit d'air de 2 L/min pendant quelques minutes puis on laisse sédimenter. On injecte ensuite un débit d'air Q fixé et on filme la dynamique de l'écoulement, pour différents débits (de 10 mL/min à 1.75 L/min) (voir figure 3).

2.1 Description du phénomène

Dans un premier temps, décrivons ce qu'il se passe lorsque l'on injecte l'air dans le lit granulaire homogène. L'expérience est schématisée et représentée dans la figure 5, avec les photographies faites lors de l'expérience.

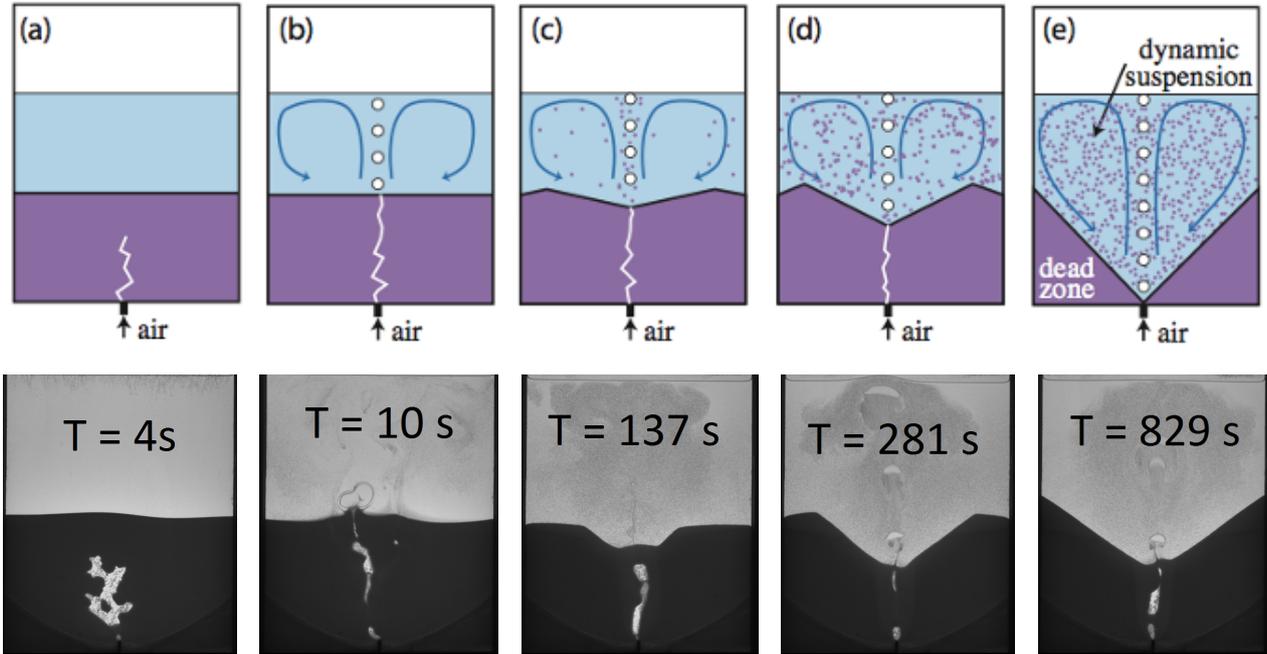


FIGURE 5 – (Haut) Schéma du passage d'air dans le milieu granulaire immergé. (Bas) Images issues des expériences aux différentes étapes (figure T. Homan). [$Q = 10 \text{ mL/min}$].

Dans un premier temps l'air percole à travers le milieu granulaire (figure 5a), des bulles remontent ensuite dans l'éthanol (figure 5b), en entraînant une partie des grains au centre. Ces grains suivent ensuite la recirculation du fluide et sédimentent sur le côté, leurs trajectoires sont semblables à des rouleaux de convection (figure 5c). Ainsi un cratère commence à se former : les grains sur les cotés avalanchent dans le cratère et sont entraînés à nouveau par les bulles (figure 5d). Le cratère se forme jusqu'à l'apparition d'un état stationnaire (figure 5e) pour lequel on observe ce que l'on appelle une "zone morte", pour laquelle le milieu granulaire n'est pas affecté par l'écoulement dans cet état stationnaire. L'objectif de cette étude est de comprendre quels paramètres importants gouvernent la géométrie de la "zone morte" et la dynamique de la suspension.

2.2 Etude expérimentale de la "zone morte"

Deux grandeurs nous intéressent dans la "zone morte" : l'évolution de la fraction volumique de grains et l'évolution de son volume. Afin d'expliquer les différentes étapes et mesures de ce travail, cette partie se focalisera uniquement sur les mesures faites avec le PVC, dans la cuve de 13.6 cm de large.

Dans un premier temps, il est intéressant de regarder l'évolution de la fraction volumique dans la zone morte au cours de l'écoulement. Une calibration précédent mon arrivée en stage réalisé par S.Joubaud et T. Homan a permis de déterminer que la relation entre l'intensité et la fraction volumique de grains est exponentielle. Au vu des faibles valeurs de fraction volumique, on considère que la relation entre l'intensité perçue par la caméra I et la fraction volumique de grains Φ est linéaire au premier ordre.

$$\Phi = \Phi_0 \frac{I_{max} - I}{I_{max} - I_{min}}. \quad (5)$$

où I_{max} est l'intensité dans le liquide sans grains ($\Phi = 0$) et I_{min} l'intensité dans le lit granulaire initial ($\Phi = \Phi_0$). Pour cela, on mesure la moyenne de l'intensité dans deux parties de la zone morte (cf. figure 6), qui restent dans la zone morte tout au long de l'écoulement et on fait la moyenne de l'intensité $\langle I \rangle_{X,Y}$ dans ces deux zones, et on trace cette valeur $\langle I \rangle_{X,Y}$ au cours de l'écoulement, que l'on relie à la valeur moyenne de la fraction volumique dans cette zone $\langle \Phi \rangle_{X,Y}$. On obtient alors le type de courbe présentée figure 6 pour l'évolution de la fraction volumique de grains dans la "zone morte" au cours de l'écoulement, allure que l'on retrouve pour des débits allant de 10 mL/min à 1.75 L/min.

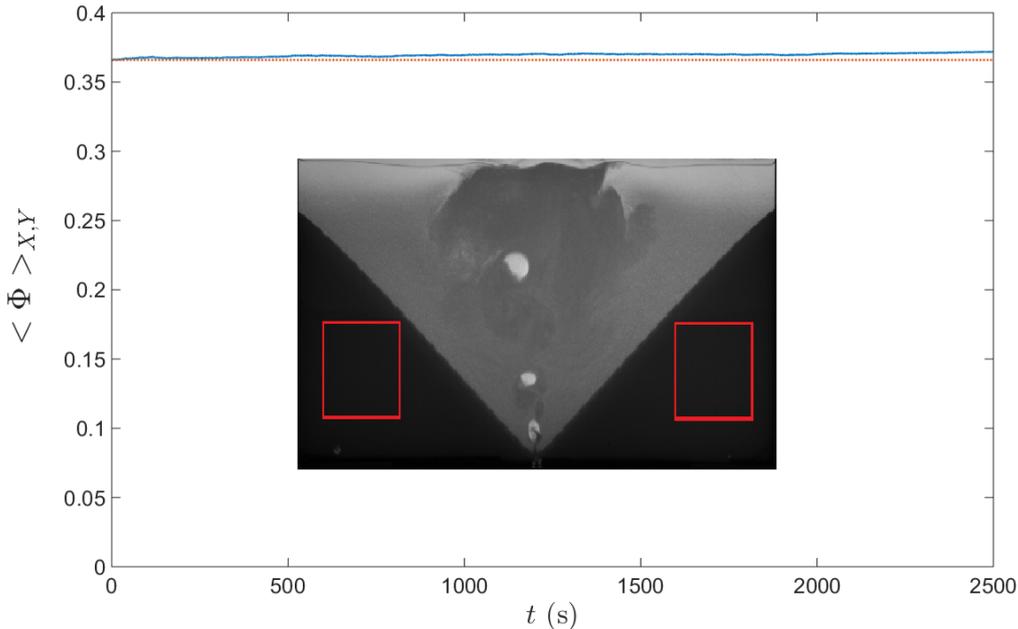


FIGURE 6 – Evolution de la fraction volumique dans la zone morte en fonction du temps pour $Q=50$ mL/min. En pointillé est représentée la valeur $\langle \Phi \rangle_{X,Y}$ ($t = 0$ s). On remarque alors une compaction de la "zone morte" sous l'action des bulles. La cuve utilisée ici a une largeur de 35.6 cm. Insert : Les zones rouges sur la photo sont les zones sur lesquelles les moyennes spatiales ont été faites.

Si l'on zoome sur la courbe, on peut observer une croissance globale très faible de $\langle \Phi \rangle_{X,Y}$, qui révèle une faible compaction de la "zone morte" sous l'effet de l'écoulement d'air. Cependant l'évolution est très faible ($\Delta\Phi = 0.005$), on peut alors considérer qu'elle n'évolue pas au cours de l'écoulement. On relève alors la valeur moyenne de la fraction volumique dans la zone morte $\langle \Phi \rangle_{X,Y}$ au cours de l'écoulement pour chaque débit, et on relève la valeur de la moyenne temporelle sur la durée de l'écoulement $\langle \Phi \rangle_{X,Y,t}$ que l'on trace en fonction du débit Q (figure 7).

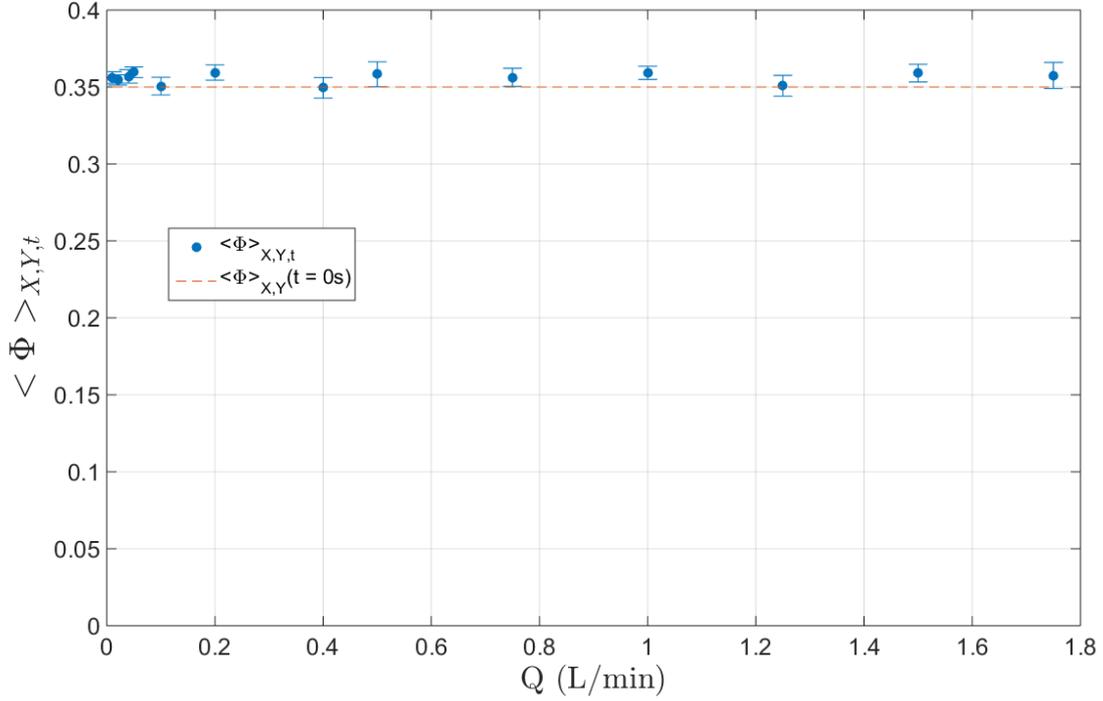


FIGURE 7 – Evolution de la fraction volumique de grains dans la “zone morte” en fonction du débit de bulles d’air. La ligne en pointillé représente la fraction volumique de grains dans le lit granulaire à l’état initial, avant l’écoulement. $\langle \Phi \rangle_{X,Y,t}$ semble être indépendant du débit volumique d’air injecté. De plus, on retrouve globalement la compaction de la “zone morte” sous l’effet de l’air, car la majorité des points de mesures sont au-dessus des pointillés.

On en conclut que la fraction volumique ne dépend donc pas du débit de bulles d’air imposé dans l’écoulement.

A présent, nous souhaitons observer l’évolution de la taille de cette “zone morte” en fonction du débit Q . Grâce à un programme Matlab permettant de donner des images binaire à partir des films, où seule la “zone morte” apparaît en noir (voir annexe), on traite les différents films, et on observe l’évolution de l’aire de la “zone morte” en fonction du temps (figure 8). L’aire de la “zone morte” décroît et tend vers un état stationnaire. De plus lorsque l’on augmente le débit d’air, l’aire de la “zone morte” dans l’état stationnaire diminue. Cela paraît assez logique, car en augmentant le débit de bulles on transporte plus de grains dans la suspension. On peut aussi remarquer que la durée du régime transitoire diminue aussi quand la valeur du débit d’air augmente. Pour une étude plus quantitative, la moyenne de l’aire normalisée dans l’état stationnaire est tracée en fonction du débit d’air Q (figure 9).

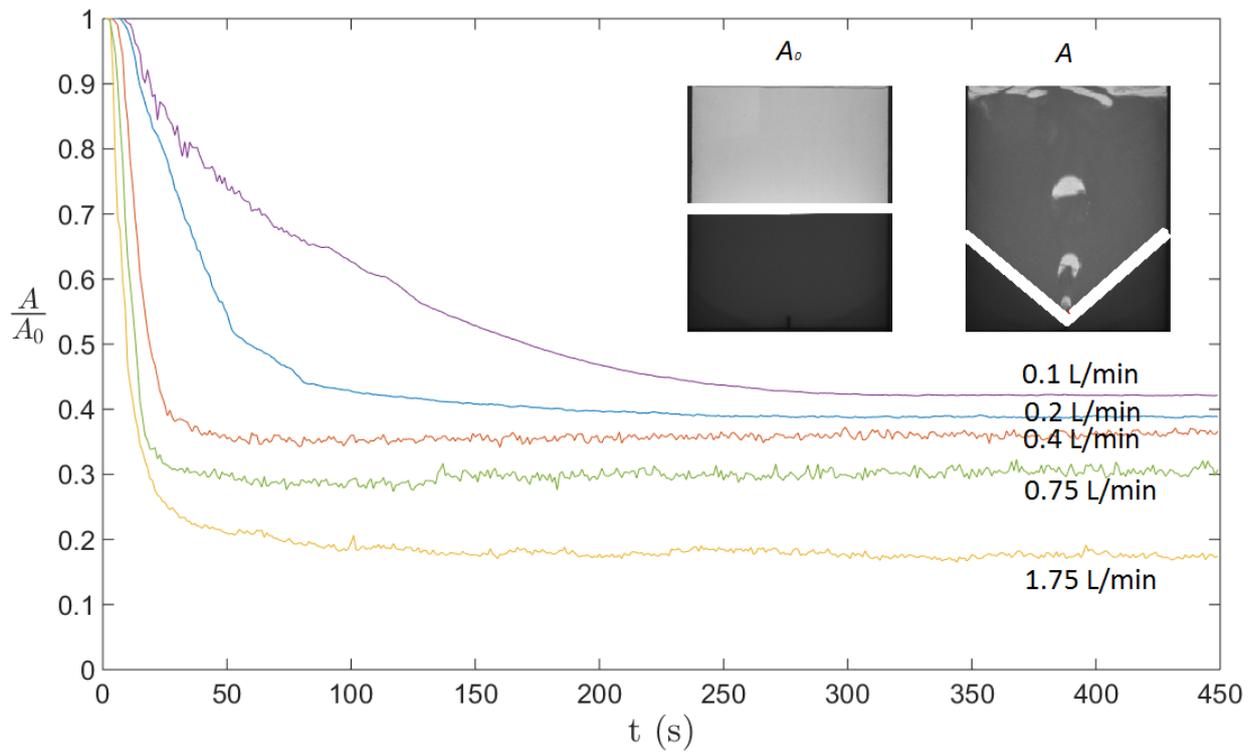


FIGURE 8 – Evolution de l’aire de la “zone morte” normalisée à l’aire initiale en fonction du temps. On observe l’évolution vers un état stationnaire. Insert : Photos des expériences à 0.1 L/min pour définir A et A_0 , délimités par les traits rouges. On observe l’évolution vers un état stationnaire.

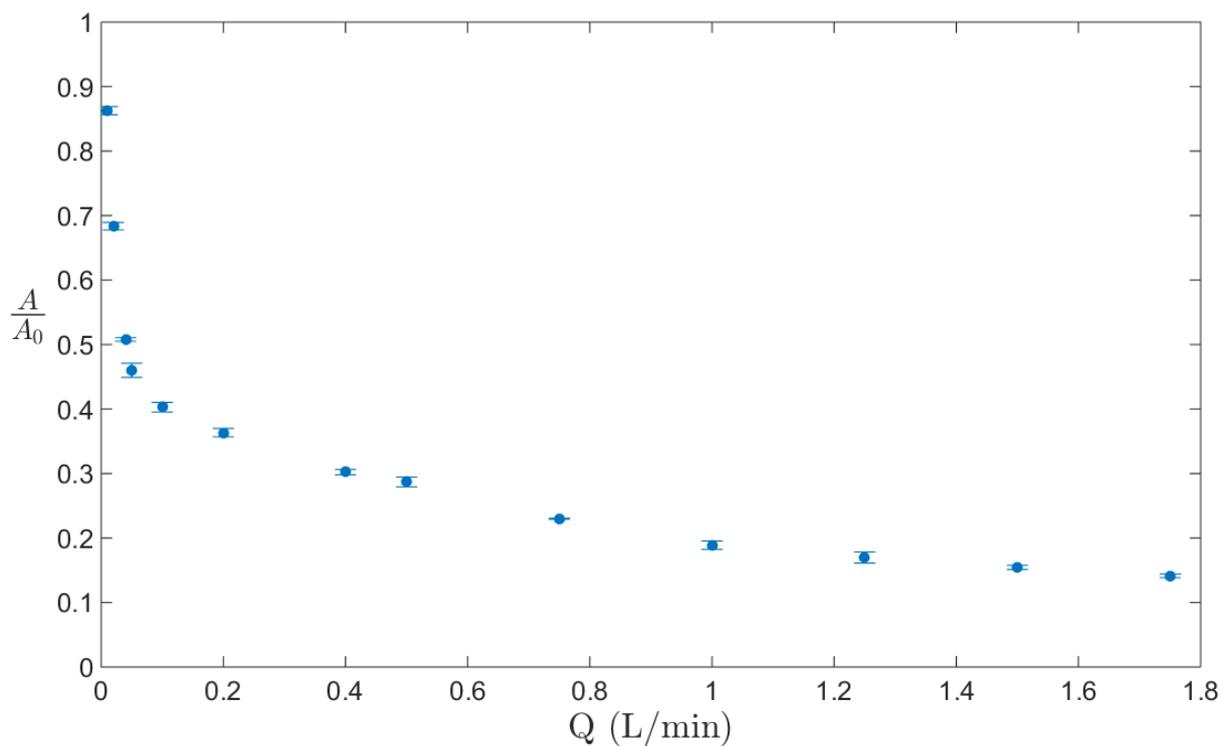


FIGURE 9 – Aire de la “zone morte” normalisée à l’aire initiale en fonction du débit Q [PVC]. L’aire décroît avec le débit d’air comme attendu.

Comme attendu, l'aire décroît avec le débit d'air, et semble se tendre vers un palier pour des grandes valeurs de débit. Comme nous l'avons vu, l'injection d'air dans le milieu granulaire fait diminuer la taille de la "zone morte", transportant les particules qui se retrouvent dans le liquide, formant ainsi une suspension. C'est cette suspension formée par l'injection d'air que nous allons étudier à présent.

2.3 Etude expérimentale de la suspension

Après avoir étudié la "zone morte", passons à l'étude de la suspension créée par l'injection de bulles d'air, et notamment l'étude de la fraction de grains dans celle-ci. Ainsi on utilise toujours le même principe de mesure par ombroscopie, et on relie linéairement l'intensité et la fraction volumique comme précédemment. Comme pour l'étude de la "zone morte", l'idée est d'observer l'évolution de la fraction de grains dans la suspension au cours de l'écoulement, pour différents débits. Pour cela, on mesure l'intensité moyenne dans deux parties de la suspension (cf. figure 10), et on fait la moyenne des deux pour obtenir la valeur moyenne de l'intensité I_{moy} dans la suspension, que l'on relie à la fraction volumique moyenne dans la suspension (cf. équation 5). On trace alors son évolution au cours de l'écoulement pour différents débits Q .

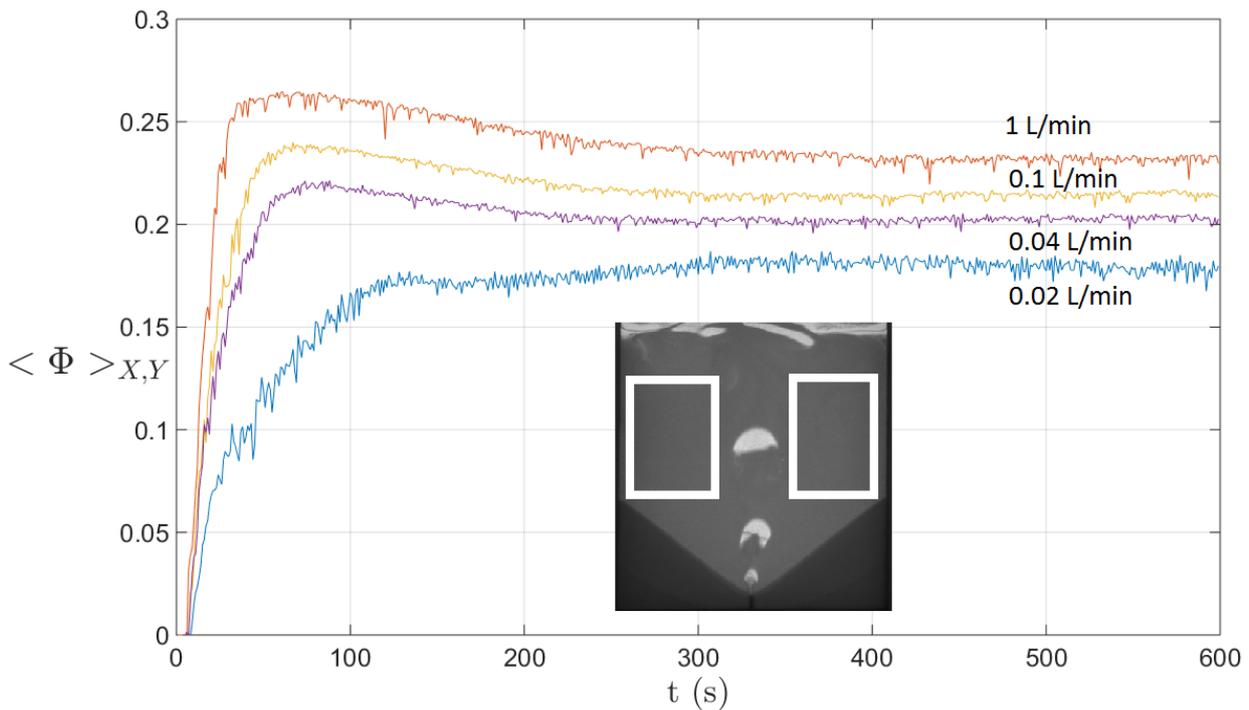


FIGURE 10 – Evolution de la fraction volumique de grains dans la suspension en fonction du temps. Les zones encadrées en blanc sur la photo sont les zones sur lesquelles les moyennes $\langle \Phi \rangle_{X,Y}$ ont été faites. L'évolution vers un état stationnaire est confirmé ici : plus le débit est fort, plus on met de particules en suspension. Insert : Les zones encadrées en blanc sur la photo sont les zones sur lesquelles les moyennes $\langle \Phi \rangle_{X,Y}$ ont été faites

Tout d'abord on remarque que pour chaque débit, on atteint un état stationnaire, ce qui est concordant avec ce que l'on a vu pour la "zone morte". On peut aussi remarquer que chacune de ces courbes passe par un maximum, ce qui est important pour la dynamique de l'écoulement.

On peut interpréter ce maximum comme la présence de deux étapes distinctes de l'écoulement : une mise en suspension convective du milieu granulaire par les bulles, et une relaxation vers un état stationnaire. Ces remarques sur la dynamique ne sont que préliminaires et il conviendrait de les étudier plus profondément.

Pour le moment, attardons nous sur cet état stationnaire. On mesure la valeur moyenne temporelle $\langle \Phi \rangle_{X,Y,t}$ dans l'état stationnaire pour chaque débit et on trace ces valeurs en fonction du débit d'air (figure 11).

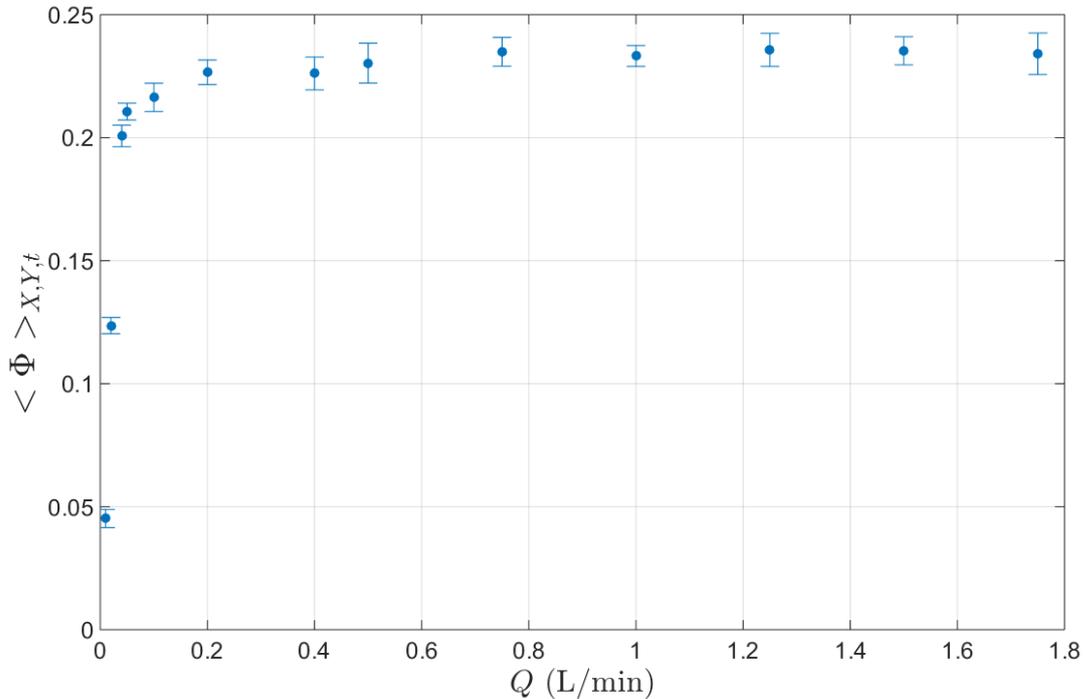


FIGURE 11 – Evolution de la valeur moyenne de la fraction volumique dans la suspension $\langle \Phi \rangle_{X,Y,t}$ en fonction du débit Q imposé [PVC]. On observe une augmentation de $\langle \Phi \rangle_{X,Y,t}$ avec le débit, qui tend vers un palier à fort débit.

Après avoir caractérisé l'évolution du lit granulaire et de la suspension pour le PVC, nous allons nous intéresser au mécanisme moteur de l'écoulement à savoir les bulles, mais aussi à l'étude de ce qui se produit lorsque l'on change d'autres paramètres (densité des grains, taille de la cuve...).

3 Mise en évidence des paramètres contrôlant l'écoulement triphasique

Après avoir détaillé l'étude de l'écoulement pour le PVC, il est à présent important de déterminer les paramètres qui contrôlent cet écoulement. On a vu que ce sont les bulles d'air qui sont responsables du transport des particules, et c'est ce premier paramètre que nous allons étudier ici.

3.1 Taille des bulles

Les bulles sont caractérisées par deux grandeurs, leur taille ainsi que leur vitesse. Les mesures de vitesse n'ont pas pu être effectuées au cours de ce stage à cause de la limite de fréquence de capture de la caméra utilisée. Pour avoir un ordre de grandeur de la vitesse des bulles U_b , on peut reprendre les résultats de [20], en supposant négligeable l'action de la suspension sur la vitesse des bulles, reliant la vitesse des bulles dans une cellule de Hele-Shaw sans milieu granulaire, à la largeur L_b des bulles par la formule 6

$$U_b = 0.5\sqrt{gL_b} \quad (6)$$

On souhaite alors mesurer la taille de ces bulles en fonction du débit dans l'écoulement triphasique. Ne possédant pas de caméra rapide, la solution pour cette mesure est la suivante. L'intensité vue par la caméra est bien plus élevée dans les bulles que dans le reste de la suspension, car elles ne contiennent pas de grains. L'idée est de sommer toutes les images du film dans l'état stationnaire, les bulles restent confinées dans une colonne, qui apparaît plus intense sur l'image résultante (voir figure 12).

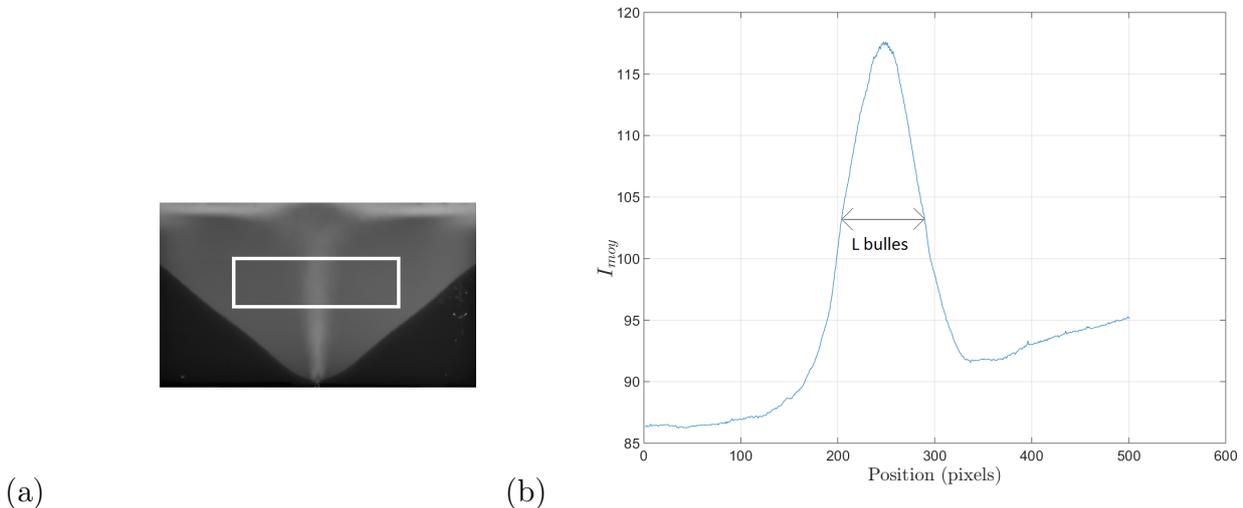


FIGURE 12 – (a) : Image résultante de la somme des images à l'état stationnaire. (b) : Moyenne de l'intensité sur la hauteur, en fonction de la position horizontale sur le rectangle. Pour tracer la moyenne de l'intensité, pour chaque valeur de la position horizontale, on moyenne l'intensité sur toute la hauteur du rectangle blanc, et on parcourt le rectangle horizontalement.

On évalue alors la largeur des bulles comme la largeur à mi-hauteur du pic central. Ainsi, on obtient les valeurs de taille de bulles pour les différents débits utilisés et leur évolution est tracée sur la figure 13.

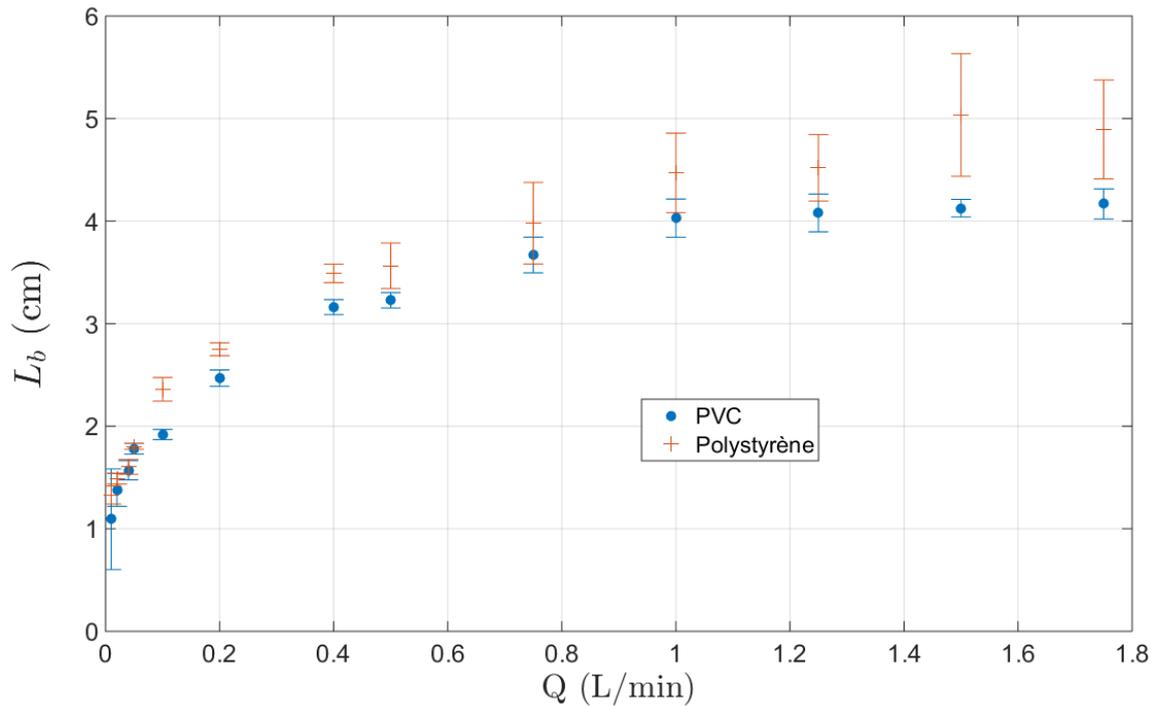


FIGURE 13 – Largeur des bulles dans le PVC estimée par la méthode décrite dans la figure 12 en fonction du débit d’air injecté. On observe une croissance de L_b en fonction de Q , puis une saturation pour les forts débits.

On observe alors que la relation n’est pas linéaire entre le débit d’air et la largeur des bulles, il y a croissance de la taille des bulles avec le débit, puis on observe une saturation de L_b pour les forts débits. Hors, les bulles d’air sont le moteur principal de la mise en suspension des particules. En effet la taille des bulles contrôle non seulement la quantité de particules entraînées mais également l’allure et la taille des zones de recirculation dans le fluide. Nous allons alors utiliser cette quantité comme paramètre fondamental. L’ensemble des figures à présent sera tracé en fonction de la largeur des bulles. On retrace à nouveau la taille de la “zone morte” dans l’état stationnaire, mais cette fois-ci en fonction de la largeur L_b , et on fait de même pour la fraction volumique moyenne de grains dans la suspension (figure 14).

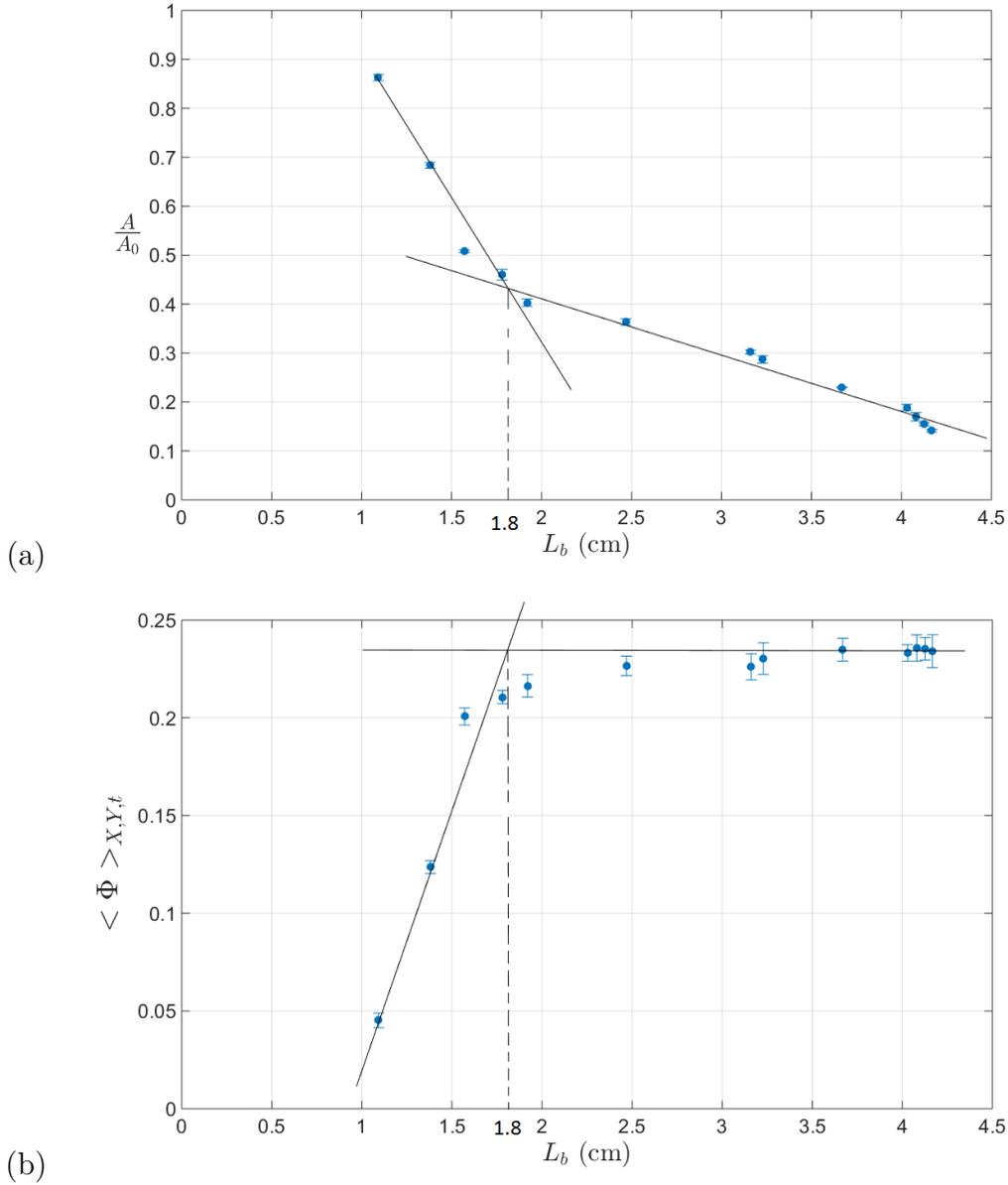


FIGURE 14 – À gauche : Aire normalisée pour les grains de PVC en fonction de la largeur des bulles. À droite : Moyenne temporelle de la fraction volumique dans la suspension pour les grains de PVC en fonction de la largeur des bulles. On observe deux régimes distincts séparés à $L_b \approx 1.8$ cm, probablement dûs aux effets de bord.

Pour la taille de la “zone morte”, on observe alors deux régimes, avec un changement pour $L_b = 1.8$ cm. Ce changement peut s’interpréter comme un effet de bord. En effet, si on considère que la taille caractéristique de l’écoulement est la largeur des bulles, la largeur de la cellule étant de $L_c = 13.6$ cm, on remarque que ce changement se fait à $L_b \approx 0.1L_c$. En hydrodynamique, on considère que les effets de bord sont négligeables quand la taille caractéristique de l’écoulement (ici L_b) est inférieure au dixième de la taille de l’enceinte dans laquelle on effectue les expériences (voir [21]).

Pour la suspension, on observe aussi ce changement de régime à 1.8 cm, et toujours un palier pour les grandes largeurs de bulles, comme dans la figure 11. Ce palier semble commencer lui aussi vers $L_b \approx 1.5$ cm, tout comme le changement de régime pour l’évolution de la taille de la “zone morte”, on peut penser que ce palier est dû aussi à un effet de bord.

3.2 Influence de la différence de densité

Le but de cette partie est de voir l'influence des paramètres de l'écoulement, on va notamment jouer sur la valeur de la vitesse de Stokes (équation 3), nous verrons principalement l'effet du paramètre $\Delta\rho$. Pour cela, nous allons utiliser des particules de polystyrène ($\rho = 1.05 \text{ g/cm}^3$), de taille semblable aux particules de PVC ($\sim 250 \mu\text{m}$ contre $\sim 230 \mu\text{m}$ pour le PVC), et garder l'éthanol comme liquide, et la même cellule de Hele-Shaw ($30 \text{ cm} \times 13.6 \text{ cm} \times 0.2 \text{ cm}$), afin de ne pas changer les autres paramètres. Ainsi on passe de $\Delta\rho \sim 0.6 \text{ g/cm}^3$ pour le PVC à $\Delta\rho \sim 0.25 \text{ g/cm}^3$ pour le polystyrène, plus léger. On passe alors d'une vitesse de Stokes $U_s \approx 5.7 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}$ à $U_s \approx 2.4 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}$.

Dans un premier temps, comme la taille des bulles semble être le paramètre important de l'écoulement, il convient de mesurer à nouveau la taille des bulles, pour le polystyrène, et comparer avec le PVC (figure 13).

On observe donc que pour un même débit, les bulles dans le polystyrène sont plus grandes que celles dans le PVC. Le facteur $\Delta\rho$ semble être contenu dans la largeur des bulles. On peut interpréter cela par une évolution de la tension de surface, en effet les bulles interagissent avec la suspension, ainsi la tension de surface à considérer est la tension à l'interface air/suspension, qui n'est pas la même selon les particules qui composent la suspension, et joue sur la largeur des bulles [22].

On a alors effectué à nouveau les mêmes mesures faites pour le PVC précédemment, mais avec le polystyrène cette fois-ci. Reprenons alors pour commencer l'étude de la taille de la "zone morte", toujours dans l'état stationnaire. On effectue les mesures de la même manière que pour le PVC, en prenant garde à garder la même hauteur de grains au départ et la même hauteur d'éthanol que pour le PVC (figure 15).

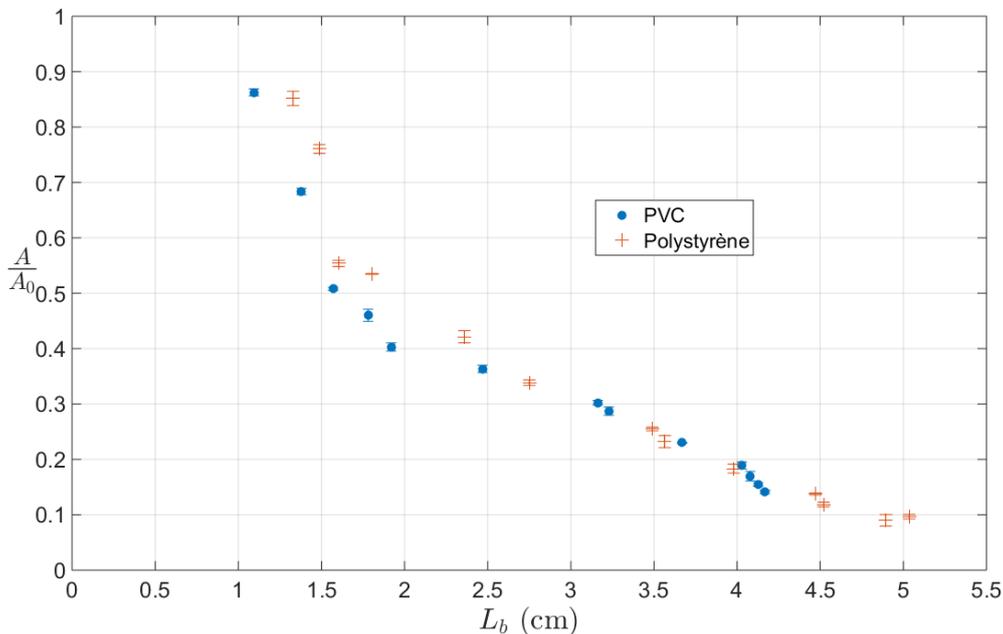


FIGURE 15 – Aire du lit granulaire normalisée à l'aire initiale en fonction de la largeur des bulles d'air. Pour les petites bulles, l'aire de la "zone morte" est plus grande, donc on transporte moins le polystyrène pourtant plus léger, ce qui est contre-intuitif. Pour les bulles plus larges, les deux courbes semblent bien collapser, ce régime ne dépend donc pas de $\Delta\rho$, pour la gamme étudiée ici.

Comme pour le PVC, on observe deux régimes pour le polystyrène, avec une coupure sensiblement au même endroit, que l'on peut à nouveau expliquer par les effets de bords vraisemblablement. Cependant la comparaison de ces deux courbes s'avère assez étonnante. En effet, pour le premier régime, on voit que l'aire de la "zone morte" est plus élevée pour le polystyrène que pour le PVC, ce qui semble contre-intuitif à nos yeux car le polystyrène étant plus léger, on s'attend à ce que celui-ci soit transporté plus facilement que le PVC, et donc que la "zone morte" du polystyrène soit de taille moins élevée. Pour le seconde régime, où les effets de bords ne semblent plus négligeables, on observe une concordance entre les points du PVC et du polystyrène, ce qui semble indiquer que dans ce régime la différence de densité entre le liquide et les grains ne jouent pas de rôle pour la gamme étudié ici.

Effectuons de même les mesures de fraction volumique dans la suspension pour le polystyrène (figure 16).

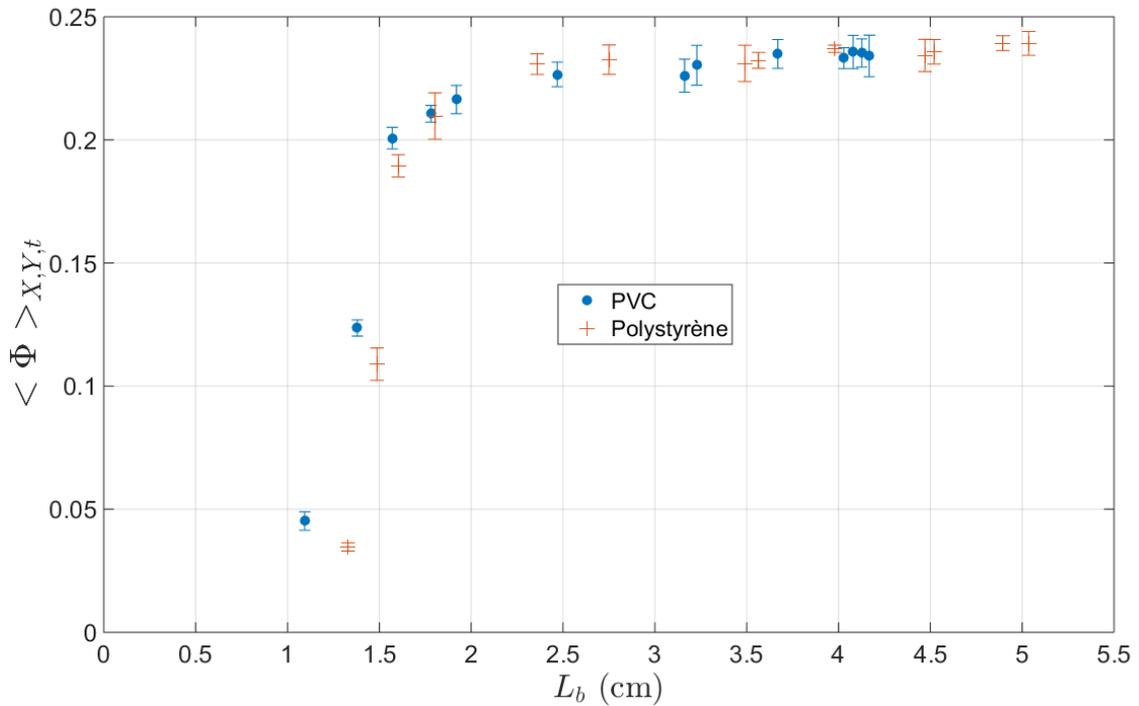


FIGURE 16 – Fraction volumique de grains dans la suspension en fonction de la largeur des bulles d'air. Le fait de moins transporter le polystyrène pour les petites bulles est confirmé ici. Pour les grandes bulles, les deux courbes semblent tendre vers le même palier.

Cette courbe confirme les observations faites sur la "zone morte", on transporte moins de polystyrène que de PVC pour des faibles tailles de bulles, et les points concordent pour les grandes tailles de bulles. De plus l'ensemble des points semblent tendre vers un palier identique, on en conclut que la fraction volumique de grains dans la suspension ne peut dépasser une certaine valeur dans notre écoulement, et que cette valeur ne semble pas dépendre de $\Delta\rho$, pour la gamme étudié ici.

3.3 Influence de la largeur de la cuve

Afin d'étudier l'influence des effets de bord, nous avons refait les mêmes expériences dans une cellule de Hele-Shaw plus large (356 mm x 300 mm x 3 mm), l'épaisseur n'est pas la même,

mais on suppose que ce millimètre de différence n'influe pas les résultats généraux.

Reprenons alors le même protocole de mesure de la taille de la "zone morte" dans cette cuve plus large. On effectue les expériences tout d'abord avec seulement le PVC dans la cuve, puis de même avec juste les grains de polystyrène seuls dans la cuve (figure 17).

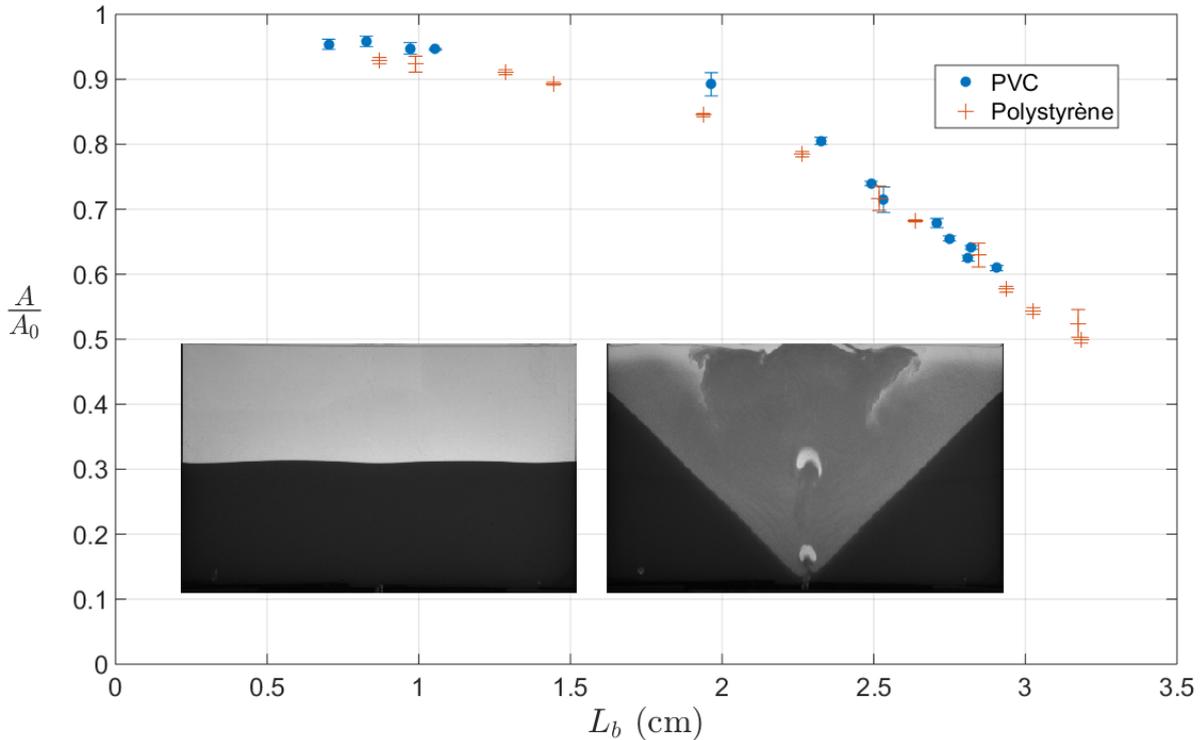


FIGURE 17 – Aire de la "zone morte" normalisée en fonction de la largeur des bulles d'air ($L_{cuve} = 35.6$ cm). Les photos sont tirées des expériences faites dans la grande cuve à $Q = 200$ mL/min. On observe à nouveau deux régimes, mais surtout, pour les petites bulles, l'aire de la "zone morte" est plus grande pour le PVC que pour le polystyrène plus léger, ce qui est un résultat qui semble plus intuitif. Insert : Les photos sont tirées des expériences faites dans la grande cuve à $Q = 200$ mL/min

L'allure et la comparaison des courbes diffèrent de celles effectuées dans la petite cellule. En effet, l'allure générale de la courbe n'est pas la même, on observe deux régimes, un premier où la taille de la "zone morte" évolue très peu, ici la première partie de la courbe montre que l'aire de la "zone morte" est plus faible pour le polystyrène que pour le PVC, ce qui est le résultat intuitif qui était attendu déjà dans la petite cellule, le polystyrène étant plus léger que le PVC. On observe un second régime où la taille de la "zone morte" décroît, et où les deux courbes collapent, ainsi la dépendance en $\Delta\rho$ semble très faible dans ce régime, pour les gammes de $\Delta\rho$ utilisées ici. Reprenons à présent l'étude de la suspension dans la cuve plus large (voir figure 18). On observe un second régime où la taille de la "zone morte" décroît, et où les deux courbes collapent, ainsi la dépendance en $\Delta\rho$ semble très faible dans ce régime, pour les gammes de $\Delta\rho$ utilisées ici.

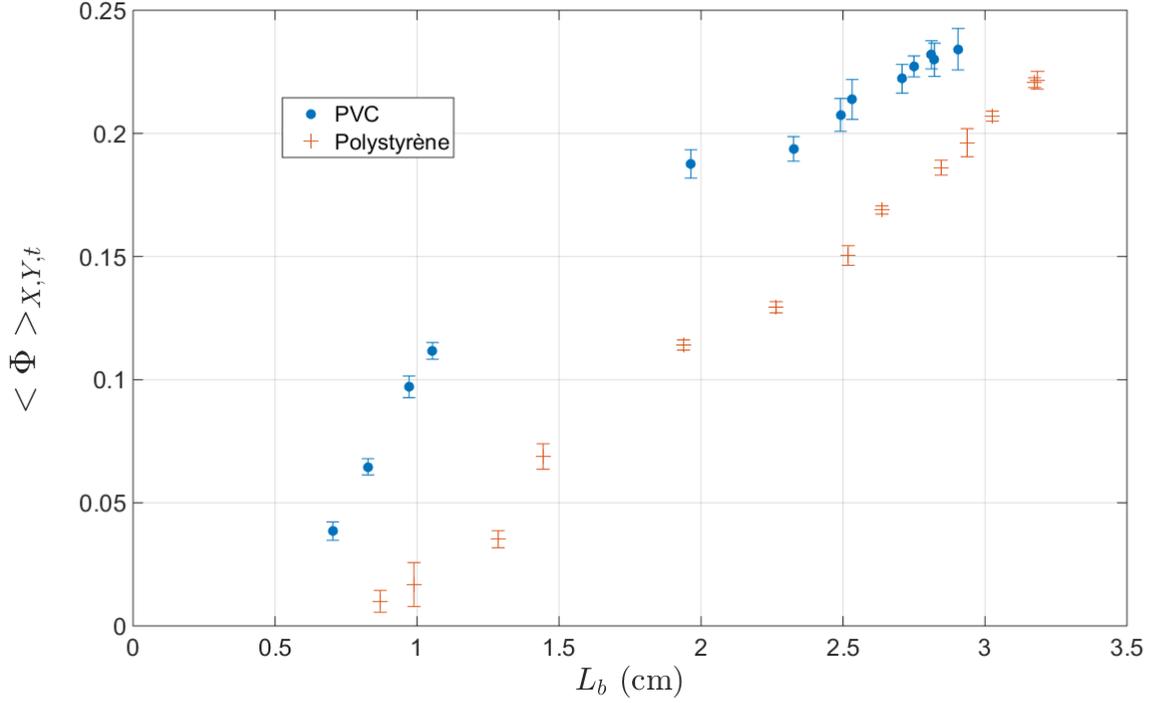


FIGURE 18 – Fraction volumique de grains dans la suspension en fonction de la taille typique des bulles [$L_{cuve} = 35.6$ cm].

Comme pour la petite cellule, on retrouve ici le fait que la suspension de PVC possède une plus forte fraction volumique que la suspension de polystyrène, ce qui est totalement inattendu comme on l'a expliqué précédemment et nous n'avons pas d'explication physique pour le moment pour rendre compte de ce résultat.

Ainsi revenons à l'étude de la "zone morte", afin de trouver quels paramètres sont importants dans notre étude, il peut être bon de réussir à faire collapser les courbes des quatre expériences (PVC et polystyrène séparément avec les deux cuves). On a vu que les changements de régime dans la petite cuve se faisait pour $L_b \approx 0.1L_c$, on peut alors penser que le paramètre pertinent serait le rapport de ces deux quantités.

Cependant, on doit prendre en compte le fait que les deux cuves n'ont pas la même épaisseur. Pour cela, on peut penser que c'est la surface des bulles qui entre en contact avec le milieu granulaire qui sera le paramètre pertinent, à savoir le produit de L_b avec l'épaisseur de la cuve, noté S_b . C'est donc en fonction du rapport entre S_b et L_c que l'on trace la taille de la "zone morte" pour les quatre expériences (figure 19).

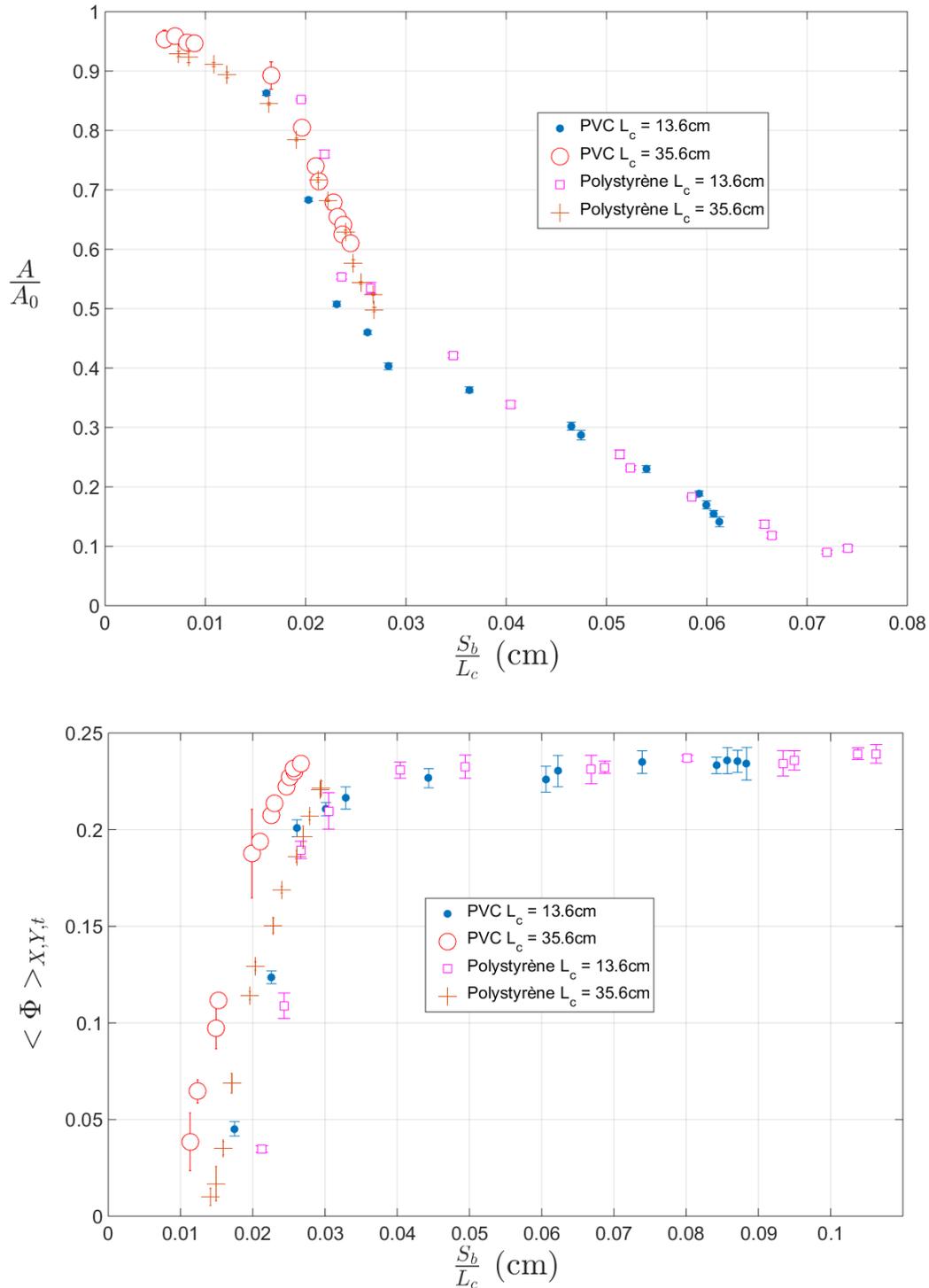


FIGURE 19 – Aire de la “zone morte” normalisée en fonction du rapport de la surface des bulles d’air avec la largeur de la cuve.

Avec cette abscisse plus pertinente physiquement, les 4 courbes semblent collapser de façon satisfaisante et peuvent nous permettre de dire que, à viscosité et taille de particules constantes, le paramètre pertinent pour la taille de la “zone morte” est le rapport entre S_b et L_c . Afin de confirmer cela, il convient de réeffectuer ces mesures dans une cuve de taille intermédiaire (≈ 24 cm) pour obtenir plus de points notamment au changement de régime.

On peut essayer d’effectuer la même opération pour les courbes de fraction volumique pré-

sentes dans la suspension. Cependant, on a pu remarquer que dans certaines expériences dans la grande cuve, pour les faibles débits, la suspension ne s'étend pas dans toute la cuve. On remplace alors L_c par la largeur de la suspension (défini par la taille maximale que prend la suspension auquel on retire la largeur typique des bulles), noté L_s (figure 19).

Conclusions et perspectives

Dans ce rapport, nous avons vu plusieurs résultats intéressants. Tout d'abord, il existe un état stationnaire vers lequel le système tend, il reste à savoir si cela est vrai quelque soit les grains et le liquide. Ensuite, le paramètre qui semble le plus important, que ce soit pour la taille de la "zone morte", ou la suspension, est la taille des bulles, car ce sont elles qui transportent les grains et les mettent en suspension dans le liquide. Il convient aussi d'étudier la vitesse des bulles, qui semble être un paramètre déterminant dans l'étude de la dynamique de l'écoulement. Dans cette étude deux régimes se sont distingués, dû au fait que pour les bulles les plus larges, les effets de bord induits par la largeur de la cuve ne sont plus négligeables. Enfin, lorsque l'on change la masse volumique des grains et la taille de la cuve, on a pu remarquer que le paramètre important était le rapport entre la surface frontale des bulles d'air et la largeur de la cuve.

Pour la suite, il convient de confirmer ces résultats par l'étude de cet écoulement dans une cuve de taille intermédiaire, afin de confirmer la figure 19. Ensuite, comme on a vu avec l'équation 3, il reste encore d'autres paramètres, à étudier, à commencer par la tailles des grains, la hauteur d'eau et la viscosité du fluide. Pour changer la viscosité du fluide, nous avons penser à utiliser du UCON, qui est un liquide fortement visqueux, mais totalement miscible avec l'eau. Ainsi en controlant le rapport de quantité entre l'eau et le UCON, on peut contrôler la viscosité du fluide, et étudier plus facilement l'impact de la viscosité sur l'écoulement. Il reste à savoir si la présence d'eau dans le mélange eau-UCON ne forme pas d'agrégats avec le polystyrène ou le PVC.

En dehors des paramètres vus dans ce rapport, on peut aussi étudier ce qu'il se passerait en utilisant un autre gaz que l'air, de densité différente, pour voir si un gaz plus dense transporte mieux les grains. Pour finir, l'étude d'une possible ségrégation granulaire dans cet écoulement semble être une étude intéressante, qui est un phénomène courant dans les milieux granulaires non monodisperses. En partant d'un milieu granulaire composé à 50-50 de PVC et de polystyrène, observer expérimentalement si l'écoulement de bulles à travers ce milieu granulaire bidisperse engendre une ségrégation entre les particules de PVC et de polystyrène.

Références

- [1] F. Zoueshtiagh, A. Merlen, "Effect of a vertically flowing water jet underneath a granular bed", *Phys. Rev. E* **75**, 056313, (2007).
- [2] O. Johnsen, R. Toussaint, K. J. Maloy, E. G. Flekkoy, "Pattern formation during air injection into granular materials confined in a circular Hele-Shaw cell", *Phys. Rev. E*, **74**, 011301, (2006).
- [3] H. Darcy, *Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon*. Victor Dalmont, Paris, (1856).
- [4] P. Saffman, G. Taylor, "The penetration of a fluid into a porous medium or Hele-Shaw cell containing a more viscous liquid", *Proc. Roy. Soc. London A* **245**, 312, (1958).
- [5] O. Johnsen, C. Chevalier, A. Lindner, R. Toussaint, E. Clément, K. J. Maloy, E. G. Flekkoy, J. Schmittbuhl, "Decompaction and fluidization of a saturated and confined granular medium by injection of a viscous liquid or gas", *Phys. Rev. E* **78**, 051302, (2008).
- [6] C. Chevalier, A. Lindner, M. Leroux, "Morphodynamics during air injection into a confined granular-suspension", *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* **158**, 63, (2009).
- [7] Taylor, M., Dillon, W., and Pecher, I., "Trapping and migration of methane associated with the gas hydrate stability zone at the Blake ridge diapir : new insights from seismic data", *Marine Geology*, **164**, 79–89, (2000).
- [8] Kang, Q., Tsimpanogiannis, I., Zhang, D., and Lichtner, P., "Numerical simulation of pore-scale phenomena during CO₂ sequestration in oceanic sediments", *Fuel Processing Technology*, **86**, 1647–1665, (2005).
- [9] Tsimpanogiannis, I. and Lichtner, P., "Pore-network study of methane hydrate dissociation", *Physical Review E*, **74** 056303, (2006).
- [10] Newman, K., Cormier, M.-H., Weissel, J., Driscoll, N., Kastner, M., Solomon, E., Robertson, G., Hill, J., Singh, H., Camili, R., and Eustice, R. "Active methane venting observed at giant pockmarks along the U.S. mid-Atlantic shelf break", *Earth and Planetary Science Letters*, **267** 341–352, (2008).
- [11] Fan, L.-S. *Gas-Liquid-Solid Fluidization Engineering*. Butterworths, Stoneham, MA, USA (1989).
- [12] Dudukovic, M., Larachi, F., and Mills, P., "Multiphase catalytic reactors : A perspective on current knowledge and future trends.", *Catalysis Reviews- Science and Engineering*, **44**(1), 123–246 (2002).
- [13] Rados, N. *Slurry bubble column hydrodynamics*. PhD thesis, Sever Institute of Washington Technology (2003).
- [14] L. Gostiaux, H. Gayvallet, J.-C. Geminard, "Dynamics of a gas bubble rising through a thin immersed layer of granular material : an experimental study", *Gran. Mat.* **4**, **39**, (2002).
- [15] G. Varas, V. Vidal, J.-C. Geminard, "Dynamics of crater formations in immersed granular materials", *Phys. Rev. E* **79**, 021301, (2009).
- [16] G. Varas, V. Vidal, J.-C. Geminard, "Venting dynamics of an immersed granular layer", *Phys. Rev. E* **83**, 011302, (2011).
- [17] G. Varas, V. Vidal, J.-C. Geminard, "Morphology of air invasion in an immersed granular layer", *Phys. Rev. E* **83**, 061302, (2011).
- [18] G. Varas, V. Vidal, J.-C. Geminard, "Air invasion in a granular layer immersed in a fluid : morphology and dynamics", *Granular Matter*, **15**(6), 801-810 (2013).

- [19] E. Guazzelli, J.F. Morris, *A physical introduction to suspension dynamics*, Cambridge Texts in Applied Mathematics, Cambridge University Press (2012).
- [20] M. Roudet, *Hydrodynamique et transfert de masse autour d'une bulle confinée entre deux plaques*, (Thèse soutenue en 2008), Université de Toulouse.
- [21] B. Molin, *Hydrodynamique des structures offshore*, Editions TECHNIP (2002).
- [22] N. Hooshyar, J. Ruud van Ommen, P. J. Hamersma, S. Sundaresan, R. F. Mudde, "Dynamics of single rising bubbles in neutrally buoyant liquid-solid suspensions", *JFM rapids*, **110**, 1-5 (2013).

Annexes

Programme Matlab pour mesurer $\frac{A}{A_0}$ en fonction du temps

```
close all
clear all
clc

filenameinit=['D:\Clement\PVC+ethanol\2015_04_13\PVC_0.1L\frame_' 1 '.tiff'];
iminit=imread(filenameinit);
imcinit=iminit(400:1000,245:760);
l=graythresh(imcinit);
imbwinit=im2bw(imcinit,0.25);
Ainit=(size(imcinit,1)*size(imcinit,2)-sum(sum(imbwinit)));

imshow(imbwinit)

for i=1:449
filename=['D:\Clement\PVC+ethanol\2015_04_13\PVC_0.1L\frame_' i '.tiff'];
im=imread(filename);
imc=im(400:1000,245:767);
l=graythresh(imc);
imbw=im2bw(imc,0.25);
imshow(imbw);
A(i)=(size(imc,1)*size(imc,2)-sum(sum(imbw)));
a(i)=A(i)/Ainit;
end

for i=1:449;
x(i)=i;
end

T=a(1:1,500:599);

M=mean(T)

figure;
plot(a)
```

Programme Matlab pour mesurer La fraction volumique dans la suspension en fonction du temps

```
close all
clear all
clc

filenameinit='D:\Clement\PVC cellule large max\0.01L\frame_1.tiff';

iminit=imread(filenameinit);

imcinit=iminit(380:900,80:1200);
imginit=imcinit(21:168,210:370);
imdinit=imcinit(21:168,750:930);
immin=imcinit(300:390,200:400);

Imin=mean(mean(immin));

imshow(imcinit);

Phizero=0.355

for i=1:599
    filename=['D:\Clement\PVC cellule large max\0.75L\frame_' i '.tiff'];
    im=imread(filename);
    imc=im(380:900,80:1200);
    img=imc(21:168,210:440);
    imd=imc(21:168,720:930);

    Ig(i)=mean(mean(img));
    Id(i)=mean(mean(imd));
    I(i)=0.5*(Ig(i)+Id(i));

    aPhi(i)=Phizero*((I(1)-I(i))/(I(1)-Imin));

end

m=Phi(1:1,300:599);

for i=1:599
    x(i)=i;
end

figure;
plot(aPhi)

Phimoy=mean(m)
```