

Déplacement visqueux dans un tube : une expérience prévue dans la Station Spatiale Internationale

P. Petitjeans, T. Maxworthy¹ et J. Kuang¹

Laboratoire de Physique et Mécanique des Milieux Hétérogènes, École Supérieure de Physique et de Chimie Industrielles, 10 rue Vauquelin, 75231 Paris cedex 05, France

¹ Department of Aerospace and Mechanical Engineering, University of Southern California, Los Angeles, CA 90089-1191, U.S.A.

Abstract: Le champ de vitesse d'un écoulement est mesuré lorsqu'un fluide moins visqueux pénètre dans un tube rempli d'un second fluide plus visqueux, miscible en toute proportion avec le premier. Ces résultats s'inscrivent dans le cadre d'une étude préliminaire d'une expérience qui doit prendre place dans la Station Spatiale Internationale. La gravité a un effet perturbant dans la mesure où elle modifie la structure de l'écoulement dans les régimes à bas nombre de Péclet. L'objectif de l'expérience consistera à effectuer des mesures très précises sur le déplacement visqueux entre fluides miscibles, et à comparer les résultats avec des simulations numériques dans lesquelles les contraintes dites de Korteweg liées au gradient de concentration à l'interface seront incluses. De cette façon, la formulation de cette contrainte ainsi que certains coefficients numériques pourront être déduits.

1. INTRODUCTION

L'objectif général de cette étude est la mise en évidence et la mesure de la contrainte de Korteweg [1] qui traduit l'existence d'une tension de surface effective entre deux fluides miscibles. Pour cela, des mesures très précises seront effectuées dans une certaine configuration expérimentale particulièrement bien contrôlée qui sera décrite plus loin, puis comparées à des simulations numériques dans lesquelles il s'agira de vérifier la formulation de ces contraintes, et de les mesurer pour trouver les coefficients numériques qui manquent. Pour des raisons qui vont être décrites dans le paragraphe suivant, la microgravité est une condition nécessaire au bon déroulement de cette expérience. En effet, le comportement de l'instabilité sur terre est fortement perturbé par les effets liés à la différence de densité entre les fluides, et les durées extrêmement importantes de l'expérience justifient le recours à la Station Spatiale Internationale.

Ce papier décrit une extension d'un travail de Petitjeans et Maxworthy [2] dans lequel étaient reportés des résultats expérimentaux sur le déplacement d'un liquide visqueux de densité ρ_1 et de viscosité dynamique μ_1 par un second liquide (ρ_2, μ_2) miscible avec le premier, et moins visqueux (voir Fig. 1). Un doigt du fluide le moins visqueux pénètre dans l'autre fluide, et la quantité m de fluide visqueux restant à la paroi était caractérisée, en fonction du nombre de Péclet $Pe = Ud/D$ où U est la vitesse maximale de l'écoulement de Poiseuille à l'aval, d le diamètre du tube, D le coefficient de diffusion moléculaire entre les deux fluides; du nombre d'Atwood $At = (\mu_1 - \mu_2)/(\mu_1 + \mu_2)$ représentant le rapport relatif de viscosité; et d'un paramètre $F = \Delta\rho gd^2/\rho_2\mu_2U$ qui traduit l'importance des effets liés à la gravité. Lorsque le tube est vertical avec le fluide le plus dense (qui est aussi en l'occurrence le plus visqueux) au-dessus du fluide le plus léger, F est alors positif. A l'inverse, lorsque le fluide le plus dense est au-dessous du fluide le moins dense, F est négatif. F est nul lorsque le tube est horizontal, ce qui ne veut pas dire que la gravité n'ait plus aucun effet (voir [2]).

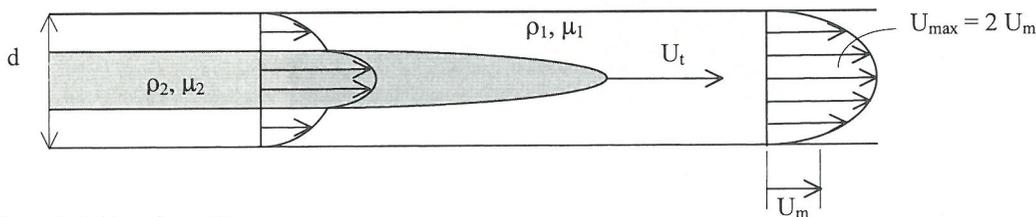


Figure 1. Schéma du montage

La quantité m de fluide non déplacé peut s'écrire en fonction de la vitesse d'avancée du doigt U_t et de la vitesse moyenne de l'écoulement à l'aval U_m comme $m = 1 - U_m/U_t$. Un résultat typique est donné sur la figure 2 pour un nombre d'Atwood de 0.98 obtenu avec un couple eau-glycérine, ou avec deux huiles silicones. Il est très clair que l'orientation du tube modifie de manière drastique le comportement de l'instabilité, en particulier pour les petits nombres de Péclet, même lorsque le nombre d'Atwood est le même.

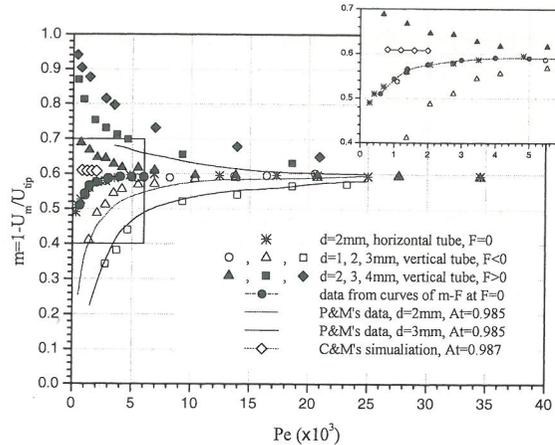


Figure 2. Quantité m en fonction du nombre de Péclet pour un nombre d'Atwood de 0.985. Les mesures représentées par un symbole ont été effectuées avec des huiles silicones (de viscosités 10 et 1000 cP) dont la différence de densité est de 0.006; les mesures dont la trace est représentée par des lignes ont été effectuées par [2] avec de la glycérine (de viscosité 7.5 et 1000 cP) dont la différence de densité est de 0.13 .

2. MESURES DU CHAMP DE VITESSE

A partir de la figure 1, il est clair que deux types d'écoulements sont possibles: le premier lorsque la vitesse d'avancée U_t du bout du doigt est supérieure au maximum de vitesse U_{max} de l'écoulement de Poiseuille juste devant le doigt, et le second lorsque cette vitesse U_t est plus petite que U_{max} . Compte tenu de l'expression de la quantité m ($m = 1 - U_m/U_t$), ces deux écoulements correspondent respectivement à des quantités m supérieures ou inférieures à 0.5. Pour des grands nombres de Péclet, que l'on atteint en général lorsque la vitesse est grande, la quantité m est toujours supérieure ou égale à 0.5 [2]. C'est à bas Pe que l'on peut avoir des régimes dans lesquels la quantité m est inférieure à 0.5, à condition toutefois que la gravité n'agisse pas dans le sens opposé. En effet, lorsque F est positif, c'est à dire lorsque le fluide le plus lourd est au dessus du fluide le plus léger, la gravité tend à le faire tomber le long des parois en diminuant le diamètre du doigt et en augmentant ainsi la quantité m .

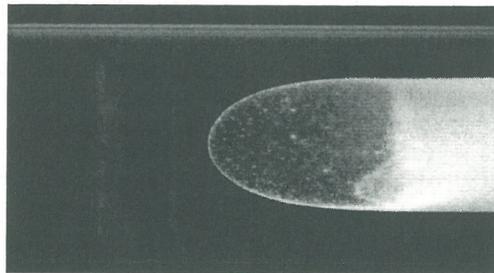


Figure 3. Vue d'un doigt d'huile silicone de viscosité 10 cP pénétrant dans un tube de diamètre 1 cm rempli d'huile silicone de viscosité 1000 cP dans une situation où $m > 0.5$.

Des mesures du champ de vitesse très précises ont été effectuées récemment par PIV (Particle Image Velocimetry). La figure 3 représente une vue du doigt lorsque m est supérieur à 0.5 (i.e. lorsque $U_t > U_{max}$). Le Champ de vitesse mesuré par PIV est représenté sur la figure 4 dans le référentiel du doigt. Les lignes de courant déduites de ce champ de vitesse sont représentées sur la figure 5. Un point d'arrêt est situé juste au bout du doigt.

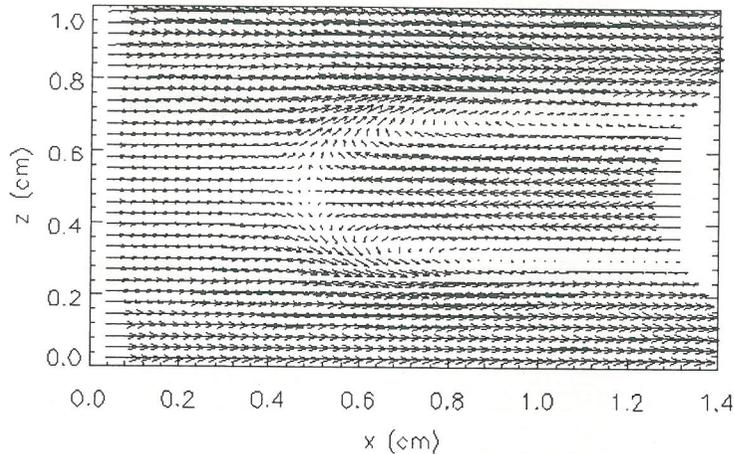


Figure 4. Champ de vitesse mesuré par PIV dans le référentiel du doigt dans la situation correspondant à la figure 3.

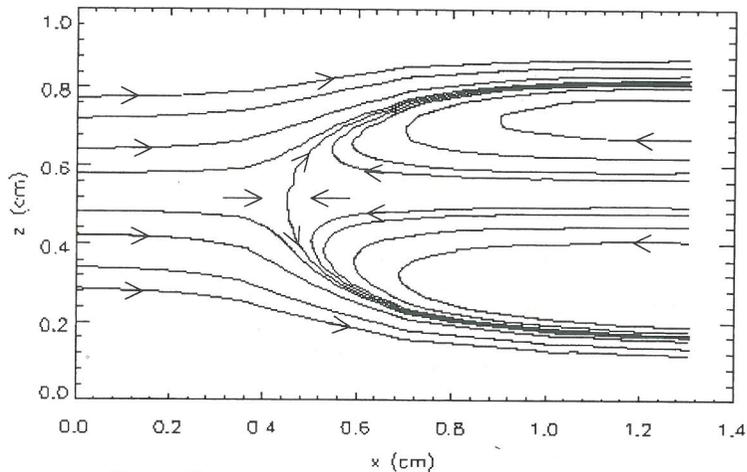


Figure 5. Ligne de courant associées aux figures 3 et 4.

La figure 6 représente une vue du doigt lorsque m est inférieur à 0.5 (i.e. lorsque $U_t < U_{max}$). Dans cette situation, une petite excroissance est observée systématiquement au bout du doigt que l'on va pouvoir expliquer en regardant le champ de vitesse (figure 7) et surtout les lignes de courant (figure 8). On observe maintenant une zone de recirculation placée dans l'extrémité du doigt. Il n'y a donc plus un seul point d'arrêt en bout de doigt, mais un "anneau" d'arrêt tout autour de la zone de recirculation, et un dernier point d'arrêt en bout de doigt. Puisqu'il n'y a pas de tension de surface, rien n'empêche une grande courbure de se former, et ce point en bout de doigt peut pénétrer dans la zone d'écoulement en aval et former cette excroissance que l'on observe toujours dès que m est inférieur à 0.5.

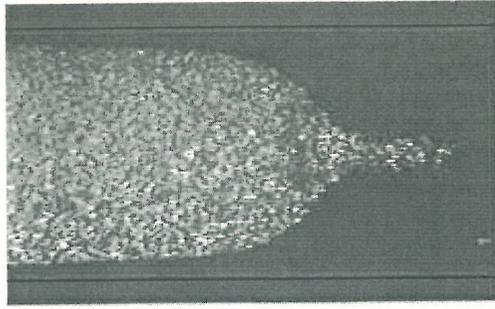


Figure 6. Vue d'un doigt d'huile silicone de viscosité 10 cP pénétrant dans un tube de diamètre 1 cm rempli d'huile silicone de viscosité 1000 cP dans une situation où $m < 0.5$.

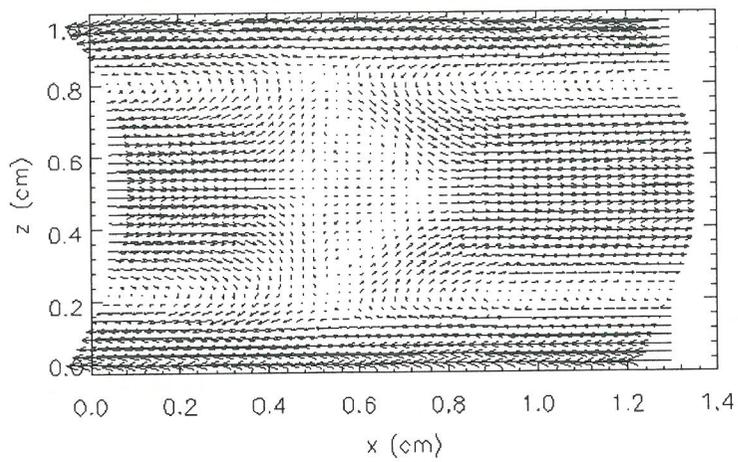


Figure 7. Champ de vitesse mesuré par PIV dans le référentiel du doigt dans la situation correspondant à la figure 6.

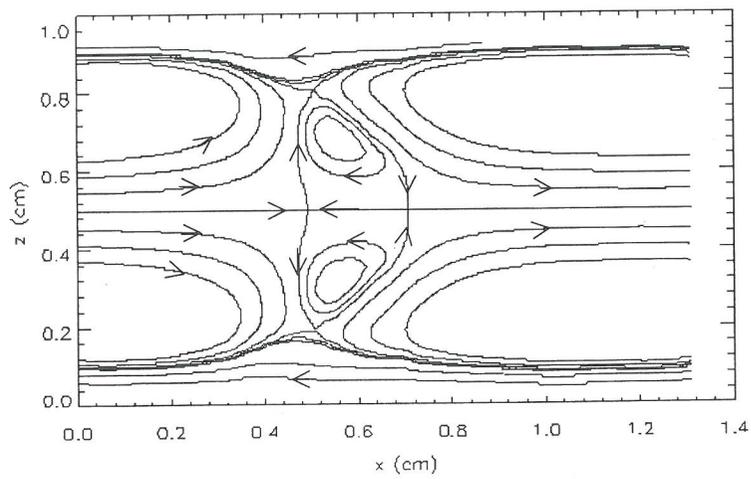


Figure 8. Ligne de courant associées aux figures 6 et 7.

3. PROJET D'EXPERIMENTATION SPATIALE

La gravité a donc un effet extrêmement important dans ce type d'écoulement, particulièrement à bas nombre de Péclet. Si nous pouvons nous affranchir de la gravité, une seule courbe m en fonction de Pe pourra être obtenue, en particulier dans les régimes de bas Pe . Les résultats que nous obtiendrons alors seront comparés à des simulations numériques qui seront effectuées dans l'équipe d'E. Meiburg (UCSB, Santa-Barbara) dans lesquelles les contraintes de Korteweg [1] seront prises en compte. L'objectif sera alors tout d'abord de vérifier que la formulation de cette contrainte est correcte, et ensuite de trouver les coefficients numériques inconnus qui interviennent dans cette expression.

Il est important de noter que quel que soit le type d'écoulement ($m < 0.5$ ou $m > 0.5$), un équilibre est maintenu en bout de doigt qui maintient une épaisseur de diffusion constante. En effet, cette épaisseur de diffusion δ est le résultat d'un équilibre entre la diffusion moléculaire dont l'épaisseur est de l'ordre de $(Dt)^{1/2}$, et un étirement $S \approx U/R$ où R est le rayon de courbure du doigt et U la vitesse dans le référentiel du doigt. L'épaisseur de l'interface est donc $\delta/P \approx Pe^{-1/2}$. Elle reste constante au cours du temps bien que l'on ait un processus diffusif.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier le CNES et la NASA qui devraient permettre de réaliser ce projet.

References

- [1] D. J. Korteweg, *Arch. Neerl. Sci. Ex. Nat.* (ii), **6** (1901) 1.
- [2] P. Petitjeans and T. Maxworthy, *J. Fluid Mech.*, **326** (1996) 37-56