



HAL
open science

Ségrégation et mélange dans les suspensions bidisperses fluidisées

Angélique Deboeuf, Georges Gauthier, Jérôme Martin, Dominique Salin

► **To cite this version:**

Angélique Deboeuf, Georges Gauthier, Jérôme Martin, Dominique Salin. Ségrégation et mélange dans les suspensions bidisperses fluidisées. CFM 2007 - 18ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2007, Grenoble, France. hal-03362151

HAL Id: hal-03362151

<https://hal.science/hal-03362151>

Submitted on 1 Oct 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Ségrégation et mélange dans les suspensions bidisperses fluidisées

Angélique Deboeuf, Georges Gauthier, Jérôme Martin & Dominique Salin

Laboratoire Fluides, Automatique et Système Thermiques
Bâtiment 502, Campus Universitaire, 91405 Orsay Cedex, France
deboeuf@fast.u-psud.fr

Résumé :

Nous avons étudié la fluidisation d'une suspension bidisperse de particules macroscopiques, à bas nombre de Reynolds. La suspension est constituée de billes de verre sphériques, de deux diamètres différents, 190 et 155 microns. Nous avons utilisé une technique acoustique, basée sur la propagation d'une onde de fréquence bien choisie (3 MHz) pour mesurer les variations de la concentration moyenne et de la composition de la suspension le long de l'axe vertical. L'efficacité de la fluidisation à ségréger ou mélanger les particules de tailles différentes a été testée pour différentes vitesses débitantes imposées. Toutefois, l'acquisition successive des profils de composition, pour une vitesse de fluidisation constante, semble indiquer qu'aucun état stationnaire n'est atteint au cours de nos expériences. En revanche, nos expériences à débit modéré mettent clairement en évidence des régimes d'oscillations entre des états mélangés et des états partiellement ségrévés.

Abstract :

We study experimentally the fluidization of a bidisperse suspension of macroscopic particles, at low Reynolds number. The suspension is obtained using glass beads of two different diameters, 190 and 155 microns. An acoustic scanner, based on the measurement of a 3 MHz sound wave propagation (velocity and attenuation), provides the variations of the suspension composition along the vertical axis. We have investigated the efficiency of the fluidization column to either segregate or mix the bidisperse suspension, for different flow rates. However, successive scans of the column, for a given imposed flow rate, have revealed that no stationary state was achieved in our experiments. Moreover, in the investigated range of low injection rates, the fluidized bidisperse suspension is shown to exhibit a regime of oscillations between homogeneous and segregated states.

Mots-clefs :

suspension bidisperse ; lit fluidisé ; ségrégation

1 Introduction

La vitesse de sédimentation d'une suspension monodisperse homogène est très bien décrite par la relation empirique de Richardson et Zaki (1954), $U(\phi) = U^0(1 - \phi)^n$, où U^0 est la vitesse de Stokes, ϕ , la fraction volumique en particules, et n , un exposant proche de 5.5 pour des sphères rigides sédimentant à bas nombre de Reynolds. Cette relation, qui traduit la diminution de la vitesse de sédimentation avec ϕ , s'applique en particulier dans les lits fluidisés à bas nombre de Reynolds (stable), où un flux ascendant de fluide compense la sédimentation des particules. En pratique, si une vitesse débitante V_d est imposée dans la colonne de fluidisation, la hauteur de la suspension fluidisée s'adapte pour que $U(\phi) = V_d$ soit vérifiée. La suspension est alors stationnaire : la friction visqueuse de l'écoulement compense le poids apparent des particules, et celles-ci sont immobiles en moyenne. Il faut toutefois noter que leurs vitesses, de moyenne nulle, présentent des fluctuations du même ordre de grandeur que la vitesse de sédimentation.

Dans des suspensions contenant deux types de particules (différentes en taille et/ou en densité), chaque type de particule a également une vitesse de sédimentation U_i ($i = 1, 2$) propor-

tionnelle à sa vitesse de Stokes U_i^0 . Toutefois, le rapport U_i/U_i^0 est une fonction dépendant à la fois des deux concentrations ϕ_1 et ϕ_2 , du rapport de tailles, et du rapport de densités des particules. La forme de cette fonction est cruciale pour décrire les phénomènes de ségrégation par décantation : en effet le phénomène de ségrégation au sein d'une suspension bidisperse aura lieu dès que les deux types de particules ne sédimentent pas à la même vitesse, et sera au contraire inhibé si la suspension a une composition telle que $U_1 = U_2$. Or, il est à noter qu'à ce jour, aucune expression de la vitesse de sédimentation en suspension bidisperse ne fait l'unanimité, et l'inhibition de la ségrégation, observée ou prédite à forte concentration par certains auteurs comme Hoyos et al (1994) ou Funamizu et Takakuwa (1996), semble en désaccord avec les modèles de Mirza et Richardson (1979) ou le modèle de Smith (1997).

Nous présentons ici l'étude menée sur une suspension bidisperse (deux tailles de particules) fluidisée à bas nombre de Reynolds. Le lit fluidisé est a priori l'outil idéal pour traquer les inhibitions de ségrégation. En effet, utilisé à vitesse débitante V_d constante, il permet d'obtenir une suspension stationnaire, dans laquelle toutes les particules doivent avoir une vitesse moyenne nulle. Ainsi, une suspension bidisperse ne pourra être stationnaire en fluidisation que si elle correspond à une composition (ϕ_1, ϕ_2) d'inhibition de ségrégation, pour laquelle $U_1 = U_2 = V_d$. Si en revanche, une telle composition n'existe pas pour la vitesse de fluidisation imposée, la suspension bidisperse se ségrégera pour se présenter à l'état stationnaire, sous la forme de deux suspensions monodisperses, l'une au-dessus de l'autre.

2 Dispositif expérimental

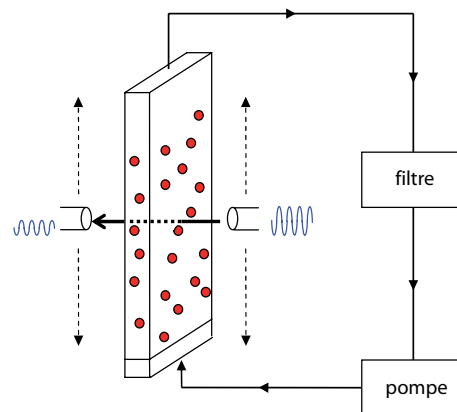


FIG. 1 – Schéma du montage expérimental

La figure 1 représente une vue schématique du dispositif expérimental utilisé. Le fluide suspendant est injecté uniformément, à travers un milieu poreux, à la base de la colonne de fluidisation. Cette dernière, réalisée en polycarbonate, a une section $S = 5 \text{ cm}^2$ uniforme sur toute sa hauteur $H = 50 \text{ cm}$. Elle est entièrement immergée dans un bain d'eau thermostaté, de même qu'une paire de transducteurs acoustiques montés sur un chariot de déplacement vertical. Cette paire de transducteurs cylindriques, de diamètre 13 mm, permet de mesurer la vitesse et l'atténuation d'une onde acoustique à 3 MHz, se propageant à travers la cellule (l'eau du bain assure ici la continuité d'impédance). Le chariot permet de plus de scanner la cellule sur toute sa hauteur.

3 Etalonnage des suspensions monodisperses

Les suspensions bidisperses étudiées sont composées de billes de verre sphériques, de densité $d_s = 2.5$, et de diamètre compris entre 150 et 160 μm pour les petites et entre 180 et 200 μm pour les grosses. Le fluide suspensé est un mélange eau/glycérine de densité $d = 1.189$ et de viscosité $\eta = 25$ cP.

Un étalonnage préalable a été réalisé sur les deux suspensions monodisperses, chacune obtenue par la fluidisation de 30 g de particules. La loi $V_d = U^o(1 - \phi)^n$, testée avec les mesures de ϕ déduites de la hauteur h de la suspension fluidisée, a été vérifiée dans la gamme accessible $11\% < \phi < 57\%$, avec les valeurs $U_1^o = 0.80$ mm.s⁻¹ et $n_1 = 4.94$, et $U_2^o = 0.62$ mm.s⁻¹ et $n_2 = 4.73$, respectivement pour les grosses et les petites particules.

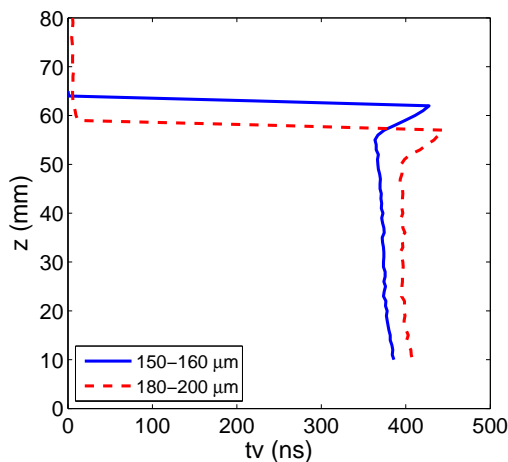


FIG. 2 – Profil de temps de vol dans les grosses et petites billes, pour $V_d = 0.066$ mm.s⁻¹.

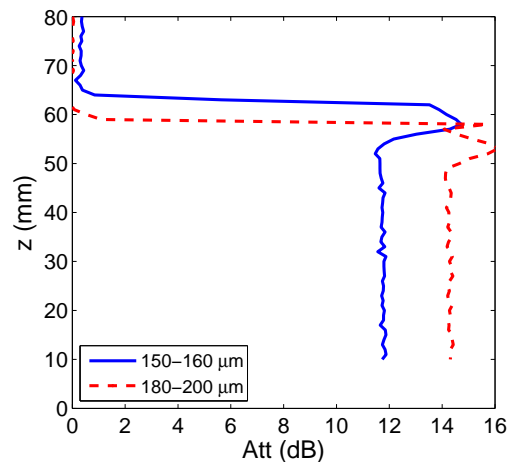


FIG. 3 – Profil d'atténuation dans les grosses et petites billes, pour $V_d = 0.066$ mm.s⁻¹.

Les figures 2 et 3 représentent respectivement les variations de temps de vol et d'atténuation par rapport à un balayage de référence réalisé en absence de particules. Les figures comparent les profils mesurés pour la même vitesse débitante $V_d = 0.066$ mm.s⁻¹, le long de chacune des suspensions monodisperses. Leurs hauteurs, mesurées optiquement, étaient ici égales à $z_1 = 60.2$ mm et $z_2 = 63.9$ mm respectivement pour les grosses et les petites particules. Pour chacun des profils, les valeurs de temps de vol et d'atténuation sont nulles au-dessus de la suspension (dans le fluide, pour $z > z_i$) et uniformes dans la suspension ($z < z_i$). Ce dernier point confirme l'homogénéité des suspensions monodisperses fluidisées, et permet d'associer une mesure de temps de vol et d'atténuation à chacun des débits (ou chaque concentration) et pour chacune des deux suspensions monodisperses étudiées. En revanche, on remarque au niveau des fronts supérieurs des suspensions (en $z = 60$ mm et $z = 63$ mm), des variations non monotones des mesures causées par les phénomènes d'interférence acoustique qui se produisent lorsque les transducteurs passent devant les fronts. Ces phénomènes rendent les mesures acoustiques inexploitable sur une plage correspondant à la résolution spatiale des transducteurs (donnée par leur diamètre 13 mm).

Les courbes d'étalonnage du temps de vol mesuré en fonction de la concentration, pour chacune des suspensions, sont représentées sur la figure 4. La superposition des deux courbes montre que le temps de vol (ou la vitesse du son) ne dépend pas de la taille des particules. En revanche, sa forte variation avec la concentration permet d'utiliser le temps de vol pour mesurer la fraction volumique totale de la phase solide dans des suspensions bidisperses ou

polydisperses (comme l'ont fait Hoyos et al (1994)). L'atténuation mesurée, reportée sur la figure 5, varie aussi avec la concentration mais diffère significativement selon la taille des billes. Les grosses billes atténuent ici plus que les petites. Ainsi, dans nos suspensions bidisperses, une fois la concentration connue par la mesure du temps de vol, l'atténuation pourra donner une information sur la composition, c'est-à-dire sur la taille des billes présentes localement dans la suspension.

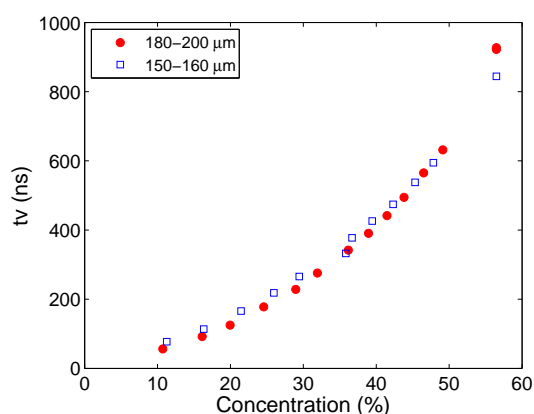


FIG. 4 – Evolution du temps de vol avec la concentration, pour les grosses et petites billes.

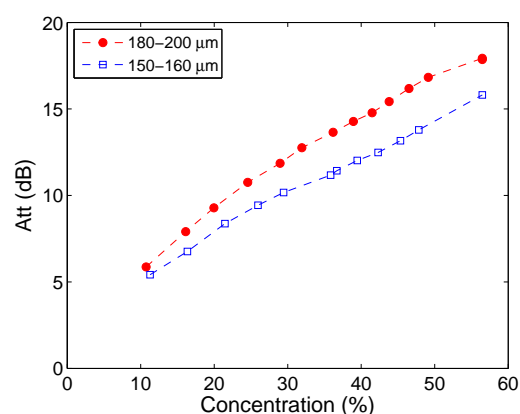


FIG. 5 – Evolution de l'atténuation avec la concentration, pour les grosses et petites billes.

4 Dynamique des suspensions bidisperses

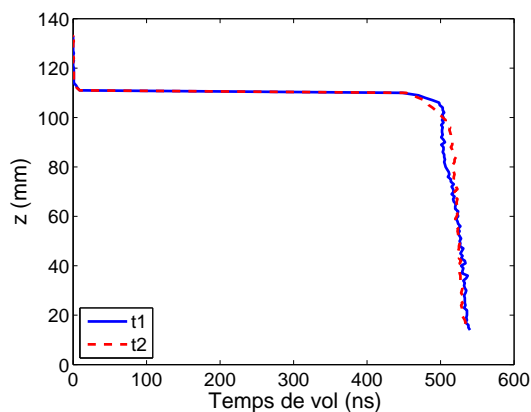


FIG. 6 – Profils du temps de vol dans une suspension bidisperse ségrégée et mélangée pour $V_d = 0.036 \text{ mm.s}^{-1}$

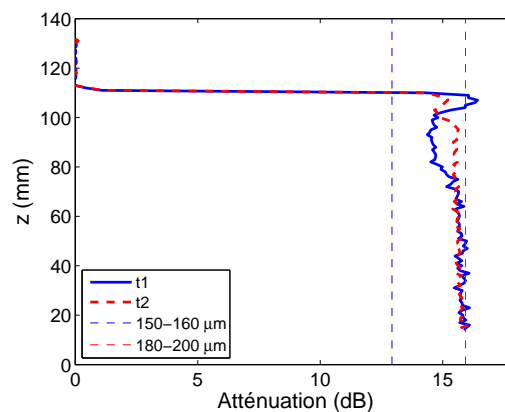


FIG. 7 – Profils d'atténuation dans une suspension bidisperse ségrégée et mélangée pour $V_d = 0.036 \text{ mm.s}^{-1}$

Pour l'étude des suspensions bidisperses fluidisées, différentes compositions en masses de petites et grosses particules ont été testées. Pour chacune d'elles, des mesures acoustiques ont été réalisées sur les suspensions obtenues à différentes vitesses de fluidisation.

La figure 6 présente deux profils de temps de vol, obtenus à deux instants différents (t_1 et $t_2 = t_1 + 270 \text{ mn}$), lors de la fluidisation d'un mélange de 30 g de petites et 30 g de grosses particules, à la vitesse débitante constante $V_d = 0.036 \text{ mm.s}^{-1}$. Les profils sont très semblables

à ceux obtenus dans les suspensions monodisperses : ils révèlent une suspension bidisperse homogène et stationnaire, à l'exception de la faible variation (1%) observée en haut de la suspension fluidisée. Il n'en est pas de même des profils d'atténuation, représentés sur la figure 7, qui diffèrent significativement entre les deux instants de mesure. Ils révèlent notamment que si la suspension semble homogène (mélangée) à t_2 , il n'en était rien à t_1 . Les variations d'atténuation visibles en haut de la suspension représentent ici la moitié du contraste entre les atténuations mesurées pour ce débit lors de l'étalonnage des suspensions monodisperses (représentées en pointillés sur la figure). On observe que la suspension à l'instant t_1 se compose de deux strates uniformes. La strate inférieure ($z < 75$ mm), correspondant à l'atténuation la plus élevée, est une strate enrichie en grosses particules, alors que la strate supérieure ($z > 82$ mm) est enrichie en petites particules. Il est à noter que l'atténuation mesurée dans la strate supérieure est significativement plus élevée que l'atténuation d'étalonnage mesurée dans la suspension de petites billes. Cette strate, même si elle s'est appauvrie en grosses particules, est donc bien restée bidisperse. Quand à la strate inférieure, elle occupe un volume supérieur au volume qu'occupait pour le même débit, les grosses billes lorsqu'elles étaient seules (durant l'étalonnage), et il est donc clair, là encore, que cette strate contient forcément des petites billes et est donc également restée bidisperse. La suspension bidisperse fluidisée est donc, à l'instant t_1 , dans un état de ségrégation partielle.

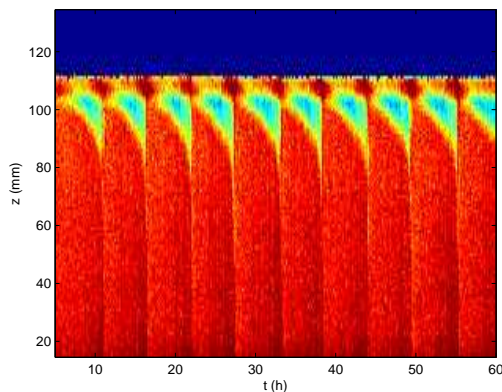


FIG. 8 – Diagramme spatio-temporel de l'atténuation pour $V_d = 0.036 \text{ mm.s}^{-1}$

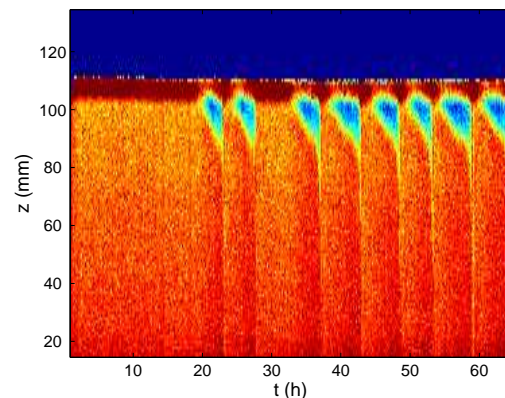


FIG. 9 – Diagramme spatio-temporel de l'atténuation pour $V_d = 0.033 \text{ mm.s}^{-1}$

Pour comprendre, la transition lente de la suspension fluidisée, de l'état partiellement ségrégué (t_1), à l'état mélangé homogène (t_2 , 270 mn plus tard), l'évolution temporelle des profils d'atténuation a été représentée sur la figure 8. Sur ce diagramme spatio-temporel, chaque verticale, tracée pour chaque instant de scan, représente le profil d'atténuation mesuré, codé en couleurs.

A l'instant initial, la suspension est dans un état mélangé : la teinte est uniforme pour $z < 100$ mm, et les seules variations de teinte visibles pour $100 < z < 110$ correspondent à la plage d'interférence acoustique. Il apparaît ensuite un front interne, au-dessous de l'interférence, en $z = 100$ mm, puis celui-ci descend pour atteindre $z = 80$ mm au bout de 10 h environ. Ce front de ségrégation correspond à l'apparition, et à la croissance, de la strate supérieure, enrichie en petites particules, visible sur le profil mesuré à l'instant t_1 . Puis subitement, cet état partiellement ségrégué $t < 10$ h disparaît et la suspension devient homogène en taille (teinte uniforme en $t = 10$ h). Cette rapide phase de mélange est ensuite suivie par une nouvelle phase de ségrégation et ainsi de suite. On observe qu'à l'exception de la première, toutes les phases

de ségrégations ont des durées similaires, de l'ordre de 4 h30 (comparable au temps typique de sédimentation $h/V_d \simeq 1$ h. Ainsi la suspension bidisperse fluidisée n'atteint jamais d'état stationnaire, mais oscille entre un état mélangé et un état partiellement ségrégé.

Ce phénomène oscillant a été clairement observé pour des vitesses débitantes pas trop grandes (typiquement pour $V_d < 0.06$ mm.s⁻¹, correspondant à $\phi > 37\%$). Pour chacune des compositions étudiées, la période de ces oscillations est plus faibles pour les débits les plus élevés, et elle devient comparable à la durée d'un scan pour des débits correspondant typiquement à des concentration de l'ordre de $\phi = 35\%$. Pour des débits encore plus élevés, les scans deviennent bruités et cessent d'être exploitables. Dans l'autre limite, lorsque le débit est abaissé jusqu'à des valeurs proches du seuil de fluidisation, l'état mélangé, qui commence à se ségréger dès son apparition dans le régime oscillant, peut parfois perdurer durant des temps plus ou moins longs. La figure 9, qui correspond à une concentration moyenne de l'ordre de 45%, illustre ce comportement pour lequel un état mélangé semblant "stationnaire", est entrecoupé de bouffées oscillantes. Il est à noter que la durée typique des états mélangés "stationnaires" augmente lorsque le débit est abaissé, et pour les expériences réalisées juste au-dessus du seuil de fluidisation, l'état mélangé est même le seul état que nous ayons observé (pour des durées d'expériences de plusieurs jours).

5 Conclusions

Des expériences ont été menées sur des suspensions bidisperses obtenues par la fluidisation par un fluide visqueux de particules de deux tailles proches (150 – 160 μm et 180 – 200 μm). Grâce à une technique de mesures acoustiques, l'évolution de la fluidisation de ces suspensions à été étudiée pour une large gamme de vitesses débitantes. Les mesures obtenues montrent clairement que pour des débits modérés, la suspension fluidisée n'atteint pas d'état stationnaire, mais oscille entre un état mélangé et un état partiellement ségrégé. La période de ces oscillations varie selon les compositions et diminue lorsque la vitesse débitante augmente. Pour les très faibles vitesses débitantes en revanche, le régime oscillant est entrecoupé de phases de fluidisation homogène d'autant plus longues que la vitesse s'approche du seuil de fluidisation.

Références

- N. Funamizu, T. Takakuwa 1996 A minimal potential energy model for predicting stratification pattern in binary and ternary solid-liquid fluidized beds. *Chem. Eng. Sc.* **51** pp. 441-451
- M. Hoyos, J.C. Bacri, J. Martin, D. Salin 1994 A study of the sedimentation of noncolloidal bidisperse, concentrated suspensions by an acoustic technique. *Phys. Fluids* **6** pp. 3809-3817
- S. Mirza, J.F. Richardson 1979 Sedimentation of suspensions of particles of two or more sizes. *Chem. Eng. Sc.* **34** pp. 447-454
- J.F. Richardson, W.N. Zaki 1954 Sedimentation and fluidisaion : part 1. *Trans. Instn. Chem. Engrs.* **32**
- T.N. Smith 1997 Differential settling of a binary mixture. *Powder. Technology* **92** pp. 171-178