



Influence d'une polarisation électrique sur l'instabilité d'une interface liquide/liquide

Mahmoud Al Radi^a, Azzam Hassan^a, Gérard Cognet^{b,*}

^a LEGI/ENSHMG, BP 53, 38041 Grenoble, France

^b LEGI/ENSGI/INPG, 46, avenue Félix-Viallet, 38031 Grenoble, France

Reçu le 27 septembre 2004 ; accepté après révision le 7 juin 2005

Présenté par René Moreau

Résumé

On étudie l'influence de la tension superficielle vis-à-vis de la stabilité d'une interface électrolyte liquide/métal liquide. Le contrôle de ce paramètre est obtenu par une polarisation électrique imposée au métal liquide. L'écoulement est réalisé dans une cavité cylindrique à couvercle tournant et fond fixe au niveau duquel a été pratiquée une rigole annulaire remplie de gallium liquide. On analyse le phénomène d'apparition des ondes d'instabilité en fonction de la tension superficielle. Les résultats expérimentaux sont comparés à un modèle de type Kelvin–Helmholtz purement non visqueux ou corrigé par la prise en compte de la composante normale des contraintes visqueuses. **Pour citer cet article :** *M. Al Radi et al., C. R. Mecanique 333 (2005).* © 2005 Académie des sciences. Publié par Elsevier SAS. Tous droits réservés.

Abstract

Influence of the electric polarization on the instability of a liquid/liquid interface. One studies the influence of the surface tension on the stability of a liquid electrolyte/liquid metal interface. The control of this parameter is obtained by an electric polarization imposed on the liquid metal. The flow is carried out in a cylindrical cavity with turning lid and fixed bottom on the level of which a annular drain filled with liquid gallium is set. One analyzes the phenomenon of appearance of the waves of instability according to the surface tension. The experimental results are compared with a Kelvin–Helmholtz model, purely non-viscous or corrected by taking into account the normal component of the viscous constraints. **To cite this article:** *M. Al Radi et al., C. R. Mecanique 333 (2005).*

© 2005 Académie des sciences. Publié par Elsevier SAS. Tous droits réservés.

Mots-clés : Mécanique des fluides ; Polarisation électrique ; Tension superficielle

Keywords : Fluid mechanics ; Electric polarization ; Surface tension

* Auteur correspondant.

Adresses e-mail : mahmoud.alradi@hmg.inpg.fr (M. Al Radi), azzam.hassan@hmg.inpg.fr (A. Hassan), gerard.cognet@ensgi.inpg.fr (G. Cognet).

1. Introduction

Les phénomènes de tension superficielle au contact de deux liquides immiscibles ou d'un liquide et d'un solide sont importants pour leurs conséquences tant sur le plan dynamique que vis-à-vis du transfert de chaleur ou de masse. A ce titre l'état de l'interface et sa contamination éventuelle jouent un rôle déterminant que l'on cherche à contrôler pour améliorer les procédés qui mettent en œuvre ce type d'échange entre phases.

Parmi les facteurs influents, la présence de charges obtenue par polarisation électrique de l'interface constitue un élément d'intervention majeur pour modifier la tension de la surface de contact. Nous montrons dans cette note comment des conditions différentes sur le plan physico-chimique modifient l'équilibre d'une goutte de liquide métallique au contact de différents fluides par variation de sa tension superficielle et comment celle-ci, dans un système dynamique d'écoulement laisse apparaître des instabilités interfaciales.

2. Tension superficielle et état de surface

La tension superficielle γ d'une goutte de métal liquide au contact d'une surface solide, dans de l'air ou un autre fluide (liquide), dépend très largement de son état de surface. Selon que le métal est au contact d'une substance contaminante ou tout simplement a subi une oxydation superficielle, la tension interfaciale est sensiblement affectée. Les techniques de mesure pour analyser ce phénomène se fondent sur des considérations géométriques comme la déformation de la goutte reposant sur la surface avec laquelle elle détermine un angle de contact β (méthode dite de la « large goutte » due à Bouasse [1]). On désigne par h la distance entre le rayon maximal r de la goutte et son sommet O (Fig. 1). Pour une goutte de gallium (notre cas) au contact de l'air on obtient ainsi : $h_a^2 = 2\gamma/\rho_{Ga}$ qui devient $h_1^2 = 2\gamma/(\rho_{Ga} - \rho_l)$ lorsque la goutte de masse volumique ρ_{Ga} est immergée dans un liquide de masse volumique ρ_l .

La situation du gallium dans l'air étant connue et servant de référence, on procède alors de la façon suivante :

h_a est déterminé rapidement pour éviter l'effet d'une oxydation lente par l'oxygène atmosphérique ; on immerge ensuite la goutte dans l'eau et/ou dans une solution aqueuse électrolytique (soude à 5 moles/m³), on mesure h_1 et on en déduit :

$$\gamma_{Ga/l} = \gamma_{Ga/a} \frac{h_1^2}{h_a^2} \frac{\rho_{Ga} - \rho_l}{\rho_{Ga}}$$

La Fig. 2 montre les photographies d'une telle goutte dans les 3 cas précédents : on constate un affaissement progressif de la goutte entre le cas de l'immersion dans l'air et celui de l'immersion dans l'eau, γ décroissant alors

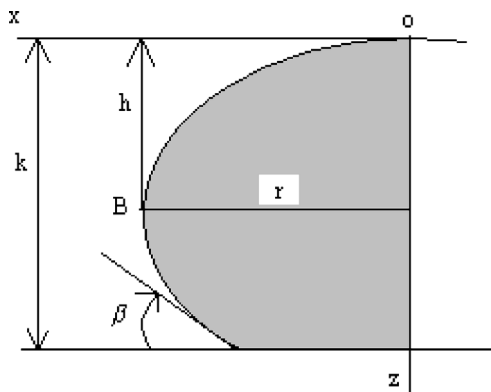


Fig. 1. Schéma d'une goutte de gallium.

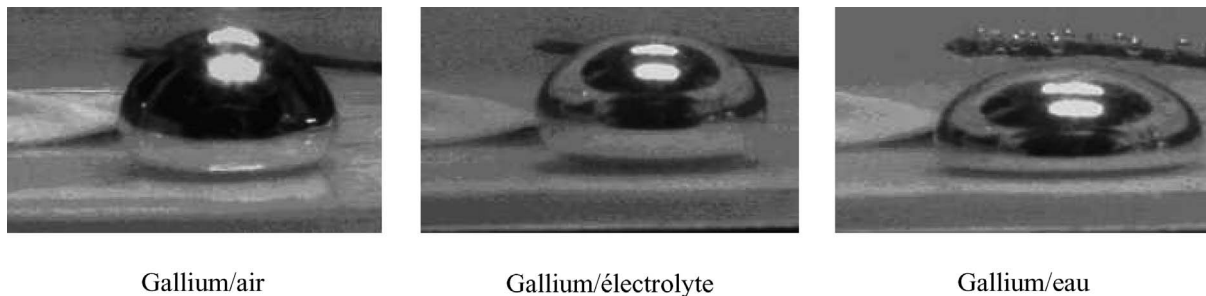


Fig. 2. Trois gouttes de Gallium sous différentes conditions.

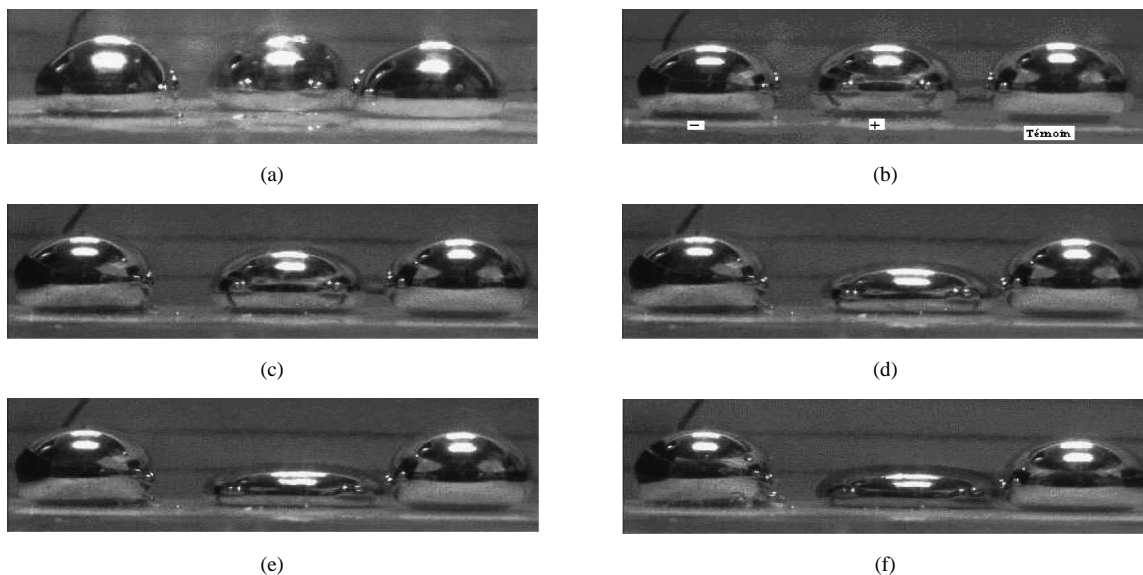


Fig. 3. Trois gouttes de gallium sous différentes tensions électriques : (a) en contact avec l’air ; (b) en contact avec l’électrolyte sans potentiel électrique ; en appliquant un potentiel de : (c) 0,25 V ; (d) 0,75 V ; (e) 1 V ; (f) 1,5 V.

de 0,35 à 0,1 N/m. Ce phénomène, lié à l’oxydation de la surface du gallium, peut être contrôlé par la polarisation de la goutte.

On considère ainsi l’évolution de 3 gouttes placées dans l’air, dans l’eau et dans l’électrolyte.

Les photographies (Fig. 3) montrent les variations de la forme des gouttes selon le potentiel appliqué (cathodique ou anodique). La goutte portée à un potentiel cathodique reste brillante, sans oxyde superficiel, ce qui n’est pas le cas de la goutte anodique.

On a tracé la courbe γ (N/m) en fonction du potentiel E (V) imposé (Fig. 4). On distingue 3 zones. Le plateau I correspond à un potentiel cathodique réducteur, le gallium est propre et brillant : le tension $\gamma \approx 0,8$ N/m ; le plateau II, de potentiel anodique, révèle l’oxydation de la surface de la goutte d’aspect beaucoup plus terne : $\gamma \approx 0,1$ N/m. La zone intermédiaire montre une variation rapide de γ en fonction de E qui traduit le changement de réactivité vis-à-vis de l’oxydation. A l’évidence le comportement superficiel de la goutte s’en trouve affecté ce qui va sensiblement conditionner la stabilité interfaciale du gallium.

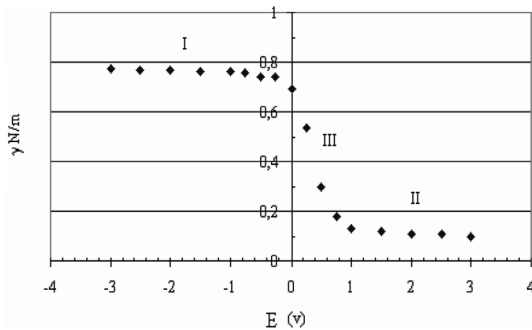


Fig. 4. Evolution de la tension superficielle en fonction du potentiel électrique.

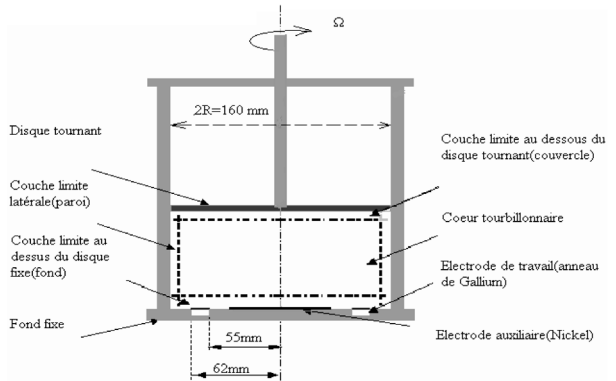


Fig. 5. Dispositif expérimental.

3. Application à l’instabilité interfaciale

Pour étudier l’influence de la tension superficielle sur la stabilité d’une interface liquide/liquide on a mis en oeuvre un dispositif d’écoulement déjà utilisé pour des mesures de transfert [2] ; l’élément principal (Fig. 5) en est une cavité cylindrique remplie de liquide (eau pure ou solution électrolytique) entraîné en rotation par un couvercle tournant en nickel. Le fond fixe comprend une rigole annulaire remplie de gallium liquide à la température de l’expérience ($\theta \approx 30^\circ\text{C}$). On impose une différence de potentiel entre le disque tournant pris comme référence et l’anneau de gallium dont on fait varier la polarisation, jouant ainsi sur la tension interfaciale solution/gallium. La rotation du couvercle produit un écoulement tournant du liquide dans la cavité entraînant le gallium liquide dans sa rigole.

On réalise ainsi un écoulement axisymétrique de deux liquides immiscibles, de masses volumiques différentes, ρ_1 et ρ_2 .

L’analyse linéaire de l’instabilité de l’interface, de type Kelvin–Helmholtz, suivant un train d’ondes progressives visualisé sur la Fig. 6, a été conduite en prenant en compte la gravité et la tension superficielle (Al Radi [3]).

L’équation de dispersion liant la vitesse critique U_c et le nombre d’onde k de la perturbation, en négligeant les effets de bord de la rigole et la profondeur limitée de celle-ci, prend la forme suivante :

$$U_c \approx \left(\frac{\rho_1 + \rho_2}{\rho_1 \rho_2} \right)^{1/2} \left(\frac{(\rho_2 - \rho_1)g}{k} + \gamma k \right)^{1/2}$$

La vitesse critique minimale d’apparition des ondes d’instabilité est obtenue pour le nombre d’onde critique :

$$k_c = \sqrt{(\rho_2 - \rho_1)g/\gamma}$$

Soit :

$$U_{cm} = \left(\frac{2(\rho_1 + \rho_2)}{\rho_1 \rho_2} \right)^{1/2} \sqrt[4]{(\rho_2 - \rho_1)g\gamma}$$

suivant une expression proportionnelle à la puissance 1/4 de la tension superficielle.

La courbe correspondante dans nos conditions expérimentales (eau : $\rho_1 = 996 \text{ kg/m}^3$; gallium : $\rho_2 = 6095 \text{ kg/m}^3$) est représentée sur la Fig. 7.

Récemment Funada et Joseph [4] ont cherché à tenir compte de la viscosité des deux liquides (μ_1 et μ_2) en considérant dans le terme de contrainte normale, en plus de la pression, la contribution d’origine visqueuse. Leurs résultats théoriques appliqués à nos propres conditions (eau : $\mu_1 = 0,789 \text{ mPas}$ et gallium : $\mu_2 = 2,125 \text{ mPas}$ à



Fig. 6. L'instabilité interfaciale.

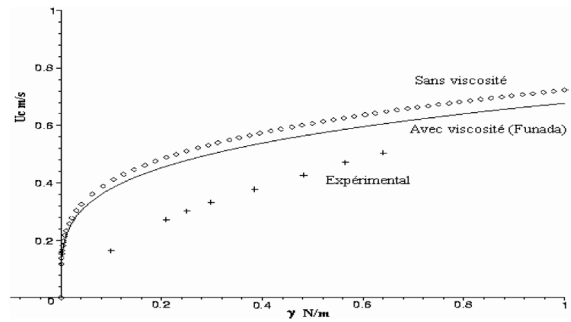


Fig. 7. Vitesse critique en fonction de la tension superficielle.

$\theta = 30^\circ\text{C}$) sont également reportés sur la Fig. 7. On constate une évolution semblable à la précédente mais avec des valeurs inférieures de l'ordre de 10%.

Nos propres résultats expérimentaux sont disposés, pour comparaison, sur cette même figure ; ils correspondent à des variations de la tension superficielle entre 0,1 et 0,7 N/m, obtenues par polarisation électrique. Il s'avère qu'aux faibles valeurs de γ , la vitesse critique d'apparition des ondes d'instabilité est environ moitié plus faible que celle prévue par les modèles ([3] et [4]) ; par contre elle s'en rapproche sensiblement aux plus grandes valeurs de γ (0,7 N/m).

Cet écart peut avoir plusieurs origines :

- L'écoulement engendré par le disque tournant présente une symétrie axiale à caractère tridimensionnel au voisinage du fond, et donc au niveau de l'anneau de gallium ; cet aspect n'est pas intégré dans le modèle bidimensionnel simplifié qui a été utilisé. Celui-ci sous-estime, de fait, le différentiel de vitesse entre les deux liquides à l'interface.
- On observe que la surface du gallium est légèrement bombée suivant la largeur de la rigole annulaire ce qui introduit des modifications de l'écoulement dont l'influence est également difficile à prendre en compte dans le modèle, mais qui peuvent aussi induire des effets locaux d'instabilité interfaciale.

La turbulence n'est probablement pas en cause ici, dans la mesure où le nombre de Reynolds reste inférieur à la valeur critique du régime turbulent ($1,2 \times 10^5$ contre 3×10^5).

4. Conclusion

La polarisation électrique de l'interface métal liquide/liquide permet de contrôler efficacement la valeur de la tension superficielle au niveau de ce contact ; on peut dès lors analyser l'importance de la tension superficielle vis-à-vis de l'instabilité interfaciale et imaginer mesurer cette grandeur en suivant une telle procédure. Cette approche peut également se révéler utile pour prévoir les phénomènes de transfert aux interfaces fluide/fluide [5].

Références

- [1] H. Bouasse, Capillarité phénomènes superficiels, Librairie delagrave, Paris, 1924.
- [2] M. Al Radi, G. Cognet, Transfert à une interface liquide/liquide au fond d'une cuve cylindrique à couvercle tournant, C. R. Mécanique 330 (2002) 327–332.
- [3] M. Al Radi, Contribution à l'analyse des phénomènes de transfert et d'instabilité à une interface liquide/liquide, Thèse de doctorat INPG, 2004.
- [4] T. Funada, D.D. Joseph, Viscous potential flow analysis of Kelvin–Helmholtz instability in a channel, J. Fluid Mech. 445 (2001) 263–283.
- [5] M. Al Radi, G. Cognet, Analysis of mass transfer and instability at a liquid/liquid interface, in: 5th International Conference on Multiphase Flow, ICMF'04, Yokohama, Japan, May 30–June 4, 2004.