

Instabilités à "l'interface" entre deux fluides miscibles. Émergence d'une tension de surface effective

P. Petitjeans*, P. Kurowski, J. Fernandez et M. Hoyos

*Laboratoire de Physique et Mécanique des Milieux Hétérogènes, UMR 7636 du CNRS,
École Supérieure de Physique et de Chimie Industrielle (ESPCI),
10 rue Vauquelin, 75231 Paris cedex 05, France*

* *Correspondance et tirés-à-part.*

RÉSUMÉ

Les instabilités qui peuvent se développer à "l'interface" entre deux fluides miscibles présentent des structures qui sont très proches morphologiquement de celles que l'on observe habituellement à l'interface entre deux fluides non-miscibles. C'est ainsi qu'une couche de glycérine colorée suspendue sous une plaque de verre et placée dans un réservoir d'eau montre le développement de structures organisées. De même, une fine nappe de glycérine s'écoulant dans l'eau se déstabilise sous forme de colonnes tombantes régulièrement espacées. Ces analogies tendent à aller dans le sens de l'existence d'une "tension de surface équivalente" entre fluides miscibles. Cette tension effective, qui n'a de sens qu'aux temps courts, et qui doit irrémédiablement tendre vers zéro avec le temps, peut s'expliquer par l'existence de forts gradients de concentration à "l'interface" entre les deux fluides miscibles.

mots clés: miscible, interface, instabilités

ABSTRACT

Instabilities can develop at the "interface" between two miscible fluids which exhibit patterns very similar to those observed between immiscible fluids. For example, a layer of colored glycerine hanged-up below a glass plate and placed into a water tank, gives rise to organized patterns. Also, a thin layer of glycerine falling into water is unstable and gives falling columns with a regular distance between each other. These similarities between miscible and immiscible fluids lead to the existence of an "effective surface tension" between miscible fluids. This effective tension has a meaning for short times only, and should tend to zero with time. It can be explained by the strong concentration gradient at the "interface".

Key words: miscible, interface, instabilities

INTRODUCTION

L'interface entre deux fluides peut présenter, sous certaines conditions d'instabilité, des structures relativement bien organisées telles que des gouttes, des doigts, ou d'autres formes plus ou moins complexes. Ces structures ont été, et sont encore très bien étudiées lorsque les deux fluides ne sont pas miscibles. Dans ce cas, la tension interfaciale joue un rôle prépondérant, souvent stabilisant. Cette tension de surface, combinée à d'autres mécanismes antagonistes du point de vue du développement de l'instabilité, tels qu'une différence de densité ou de viscosité par exemple, conduit à la sélection d'une longueur et d'un temps caractéristiques. Ces grandeurs imposent la morphologie et l'éventuelle dynamique de l'interface (les conditions aux bords, etc... jouent aussi un rôle dans cette sélection).

Lorsque les deux fluides considérés sont miscibles, il n'existe plus, a priori, de tension interfaciale, du moins au sens habituel du terme, et la diffusion moléculaire joue alors un rôle stabilisant aux temps longs. Les calculs de stabilité linéaire dans ces situations donnent des ordres de grandeurs pour le vecteur d'onde et le taux de croissance de l'instabilité extrêmement différents de ce que l'on observe expérimentalement [1]. C'est pourquoi nous travaillons à la mise en évidence, à la mesure, et à la formulation théorique d'une "tension de surface effective". Cette tension devrait être liée aux forts gradients de concentrations initiaux à "l'interface" entre les deux fluides miscibles lorsque la diffusion moléculaire n'a pas encore eu le temps de trop élargir l'épaisseur de cette "interface".

Nous résumons ici quelques unes de nos observations et de nos mesures.

OBSERVATIONS ET MESURES

Une première expérience simple consiste à étaler une nappe de glycérine d'épaisseur constante (du moins loin des bords) sur une plaque de verre, puis de retourner l'ensemble de telle sorte que le fluide soit suspendu sous la plaque. Très rapidement, le tout est placé dans une cuve remplie d'eau (miscible avec la glycérine

et de densité inférieure). A travers la plaque de verre, on observe la glycérine s'écouler sous l'action de son poids puis former des structures relativement régulières de taille caractéristique inférieure au mm (Fig. 1). Ces structures ne forment pas de motifs aussi réguliers que dans le cas non miscible, où l'on observe le plus souvent un réseaux hexagonal. Cependant, si l'on compte le nombre de voisins de chaque cellule, on obtient l'histogramme représenté Fig.2 qui montre une tendance à la régularité avec un plus grand nombre de cellules ayant 6 voisins.

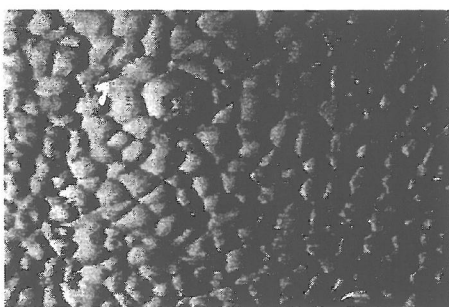


Figure 1: Structures observées lors de la déstabilisation d'une couche mince visqueuse dans de l'eau (largeur de l'image environ 10 mm)

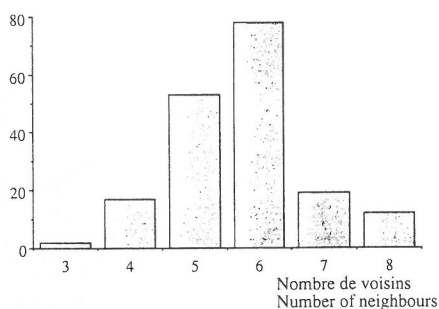


Figure 2: Histogramme du nombre de voisins (calcul sur environ 180 cellules)

Dans le cas non-miscible, la taille des cellules est liée à la longueur capillaire par la relation: $\lambda = 2\pi\sqrt{2}\sqrt{\frac{\gamma}{\Delta\rho g}}$. En utilisant cette expression pour déduire une tension de surface effective dans le cas de l'expérience représentée Fig. 1, on trouve une valeur $\gamma_{\text{eff}} = 1.9 \pm 0.6$ dyne/cm. Cette valeur est relativement élevée comparée à celle que nous avons déjà mesurée par la méthode de la goutte tournante ($\gamma_{\text{eff}} = 0.58$ dyn/cm) [2], mais reste malgré tout du même ordre de grandeur.

Une autre expérience d'instabilité consiste à laisser s'écouler une nappe de glycérine à travers une fente de 0.1 mm de large dans un réservoir d'eau. Si le débit

est trop important, c'est une nappe qui s'écoule. Pour un débit très faible, c'est un régime de gouttes qui est observé. Pour un débit intermédiaire, on observe la formation de filets qui s'écoulent dans le réservoir, espacés plus ou moins régulièrement (Fig. 3). La longueur d'onde moyenne varie faiblement autour de 1 mm selon la concentration de la glycérine. La tension de surface effective déduite de ces mesures est d'environ $\gamma_{\text{eff}} = 0.07$ dyn/cm pour une concentration en glycérine de 92%. Dans ce cas, on obtient une valeur quelque peu inférieure à celle mesurée pour cette concentration ($\gamma_{\text{eff}} \sim 0.2$ dyn/cm) [2].

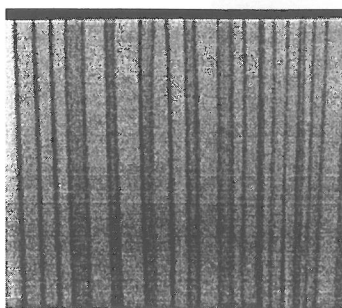


Figure 3: Filets de glycérine colorée s'écoulant dans un réservoir d'eau (largeur de l'image: environ 20 mm)

Ces analogies avec les comportements entre fluides non-miscibles, et d'autres dont nous ne parlons pas ici [3, 4], tendent donc bien à aller dans le sens de l'existence d'une tension de surface effective entre fluides miscibles. Cette tension effective, qui n'a de sens qu'au temps courts, et qui doit irrémédiablement tendre vers zéro avec le temps, peut s'expliquer par de forts gradients de concentration à "l'interface" entre les deux fluides miscibles.

Des travaux théoriques sur l'étude des interfaces hors d'équilibre ont été publiés par d'autres auteurs (voir par exemple les références dans [5]). A partir de l'étude d'états transitoires, R. Defay et A. Sanfeld proposent une expression de la tension de

surface en fonction des gradients de concentration c'_a et c'_b des fluides a et b. [5].

Cette expression est formulée de la manière suivante: $\gamma = e^3 \int_{-\infty}^{\infty} \sum_a \sum_b k_{ab} c'_a c'_b dz$, où z est la direction perpendiculaire à l'interface d'épaisseur caractéristique e. La constante k_{ab} , qui reste à déterminer, ne dépend que de la nature des fluides.

Par ailleurs, nous savons que la tension effective doit être beaucoup plus faible que les tensions habituelles entre fluides non-miscibles. Elle est donc difficile à mesurer directement, puisque la gravité la masque en grande partie. C'est pourquoi une campagne de mesures a été effectuée au cours de vols paraboliques organisée par le CNES. Nous avons enregistré la forme d'une goutte pendante dans un milieu en micro-gravité. Un exemple de goutte de glycérine suspendue dans de l'eau est donné Fig. 4. Ces expériences n'ont pas donné tous les résultats espérés en raison de la difficulté à maintenir une micro-gravité constante pendant au moins 10 secondes. Cependant, les quelques expériences qui ont pu être exploitées donnent les résultats suivants (Table1):

Table1: Tension de surface effective entre de la glycérine de concentration C et de l'eau (goutte) déduite de la forme de la goutte pendante en micro-gravité

Fluide	Tension effective (dyne/cm)
glycérine, C = 100 %	0.026
glycérine, C = 100 %	0.015
glycérine, C = 100 %	0.029
glycérine, C = 100 %	0.048
glycérine, C = 75 %	0.014
eau + Colorant ($\Delta\rho/\rho = 10^{-3}$)	0.0026

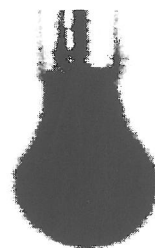


Figure 4: Vue d'une goutte pendante de glycérine colorée dans de l'eau en micro-gravité

Ces valeurs sont inférieures à celles qui avaient été obtenues par la méthode de la goutte tournante [2]. Il conviendra donc de les prendre avec précaution compte tenu de la difficulté qu'il y avait à contrôler tous les paramètres de l'expérience.

CONCLUSION

De plus en plus de résultats expérimentaux tendent à montrer l'existence d'une tension de surface effective entre fluides miscibles. D'autres expériences sur terre et en micro-gravité lors de vols paraboliques sont en cours. Nous travaillons par ailleurs à l'analyse théorique de cette tension effective.

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier le CNES pour son aide financière et pour avoir soutenu nos expériences en micro-gravité. En effet, les mesures effectuées lors des différentes campagnes en vols paraboliques nous ont permis d'acquérir des données difficiles à obtenir en laboratoire.

REFERENCES

- 1 Kurowski P., Misbah C., Tchourkine S. (1995) *Europhys. Letters*, **29**, 4
- 2 Petitjeans P. (1996) *C. R. Acad. Sci. Paris*, **322**, Série II b, 673-679
- 3 Petitjeans P., Maxworthy T. (1996) *J. Fluid Mech.*, **326**, p 37-56
- 4 Petitjeans P., Kurowski P. (1997) *C. R. Acad. Sci. Paris*, **325**, Série II b, 587-592
- 5 Defay R., Sanfeld A. (1973) *J. de Chimie Physique*, **70**, 895-899