

MÉLANGE INSTABLE PAR GRAVITÉ DANS UN TUBE VERTICAL : DIFFUSION OU CONVECTION ?

M. DEBACQ¹, J.P. HULIN¹, B. PERRIN², D. SALIN¹

¹ Laboratoire FAST (UMR 7608),
Université Paris XI, bâtiment 502, 91405 ORSAY cedex

² Laboratoire de Physique de la Matière Condensée (UMR 8551),
ENS, 24 rue Lhomond, 75231 PARIS Cedex 05

thème : 4

mots clés : mélange, instabilités de Rayleigh-Taylor, spatio-temporel, gravité.

Introduction

Il est bien connu que la dynamique du mélange entre deux couches de fluides miscibles de densités différentes superposées dépend crucialement de leur contraste de densité. Pour des couches de grandes largeur et de faible épaisseur en configuration instable, il apparaît un phénomène de digitation de type Rayleigh-Taylor avec un front de mélange de largeur croissant rapidement, proportionnellement au temps ou au carré du temps [1].

Le but de notre expérience est d'analyser ce que devient ce phénomène lorsque les deux fluides sont contenus dans un tube de faible diamètre par rapport à sa longueur. En particulier, il convient de déterminer si le mélange est de type diffusif ou convectif [2].

Une telle configuration est rencontrée lors de la complétion des puits pétroliers. L'injection du ciment dans le puits revient en effet à pousser vers le bas un fluide léger (spacer ou wash) par un fluide lourd (ciment slurry). Pour optimiser l'exploitation du puits, la contamination du ciment par les autres fluides doit être minimisée pour éviter de compromettre la solidité mécanique du puits ou l'étanchéité entre les différentes couches de terrain, et il est donc essentiel de mieux comprendre le processus de mélange entre les deux fluides afin de le limiter.

Une telle configuration peut également être rencontrée dans des colonnes d'extraction ou encore dans des réacteurs continus.

Dispositif expérimental

On dispose d'un tube vertical en altuglas de 4 m de hauteur et de 20 mm de diamètre. Le fluide léger (eau colorée par de la nigrosine) est introduit par le bas du tube jusqu'à une vanne guillotine située à mi-hauteur, tandis que le fluide lourd (solution plus ou moins concentrée de CaCl_2) est introduit par le haut. L'éclairage du tube est assuré par des tubes fluorescents, disposés dans une boîte de 4 m de haut, placée derrière le tube et munie d'un verre diffusant afin d'obtenir un éclairage uniforme.

À l'instant initial, la vanne guillotine est ouverte rapidement pour mettre en contact les deux fluides qui sont parfaitement miscibles. On observe alors l'évolution du mélange le long du tube pendant environ 20 minutes. La méthode consiste à acquérir à intervalles réguliers des images de l'intensité lumineuse traversant le tube, à l'aide d'une caméra digitale refroidie. Ces films permettent d'obtenir par traitement d'image des diagrammes spatio-temporels, qui représentent l'évolution le long du tube et au cours du temps du profil de variation de concentration en colorant le long du tube (obtenu à partir des images à l'aide de l'étalonnage effectué au préalable avec des solutions de diverses concentrations en nigrosine). La concentration est moyennée sur toute la largeur du tube, et normée entre 0 (fluide lourd incolore) et 1 (fluide léger coloré). Chaque point du diagramme correspond donc à la concentration relative des deux fluides dans une section du tube et à un instant donnés.

Résultats

Les expériences ont pour l'instant été réalisées avec ce montage sans écoulement d'ensemble et les contrastes de densité ($\Delta\rho/\rho_0$) étudiés vont de 0,01 à 20 %.

Aux forts contrastes de densité ($\Delta\rho/\rho_0 > 0,1$ %), le mélange a un caractère diffusif : la longueur de la zone de mélange croît comme la racine carrée du temps et les profils de concentration peuvent être bien ajustés par une fonction erreur. L'amplitude des fluctuations de concentration, ainsi que leur taille caractéristique, décroissent avec le contraste de densité, ce qui reflète un mélange plus homogène à petite échelle.

Cependant, le coefficient de diffusion varie peu avec le contraste de densité. Pour des valeurs de $\Delta\rho/\rho_0$ de 0,01 à 5 %, il est de l'ordre de $2,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. Il augmente légèrement pour les plus forts contrastes, jusqu'à des valeurs de l'ordre de $6 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ pour $\Delta\rho/\rho_0 = 20$ %.

Pour les faibles contrastes de densité ($\Delta\rho/\rho_0 < 0,1$ %) et aux temps courts, le régime est de type convectif avec un contour net de la zone de mélange, s'élargissant à une vitesse constante de l'ordre de 1 à 7 mm/s. Ce front apparaît très nettement sur les diagrammes spatio-temporels et se traduit par un saut brutal de concentration, bien visible sur les profils de variations de celle-ci avec la cote verticale.

Aux temps longs, et à faible distance de la vanne aux temps courts, on retrouve un profil diffusif s'étalant comme la racine carrée du temps. La transition du régime convectif au régime diffusif s'effectue après un temps d'autant plus long que le contraste de densité est faible.

Aux très faibles contrastes de densité, il apparaît sur les diagrammes spatio-temporels de grosses structures correspondant à un fort contraste de densité local, dont on peut suivre le mouvement sur une large fraction de la zone de mélange.

Conclusion

Dans le domaine de contrastes de densité étudiés (0,01 à 20 %), le mélange instable par gravité dans un tube vertical a un caractère diffusif aux forts contrastes ($\Delta\rho/\rho_0 > 0,1$ %), mais aussi aux temps longs pour les faibles contrastes de densité. Dans ce dernier cas, un front de variation brusque de concentration, se propageant à vitesse presque constante, est observé aux temps courts. Le coefficient D correspondant au régime diffusif est presque indépendant du contraste de densité ($D = 2,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ jusqu'à $\Delta\rho/\rho_0 = 5$ %), et devient seulement de $6 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ pour $\Delta\rho/\rho_0 = 20$ %.

Dans une étape ultérieure, on étudiera l'influence de la viscosité et de la rhéologie des fluides étudiés sur la dynamique du mélange, celle du diamètre et de l'inclinaison du tube et enfin celle du mouvement d'ensemble.

Nous remercions G. DACCORD et la société SRPC-Schlumberger qui ont initié et financé ce projet, G. CHAUVIN, M. DELISÉE et C. SAURINE qui ont conçu et réalisé le montage expérimental, E. LEFAUCHEUR et M. SOUCHE qui ont réalisé les premières séries d'expériences, et E.J. HINCH pour de nombreuses suggestions.

Références

- [1] R.A. WOODING (1969) Growth of fingers at an unstable diffusing interface in a porous medium or Hele-Shaw cell, *J. Fluid Mech.*, **39**, 447-495
- [2] M.H.I. BAIRD, K. ARAVAMUDAN, N.V. RAMMA RAO (1992) Unsteady Axial Mixing by Natural Convection in Vertical Column, *AIChE J.*, **38**, 1825-1834