

Remontée de bulles dans une suspension dense

Valérie Vidal, Clément Picard & Sylvain Joubaud

Laboratoire de Physique, École Normale Supérieure de Lyon, CNRS, Université de Lyon, 46 Allée d'Italie, F-69342 Lyon, France
 valerie.vidal@ens-lyon.fr

Résumé. L'injection de gaz à la base d'un lit granulaire immergé formé de particules légèrement plus lourdes que le liquide environnant conduit à la formation, en régime stationnaire, d'une suspension dense résultant d'une compétition entre l'entraînement des particules par les bulles et leur sédimentation. L'étude statistique des propriétés des bulles dans ce régime montre qu'au-delà d'un débit critique d'injection de gaz, la population de bulles se scinde en deux avec l'apparition de petites bulles dans la suspension. L'orientation de l'axe principal des bulles montre deux bifurcations, avec une zone de coexistence. De manière non intuitive, l'extension horizontale de la région explorée par les bulles ne dépend pas du débit mais uniquement de la gravité effective.

Abstract. Gas injection at the bottom of an immersed granular layer made of particles slightly heavier than the surrounding fluid leads, in the stationary regime, to the formation of a dense suspension resulting from the competition between particle entrainment by bubbles and sedimentation. The statistical study of bubbles characteristics shows that above a critical gas flow-rate, the bubble population splits in two, with small bubbles appearing in the suspension. The bubble main orientation axis displays two bifurcations, with a coexistence zone. Contrary to the intuition, the horizontal extent of the region explored by bubbles depends not on the flow-rate, but only on the effective gravity.

1 Introduction

Une suspension dense désigne des particules immergées dans un liquide environnant, dont la fraction volumique est typiquement supérieure à 10–20 %. Au-delà de ces fractions volumiques, en effet, pour des particules rigides non browniennes, des effets collectifs apparaissent et la viscosité de la suspension ne peut plus être décrite de manière simple par les équations d'Einstein et Batchelor [1–3]. Plusieurs lois empiriques ont été proposées pour décrire les suspensions denses [4, 5], et des études récentes soulignent leur rhéologie complexe [6, 7]. La remontée de bulles dans un tel milieu se rencontre dans de nombreux phénomènes naturels ou industriels, tels que l'émission de gaz (CO_2 ou méthane) au fond des océans [8], les réacteurs catalytiques [9] ou les échangeurs thermiques [10]. La présence simultanée des phases solide, liquide et gaz rend ces écoulements multiphasiques complexes. Cependant, à notre connaissance, seuls deux régimes extrêmes ont été étudiés : le cas fondamental d'une bulle unique remontant dans une suspension de particules isodenses [11], ou le passage d'un gaz à travers un lit granulaire composé de particules lourdes, entraînant une fluidisation partielle ou complète du milieu [10, 12].

Nous nous intéressons ici au cas intermédiaire de particules sédimentant lentement dans le liquide environnant, dans une configuration quasi-bidimensionnelle (cellule de Hele-Shaw), qui permet une visualisation directe des écoulements. La remontée de gaz met en suspension les grains et, en régime stationnaire, on observe des bulles remontant dans une suspension dense. Ce travail a pour but de quantifier l'influence du débit de gaz injecté et de la gravité effective sur les propriétés statistiques de ces bulles : taille, orientation, position et fluctuations.

2 Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental est constitué d'une cellule de Hele-Shaw (plaques de verre séparées par un espacement faible, $e = 2$ mm) de largeur $L_c = 13.6$ cm et de hauteur 30 cm (Fig. 1 (a), gauche). La cellule est initialement remplie de grains (hauteur $h_g = 9$ cm) immergés dans un liquide (hauteur

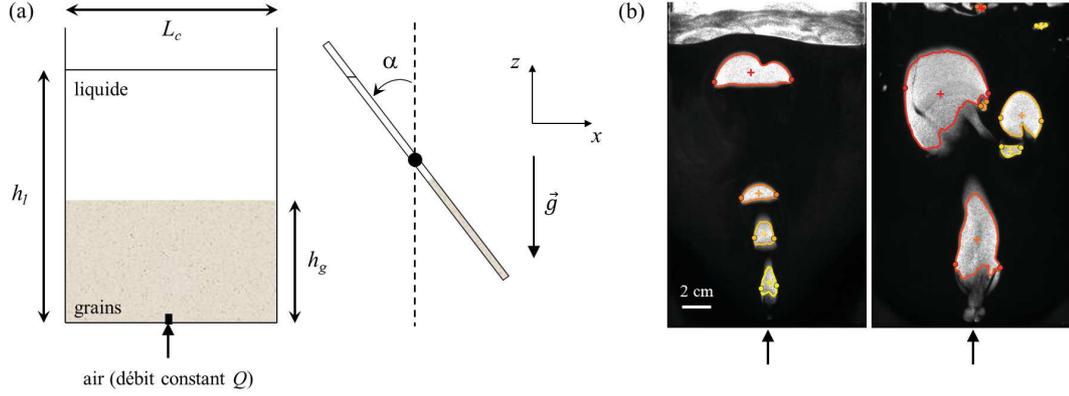


FIGURE 1. (a) Dispositif expérimental vu de face (gauche) et de côté (droite). α indique l'angle d'inclinaison de la cellule par rapport à la verticale. (b) Remontée de bulles en régime stationnaire pour $Q = 0,2$ L/min (gauche) et $Q = 1,5$ L/min (droite) [$\alpha = 10^\circ$]. Le contour des bulles est indiqué, ainsi que leur centre de masse (X_c, Z_c) (croix) et leur extension horizontale (cercles pleins).

totale $h_l = 18$ cm). Les grains sont des particules de PVC (densité $\rho_g = 1380$ kg/m³) polydisperses, non sphériques, de taille typique 230 μ m (Goodfellow LS395895 MKS). Le liquide est de l'éthanol (Merck Millipore, densité $\rho_l = 790$ kg/m³), permettant d'éviter la formation d'agrégats. À l'instant $t = 0$ s, de l'air est injecté à débit constant Q en bas de la cellule (contrôleur de débit Bronkhorst, Mass Stream, series D6311) par un injecteur de diamètre interne 1 mm. L'ensemble de l'expérience est monté sur un cadre permettant une inclinaison d'un angle α par rapport à la verticale (Fig. 1 (a), droite). La cellule est rétroéclairée par un panneau LED (dalle EuroshopLed), permettant une visualisation directe des bulles et des particules en suspension par ombroscopie (Fig. 1 (b)). Les images de l'expérience sont enregistrées via une caméra (PixeLINK, PL-B741U) à une fréquence de 1 Hz. Quelques gouttes de colorant alimentaire (bleu E133, *MeilleurdumChef.com*) ont été rajoutées dans le liquide afin d'augmenter le contraste et de repérer correctement les bulles par simple binarisation d'images.

Au cours des expériences, nous avons varié le débit entre 0,1 et 1,5 L/min, et l'angle d'inclinaison entre 0 et 40°. En régime stationnaire, on observe qu'une grande partie des grains est mise en suspension (Fig. 1 (b)), et que les bulles ont des propriétés très différentes selon les paramètres (α, Q) imposés. Afin de quantifier ces propriétés, un programme Matlab (*MathWorks*®) a été élaboré, permettant d'extraire pour chaque image la taille, l'orientation principale, la position du centre de masse et l'extension horizontale des bulles (Fig. 1 (b)).

3 Taille et orientation des bulles

3.1 Diamètre équivalent

Dans le cas d'une géométrie confinée, des travaux précédents [13, 14] ont montré que l'épaisseur e_f des films de lubrification entre une bulle et la paroi est donnée par la relation : $e_f/e \sim Ca^{2/3}/(1 + Ca^{2/3})$, où $Ca = \mu U/\sigma$ est le nombre capillaire avec $\mu = 1,15$ mPa·s la viscosité dynamique du fluide, $U \sim 10$ cm/s la vitesse des bulles et $\sigma \sim 20$ mN/m la tension de surface air/éthanol. Dans l'ensemble de nos expériences, $e_f/e \ll 1$ et l'on peut donc considérer le volume des bulles comme égal à leur surface apparente S , multipliée par l'épaisseur e de la cellule. Leur diamètre équivalent est alors calculé comme $d_{eq} = \sqrt{4S/\pi}$. La figure 2 (a) montre deux exemples de distributions de taille de bulles pour des débits différents, les autres paramètres étant inchangés. Pour des débits faibles ($Q = 0,2$ L/min), la distribution est large mais montre un maximum unique, permettant de définir un diamètre équivalent moyen pour l'ensemble des bulles. Pour des débits plus importants cependant, on observe un dédoublement de la population de

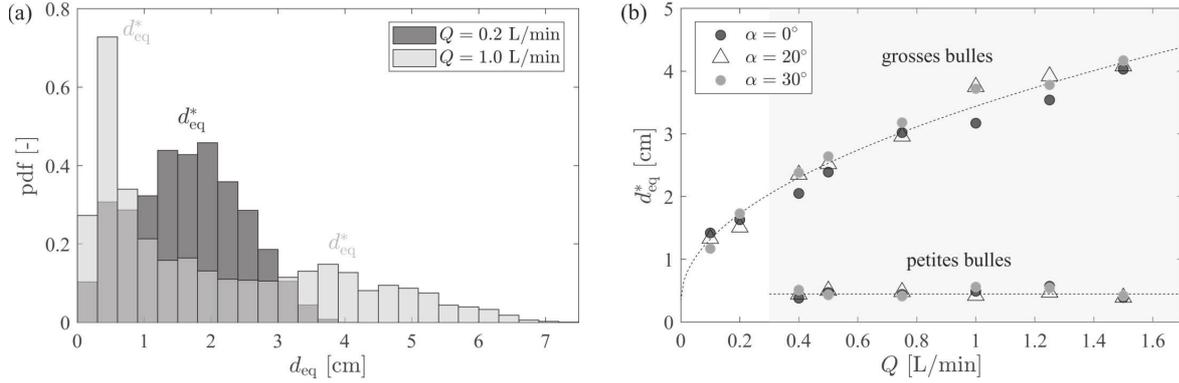


FIGURE 2. (a) Densité de probabilité pour le diamètre équivalent des bulles d_{eq} [$\alpha = 30^\circ$]. d_{eq}^* indique le diamètre typique (densité de probabilité maximale) de la ou des population(s) de bulles (deux populations à haut débit). Le gris non indiqué en légende correspond au recouvrement des histogrammes. (b) Diamètre équivalent des bulles d_{eq}^* en fonction du débit Q pour différents angles α . Pour $Q > 0,3$ L/min, on observe deux populations de bulles (deux pics sur l’histogramme en (a)) : une population dont la taille suit une loi en \sqrt{Q} (fit en pointillés $0,34 + 3,1\sqrt{Q}$) et une population de petites bulles de taille constante $d_{\text{eq}}^* = 0,45$ cm (fit en pointillés).

bulles, avec l’apparition de petites bulles (Fig. 2 (b)). Ce phénomène est dû à une déstabilisation et une fragmentation beaucoup plus importante des bulles à des débits plus élevés. La figure 2 (b) peut être vue comme un diagramme de bifurcation, avec un débit critique $Q^* \simeq 0,3$ L/min.

Les petites bulles apparaissant pour $Q > Q^*$ ont un diamètre constant $d_{\text{eq}} \simeq 4,5$ mm, indépendant du débit et de l’angle d’inclinaison α . Il est intéressant de noter que la population de grosses bulles suit une loi en \sqrt{Q} , qui n’est pas affectée par l’apparition des petites bulles pour $Q = Q^*$ (ligne pointillée du haut, Fig. 2 (b)). L’ajustement en \sqrt{Q} sur l’ensemble des angles explorés apporte deux informations importantes : (1) le volume des bulles, qui varie au premier ordre comme d_{eq}^2 , est directement proportionnel au débit d’air injecté ; (2) il existe une taille minimale de bulles dans le liquide, donnée par l’ordonnée à l’origine de l’ajustement, $d_{\text{eq}}^{\text{min}} \simeq 3,4$ mm. Cette taille minimale est du même ordre de grandeur que la taille typique de la population de petites bulles.

3.2 Orientation

L’orientation principale d’une bulle est ici définie comme l’angle θ entre la verticale et le grand axe de l’ellipse qui ajuste au mieux la bulle. Cette dernière est calculée par la fonction *regionprops* de Matlab, qui permet de quantifier les propriétés d’objets connectés dans une image binaire, obtenue dans notre cas par seuillage des images brutes issues de l’expérience. La figure 3 présente les histogrammes (densité de probabilité) en coordonnées polaires pour les orientations des bulles en régime stationnaire, pour différents débits Q et angles α . Une probabilité importante autour de 0° est la signature de bulles étirées verticalement, tandis qu’une probabilité importante vers 90 ou 270° indiquent des bulles allongées horizontalement. Ce dernier cas est similaire à la morphologie de bulles remontant dans un liquide simple lorsque leur volume est suffisamment grand pour que les forces capillaires ne soient plus capables de maintenir une forme circulaire (entre les deux plaques de la cellule de Hele-Shaw). Pour de faibles débits ($Q = 0,1$ L/min), la majorité des bulles sont orientées horizontalement ; lorsqu’on augmente le débit, quel que soit l’angle α , on observe une distribution d’angles bimodale, avec une partie des bulles désormais orientée verticalement ; enfin, pour de forts débits ($Q = 1,5$ L/min), les bulles sont en majorité allongées verticalement — sauf pour la cellule verticale ($\alpha = 0^\circ$) pour laquelle on garde une distribution bimodale.

Ces résultats sont résumés sur la figure 4. Lorsque l’on trace θ en fonction de Q , on observe les trois comportements décrits ci-dessus, illustrés par des photos de bulles tirées des expériences (Fig. 4 (a)). La zone grisée dans la figure indique la gamme de débits pour laquelle les deux orientations de bulles (horizontale et verticale) sont observées. La figure 4 (b) reporte dans le diagramme (α, Q) les limites

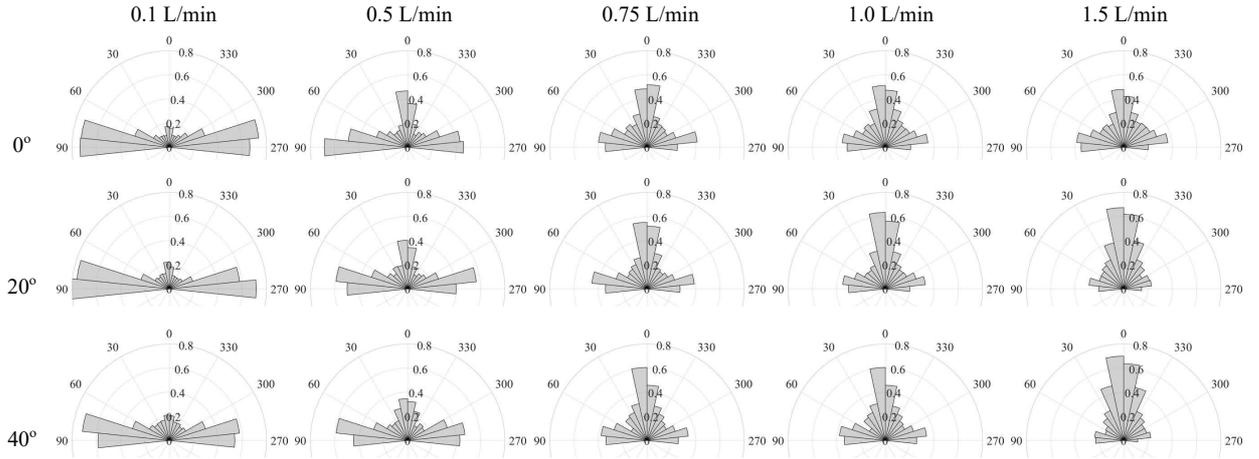


FIGURE 3. Histogramme (densité de probabilité) en coordonnées polaires représentant l’orientation principale θ des bulles remontant dans la suspension dense pour différents débits Q et angles d’inclinaison α .

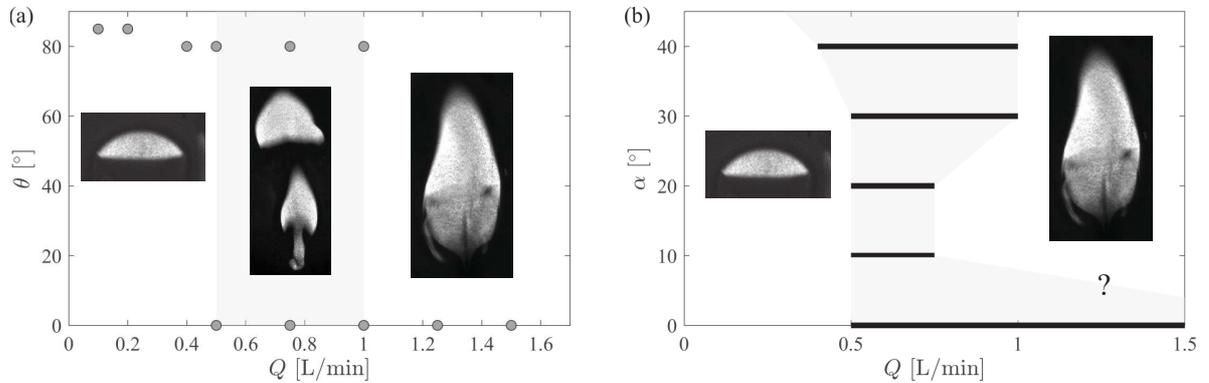


FIGURE 4. (a) Angle principal θ d’orientation des bulles en fonction de Q [$\alpha = 30^\circ$]. La région grisée représente la gamme de débits pour lesquels on observe deux orientations principales. Les photos illustrent des exemples typiques de bulles pour $Q = 0,2, 0,75$ et $1,25$ L/min (de gauche à droite). (b) Diagramme des régimes (α, Q). Les lignes noires (et par extrapolation la région grisée) indiquent la zone de coexistence de deux orientations principales des bulles.

d’existence de cette zone de coexistence pour les angles et les débits explorés (lignes noires). La région en grisée indique, par extrapolation, la zone dans laquelle on peut observer cette coexistence dans ce diagramme des régimes. Seule la limite basse reste incertaine, car nous n’avons pu atteindre pour $\alpha = 0^\circ$ de débit suffisamment élevé pour quitter cette zone de coexistence. Le point d’interrogation indique une extrapolation possible.

4 Localisation et fluctuations

Dans cette section, nous nous intéressons à la zone explorée par les bulles lors de leur remontée dans la suspension dense. La figure 5 (a) montre trois exemples de cartographie de la position du centre de masse des bulles (X_c, Z_c) en régime stationnaire, sur l’ensemble de l’expérience (typiquement 1 000 s). Le nombre de bulles varie selon les débits, allant d’environ 4 200 pour $Q = 0,1$ L/min (Fig. 5 (a), gauche) à 15 400 pour $Q = 1,5$ L/min (Fig. 5 (a), droite) dans l’exemple présenté ($\alpha = 0^\circ$). Lorsque le débit augmente, les bulles semblent explorer une région latérale de plus en plus grande et sont limitées lorsqu’elles remontent

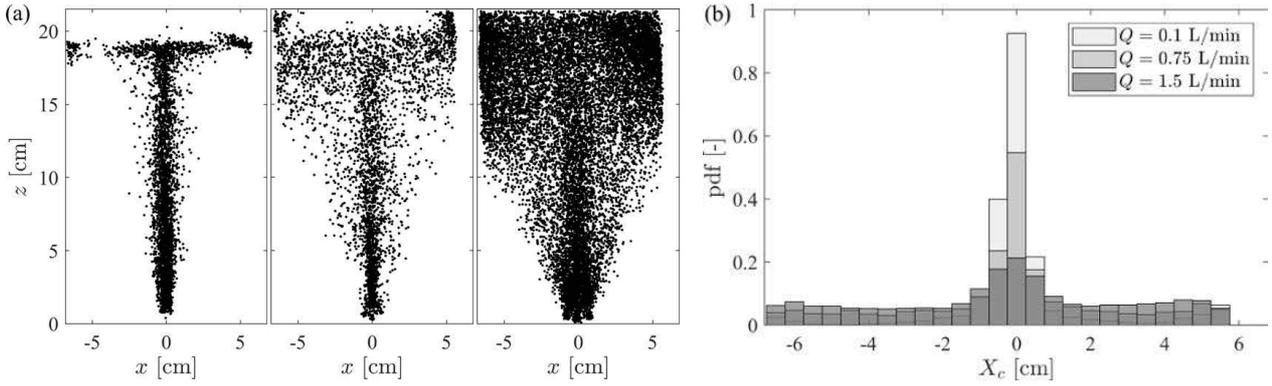


FIGURE 5. (a) Cartographie des positions (X_c, Z_c) du centre de masse des bulles remontant dans la suspension pour $Q = 0,1$ (gauche), $0,75$ (centre) et $1,5$ L/min [$\alpha = 0^\circ$]. (b) Histogramme (densité de probabilité) des positions horizontales des bulles, X_c , pour les trois cas présentés en (a).

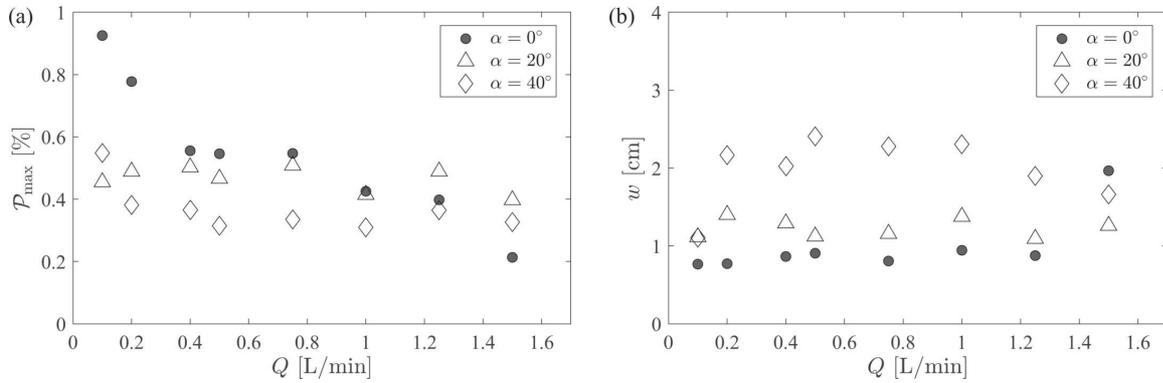


FIGURE 6. (a) Maximum \mathcal{P}_{\max} et (b) largeur à mi-hauteur w de la fonction densité de probabilité des positions horizontales des bulles (voir histogramme de la figure 5 (b)).

par les bords de la cellule. Afin de quantifier l'extension horizontale de cette zone d'exploration, on a représenté sur la figure 5 (b) les densités de probabilité pour la position horizontale des bulles, pour différents débits ($X_c = 0$ cm correspondant ici à des bulles dont le centre de masse est à la verticale du point d'injection). Lorsque le débit augmente, on voit que la probabilité qu'une bulle soit localisée au centre de la cellule diminue. Le plateau pour $|X_c| > 3-4$ cm est la signature des bulles s'étalant sous la surface libre du fluide (voir Fig. 5 (a), gauche) et n'est pas analysé ici.

La figure 6 (a) représente la valeur maximale \mathcal{P}_{\max} de la densité de probabilité de X_c (valeur maximale des histogrammes de la figure 5 (b)) en fonction du débit, pour différentes inclinaisons α de la cellule. Pour la cellule verticale ($\alpha = 0^\circ$), la décroissance de \mathcal{P}_{\max} est claire, même si un plateau est observé entre $Q = 0,4$ et $0,8$ L/min. Lorsque α augmente, en revanche, la décroissance est beaucoup moins nette, et quel que soit le débit, la probabilité pour qu'une bulle soit à la verticale du point d'injection est comprise entre 30 et 50 % environ. Dès que l'on incline la cellule, en effet, il est plus facile pour les bulles d'aller explorer latéralement la suspension dense, même à bas débit, contrairement au cas de la cellule verticale. Pour $Q > 0,3$ L/min, comme montré en section 3.1, de nombreuses petites bulles sont formées suite à une instabilité et fragmentation des grosses bulles. Leur centre de masse n'a qu'une faible probabilité de se trouver à la verticale de l'injecteur, et on observe au contraire qu'elles explorent une région latérale importante (voir Fig. 1 (b), droite). Ce processus explique les points dispersés, mais du même ordre de grandeur environ, pour $Q > 0,3$ L/min sur la figure 6 (a).

La figure 6(b) montre la largeur à mi-hauteur w de la densité de probabilité de X_c (histogrammes Fig. 5 (b)) en fonction du débit, pour différentes inclinaisons α de la cellule. Si l'on excepte le point à $Q = 1,5$ L/min pour $\alpha = 0^\circ$, w reste environ constant quel que soit le débit, et augmente lorsque α augmente. Statistiquement, l'extension horizontale typique de la région explorée par les bulles ne dépend donc pas du débit, mais uniquement de la gravité effective dans le système.

5 Conclusion

L'étude expérimentale de la remontée de bulles dans une suspension dense, en cellule de Hele-Shaw, montre l'apparition, au-delà d'une valeur de débit critique $Q_c \simeq 0,3$ L/min, d'une population de petites bulles de diamètre constant et environ égal à 4,5 mm. La population de bulles de taille plus importante voit son diamètre augmenter selon une loi en \sqrt{Q} , prévisible en géométrie quasi-bidimensionnelle, sans présenter de discontinuité pour $Q \geq Q_c$. L'étude statistique de l'orientation principale des bulles montre l'existence de deux bifurcations lorsque l'on augmente le débit : à faible débit, les bulles sont allongées horizontalement ; à fort débit, elles sont allongées verticalement ; pour des débits intermédiaires, on observe une zone de coexistence entre les deux orientations, dont l'extension varie selon la gravité effective.

Les résultats sur la position des bulles et leurs fluctuations montrent que les bulles explorent une région plus étendue horizontalement lorsque l'on incline la cellule (diminution de la gravité effective). De manière contre-intuitive cependant, la région typique explorée est indépendante du débit, malgré l'apparition de petites bulles dans la suspension dense pour $Q \geq Q_c$. Ce résultat peut avoir une importance dans le cas d'applications industrielles car il permet de caractériser la zone explorée par les bulles, ce qui est intéressant si l'on veut optimiser le nombre et la position de multiples injecteurs de gaz.

Références

1. A. EINSTEIN, Zur Theorie der Brownschen Bewegung, *Ann. Phys.*, **324**, 371–381 (1906).
2. G. K. BATCHELOR, Effect of Brownian motion on bulk stress in a suspension of spherical particles, *J. Fluid Mech.*, **83**, 97–117 (1977).
3. E. GUAZZELLI & S. MORRIS, *A physical introduction to suspension dynamics*, Cambridge University Press (2011).
4. I. M. KRIEGER & T. J. DOUGHERTY, A mechanism for non-Newtonian flow in suspensions of rigid spheres, *Trans. Soc. Rheol.*, **3**, 137–152 (1959).
5. I. E. ZARRAGA, D. A. HILL & D. T. LEIGHTON, The characterization of the total stress of concentrated suspensions of noncolloidal spheres in Newtonian fluids, *J. Rheol.*, **44**, 185–220 (2000).
6. F. BOYER, E. GUAZZELLI & O. POULIQUEN, Unifying suspension and granular rheology, *Phys. Rev. Lett.*, **107**, 188301 (2011).
7. E. LERNER, G. DÜRING & M. WYART, A unified framework for non-Brownian suspension flows and soft amorphous solids, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, **109**, 4798–4803 (2012).
8. H. SVENSEN *et al.*, Release of methane from a volcanic basin as a mechanism for initial Eocene global warming, *Nature*, **429**, 542–545 (2004).
9. H. SVENSEN *et al.*, Liquid-solid mass transfer for microchannel suspension satalysis in gas-liquid and liquid-liquid segmented flow, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **54**, 4699–4708 (2015).
10. B. BOISSIERE *et al.*, Experimental hydrodynamic study of gas-particle dense suspension upward flow for application as new heat transfer and storage fluid, *Can. J. Chem. Eng.*, **93**, 317–330 (2015).
11. N. HOOSHYAR *et al.*, Dynamics of single rising bubbles in neutrally buoyant liquid–solid suspensions, *Phys. Rev. Lett.*, **110**, 244501 (2013).
12. R. PORYLES, V. VIDAL & G. VARAS, Bubbles trapped in a fluidized bed: Trajectories and contact area, *Phys. Rev. E*, **93**, 032904 (2016).
13. P. AUSSILLOUS & D. QUÉRÉ, Quick deposition of a fluid on the wall of a tube, *Phys. Fluids*, **12**, 2367–2371 (2000).
14. M. ROUDET, *Hydrodynamique et transfert de masse autour d'une bulle confinée entre deux plaques*, Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse (2008).