

UNE METHODE DE MESURE DE LA TENSION INTERFACIALE DE DEUX LIQUIDES DE MEME MASSE VOLUMIQUE : LA METHODE DU CYLINDRE

par

C. BISCH, I. MARTINEZ*

Laboratoire d'Aérodynamique du CNRS, Meudon, France

*Laboratoire d'Aérodynamique ETSI Aeronauticos, Madrid, Espagne

ABSTRACT

We propose a method for the measurement of the interfacial tension concerning two non miscible liquids of the same density. This method is based on the measurement of the forces acting on a liquid bridge, in particular a liquid cylinder. The bridge connects the faces of two equal circular discs and is immersed in the second liquid.

RAPPEL

Les méthodes habituelles de mesures des tensions interfaciales σ s'avèrent inopérantes pour mesurer la tension interfaciale de deux liquides dont la masse volumique à la même valeur. C'est particulièrement le cas pour les expérimentateurs qui simulent l'état de non pesanteur par la méthode de Plateau consistant à immerger un volume liquide dans un second liquide non miscible et de même masse volumique (nombre de Bond $B_0 = 0$).

La méthode que nous proposons est totalement indépendante de la valeur de la masse volumique des deux liquides. Elle consiste précisément à immerger un volume liquide dans un second liquide non miscible et de même masse volumique [1, 2, 3]. Le volume liquide est alors en état de non pesanteur et son interface a la propriété d'être à courbure moyenne constante en l'absence de toute force extérieure. Outre les trois cas particuliers du plan, du cylindre et de la sphère, il existe trois surfaces répondant à cette propriété : ce sont des portions de cycloïdes elliptiques ou ondulatoires, hyperboliques ou nodoïdes et paraboliques ou caténoïdes que Howe [4] et Hormann (1887) [5] sur le plan théorique, Plateau (1873) et Bouasse (1924) [6] sur le plan expérimental, ont été les premiers à étudier. Citons parmi les auteurs de travaux récents Gillette et Dyson [7], Padday [8], Boucher et Jones [9], Martinez et Sanz [10].

METHODE DE MESURES EXISTANTES QUAND LA DIFFERENCE DE MASSE VOLUMIQUE $\Delta\rho$ TEND VERS ZERO

G. Pétré et G. Wozniak [11] forment un ondulatoire équilibré par un support pesant. Ils mesurent son volume, calculent sa courbure et obtiennent σ .

L. Liggieri et al. [12] appliquent la loi de Laplace à une goutte de liquide formée au

bout d'un capillaire immergé dans le second liquide. Ils mesurent le volume de la goutte et sa surpression Δp et peuvent ainsi obtenir σ .

Il est aussi possible de mesurer σ en faisant vibrer des sphères mises en lévitation. Nous avons utilisé cette possibilité [1] ainsi que notamment Marston [13] et Rhim [14].

METHODE PROPOSEE

Nous nous plaçons dans le cas d'un volume fixe de liquide (figure 1) évoluant de manière continue entre une portion de sphère (figure 1b) et deux calottes sphériques égales (figure 1d), calottes obtenues par un écartement mécanique lent ou pas à pas des deux supports en acier inoxydable dépoli, plans, circulaires, coaxiaux et de même diamètre. La surface des disques doit être choisie pour que les mouillabilités par les liquides en présence permettent le maintien de ceux-ci en place durant l'expérience.

La pression du pont liquide est toujours supérieure à celle du milieu extérieur et l'interface est un onduloïde dont la sphère et le cylindre (figure 1c) sont deux cas particuliers. Un tel pont liquide exerce sur ces supports de diamètre Φ deux forces proportionnelles à la tension σ . Si nous considérons les forces de compression comme positives, nous avons :

- une force de traction interfaciale solide-liquide $F_i = -\pi \Phi \sigma \sin\theta$.

- une force de compression F_p engendrée par la surpression interne Δp définie par la loi de Young-Laplace : $\Delta p/s = (1/R_1 + 1/R_2)$. D'où : $F_p = (\pi/4)\Phi^2 \sigma (1/R_1 + 1/R_2)$

La résultante $F = F_i + F_p$ de ces deux forces présente deux cas particuliers intéressants :

1°) Elle est nulle pour un onduloïde sphérique de diamètre D dont l'angle θ est tel que $\sin\theta = \Phi/D$ et lorsqu'il y a rupture du pont liquide par écartement des supports ($2h = 2h_r$).

2°) Elle est égale à $F_c = -(\pi/2)\Phi \sigma$ pour un cylindre ($\theta = 90^\circ$).

Ce second cas particulier nous fournit ainsi le principe d'une méthode très simple de mesure de σ : il suffit de mesurer la force F_c qu'exerce un cylindre de diamètre Φ sur un de ses supports. Le zéro de la mesure est obtenu par la rupture du pont liquide.

CYLINDRE OPTIMISE

Les variations théoriques de F en fonction de $2h$ peuvent être obtenues par intégration d'une équation différentielle du second ordre exprimant que la courbure moyenne de l'onduloïde est constante en chaque point.

$$R_1 = r(1 + r'^2)^{1/2} \quad , \quad R_2 = -\frac{(1 + r'^2)^{3/2}}{r''}$$

avec $(1/R_1 + 1/R_2) = \text{constante}$

R_1 et R_2 sont les rayons de courbure de deux sections orthogonales normales à la surface en un point de l'onduloïde défini par un rayon r .

La figure 2 présente des diagrammes de forces F/F_c calculés et tracés pour différents volumes de liquide définis par l'élancement $\Lambda_c = 2h_c/\Phi$ du cylindre correspondant. Les variations de F/F_c sont représentées en fonction de l'élancement $\Lambda = 2h/\Phi$ de l'onduloïde.

Nous voyons que les courbes passent par un maximum variable et qu'il existe deux valeurs de $2h/\Phi$ (points A et B) pour lesquelles le rapport F/F_c est égal à 1 (Le point A correspond au cylindre). Toutefois, pour la valeur de l'élancement $\Lambda = \Lambda_c = 5/3$, valeur qui peut être calculée, les deux points A et B sont confondus au point C et la valeur numérique de F ne peut alors être plus grande que F_c . C'est ce cylindre optimisé qui doit servir pour les mesures de σ , car il ne nécessite pas le repérage difficile de la position $2h = 2h_c$ pour laquelle $F = F_c$. Il suffit de mesurer sur la courbe (F) sa valeur maximale : c'est la valeur de F_c .

EXEMPLE D'APPLICATION

La figure 3 montre un exemple de diagrammes de forces F obtenus sur des ponts de Nitropropane 1 immergés dans de l'eau saturée en Nitropropane.

Les deux liquides sont amenés en parfait équilibre de masse volumique ρ à l'aide de trois techniques expérimentales qui sont les suivantes :

- Vérification que les deux calottes sphériques obtenues après rupture d'un cylindre sont géométriquement identiques.

- Vérification que les valeurs expérimentales des élancements de rupture $\Lambda_r = 2h_r/\Phi$ en fonction des élancements $\Lambda_c = 2h_c/\Phi$ des cylindres sont égales aux valeurs théoriques calculées par Gillette et Dyson [7].

- Vérification de la cylindricité du cylindre dont le diamètre doit être égal à Φ sur toute sa hauteur. Les éventuelles variations du diamètre sont fonction de $\Delta\rho$ et permettent de connaître $\Delta\rho$ en mesurant le diamètre ϕ au quart de la distance des supports (figure 4) [10].

Nos mesures correspondent à des $\Delta\rho/\rho$ inférieures à 5.10^{-3} .

Le capteur de force utilisé, de marque HBM, permet des mesures de 0 à 5.10^{-2} Newton avec une précision meilleure que 10^{-5} Newton. La moyenne des forces F_c mesurée est de 440.10^{-6} Newton. La valeur de la tension interfaciale ainsi obtenue est de 19.01 mN/m. Une référence bibliographique [15] indique une valeur de 19 mN/m.

FIDELITE DES MESURES

Comme pour toute mesure de tension interfaciale, la fidélité des mesures ne repose pas dans la mesure elle-même mais sur les conditions de propreté avec lesquelles elles sont effectuées.

Tous les récipients et pièces du montage en contact avec les deux liquides doivent être préalablement dégraissés (mélange sulfochromique), lavés plusieurs fois à l'eau distillée, séchés (étuve) et manipulés ensuite avec des pinces ou des gants eux-mêmes très propres.

Ces conditions étant supposées remplies, les mesures doivent être faites rapidement car les valeurs mesurées de F_c , donc de σ , peuvent diminuer avec le temps.

Nous avons pu mesurer une diminution de 15% de la tension entre le Nitropropane 1 et l'eau en quatre heures.

La conclusion, connue, est qu'il est très facile de mesurer des tensions interfaciales fausses par défaut et que tout résultat de mesure devrait être accompagné non seulement de la méthode de mesure mais des conditions d'exécution.

UTILISATION DE LA METHODE DU CYLINDRE POUR DES MASSES VOLUMIQUES UN PEU DIFFERENTES DE ZERO ($B_0 \neq 0$)

Trois problèmes se posent lorsque $\Delta\rho$ n'est pas nulle.

- Il n'est plus possible d'obtenir un cylindre mais les diagrammes de la figure 4 permettent de connaître B_0 donc $\Delta\rho$ en mesurant φ .
- Les courbes représentatives de F/F_c en fonction de Λ se décalent en fonction de B_0 comme le montrent trois exemples de la figure 5.
- Il n'est plus possible de mesurer directement la force "zéro" que nous obtenions après rupture du cylindre. Une force d'Archimède F_0 , due à $\Delta\rho$, s'exerce sur la calotte non sphérique reliée au capteur de force. Elle s'ajoute ou se retranche à la force "zéro". Le calcul de F_0 nécessite le calcul du volume de la calotte connaissant les coordonnées planes de son interface.

De plus, les instabilités créées par $\Delta\rho$ font que les calottes peuvent varier de volume d'une rupture à une autre en fonction des conditions d'étirement du pont liquide.

Néanmoins, une estimation de l'effet du nombre de Bond sur F et F_0 montrerait que $\Delta F = F - F_0/F_c$ est égale à $1 + KB_0$, K étant un coefficient de l'ordre de 1.

L'erreur de mesure de F/F_c et sur σ est donc de l'ordre du nombre de Bond.

REFERENCES

- [1] C. Bisch, A. Lasek, H. Rodot - Comportement hydrodynamique de volumes sphériques semi-libres en apesanteur simulée. *J. de Méc. Théo. et Appl.*, 1, n°1, 1982, p. 165-183.
- [2] C. Bisch - Analogies of the mechanical behaviour between liquids studied in microgravity and solids. Application to loaded spheres. 7è Symp. Euro. des Sciences des Fluides et des Matériaux en Microgravité, Oxford, 1989. Publication ESA SP-295, p. 531-539.
- [3] J. Plateau - Statique expérimentale et théorique des liquides soumis aux seules forces moléculaires. Vol. II, 1973. Gauthier-Villars.
- [4] W. Howe - Ph. D. Dissertation. Universität zu Berlin, 1887.
- [5] G. Hormann - Ph. D. Dissertation. Universität zu Berlin, 1887.
- [6] H. Bouasse - Capillarité, phénomènes superficiels. 1924. Delagrave.
- [7] R.D. Gillette, D.C. Dyson - Stability of fluid interfaces of revolution between equal solid circular plates. *J. of Chem. Eng.*, 2, 1971, p. 44-54.
- [8] J.F. Padday - Capillary forces and stability in zero-gravity environments. 2è Symp. Euro. des Sciences des Matériaux dans l'Espace, Frascati, 1976. Publication ESA SP-114, p. 447-454.
- [9] E.A. Boucher, T.G.J. Jones - Equilibrium and stability characteristics of zero-gravity fluid bridges constrained between equal solids rads. *J. of Colloid and Interf. Sci.*, 126, n°2, 1988, p. 469-481.
- [10] I. Martinez, A. Sanz - Experiments with long liquid columns under microgravity. 7è Symp. Euro. des Sciences des Fluides et des Matériaux en Microgravité, Oxford, 1989. Publication ESA SP-295, p. 431-419.
- [11] G. Pétré, G. Wozniak - Measurement of the variation of interfacial tension with temperature between immiscible liquids of equal density. *Acta Astronautica*, 13, 1986, p. 669-672.
- [12] A. Passerone, L. Liggieri, N. Rando, F. Ravera, E. Ricci - A new experimental method for the measurement of the interfacial tension between immiscible fluids at zero Bond number. *J. of Colloid and Interf. Sci.*, (à paraître).
- [13] P.L. Marston, S.G. Goosby, D.S. Langley, S.E. Lo Porto-Arione - Resonances, radiation pressure and optical scattering phenomena of drops and bubbles. *Proc. of the 2nd Int. Collo. on Drops and Bubbles*, 1981, Publication JPL 82-7, p. 166-174.
- [14] W.K. Rhim, S.K. Chung, D. Delleman - Electrostatic levitations and drop dynamics experiments. 7e Symp. Euro. des Sciences des Fluides et des Matériaux en Microgravité, Oxford, 1989. Publication ESA SP 295, p. 629-638.
- [15] S. Bekki - Contribution à l'étude de l'effet Marangoni de soluté. Thèse de l'Université Paris VI, 1988.

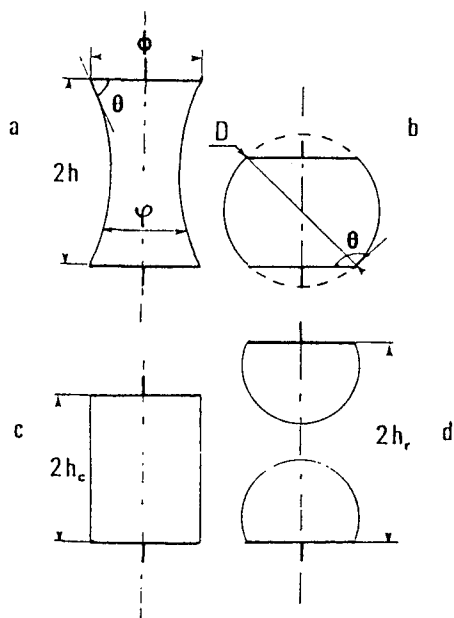


Figure 1 : Schéma d'un pont liquide de volume fixé (a). Cas particuliers de la sphère (b), du cylindre (c) et du pont après rupture (d).

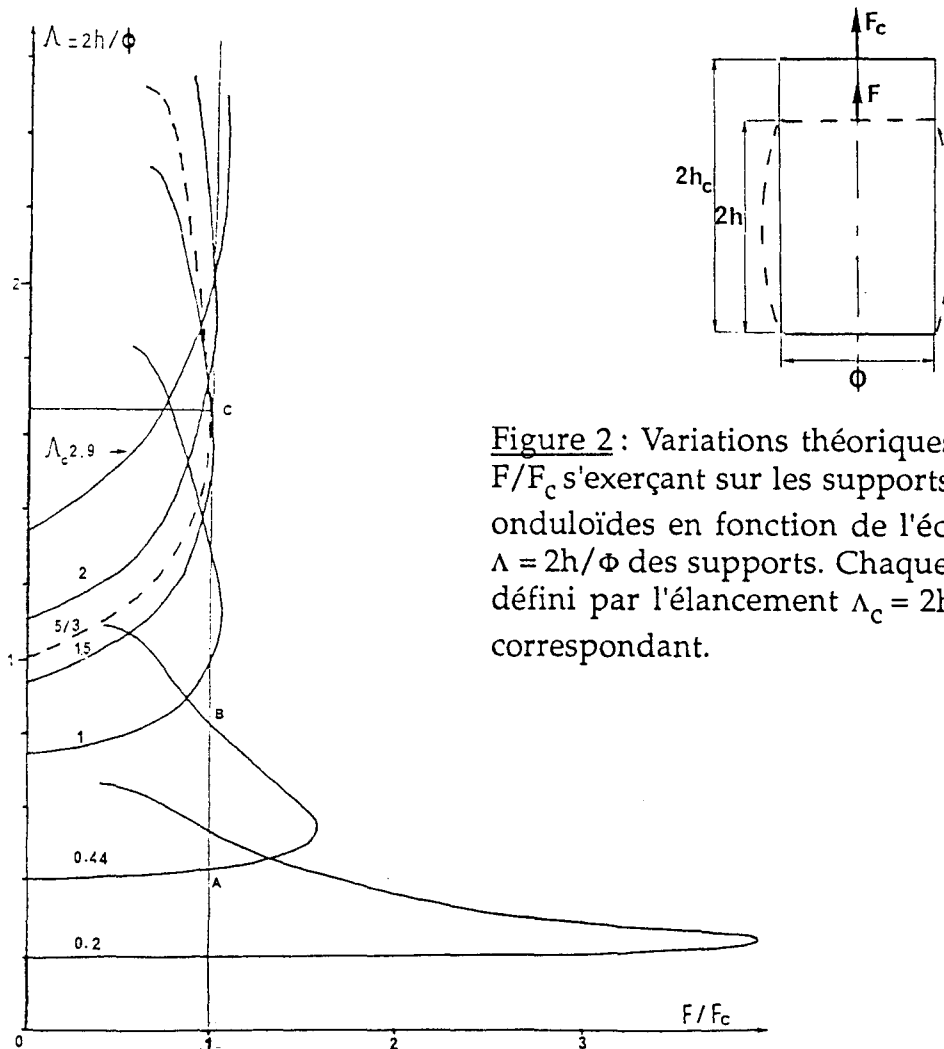


Figure 2 : Variations théoriques du rapport F/F_c s'exerçant sur les supports de sept ondulôides en fonction de l'écartement relatif $\Lambda = 2h/\phi$ des supports. Chaque ondulôide est défini par l'élanement $\Lambda_c = 2h_c/\phi$ du cylindre correspondant.

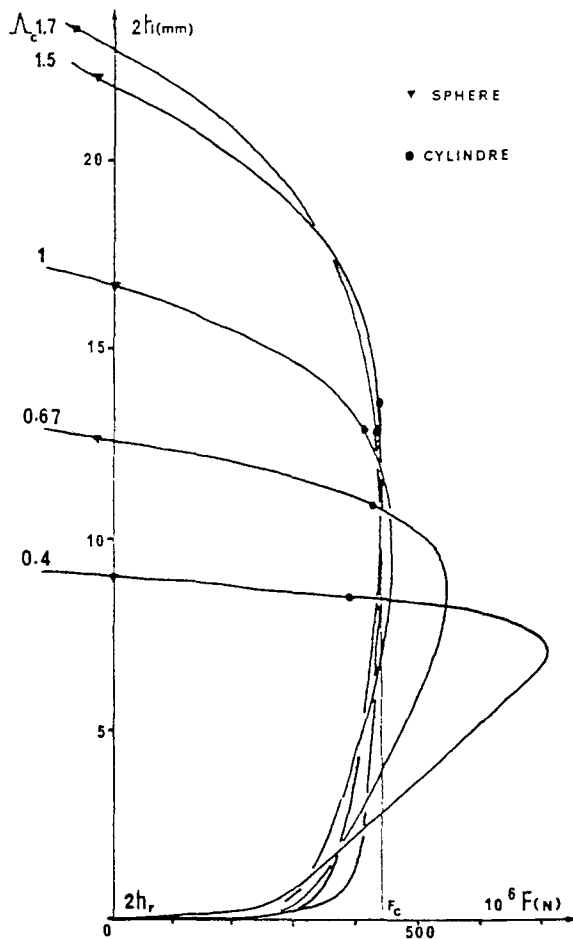


Figure 3 : Diagramme de forces F mesurées sur cinq onduloïdes en fonction de l'écartement $2h$ des supports de diamètre 15 mm. Chaque onduloïde est défini par l'élanement Λ_c du cylindre correspondant. Le liquide interne est du Nitropropane 1. Le liquide externe est de l'eau saturée en Nitropropane.

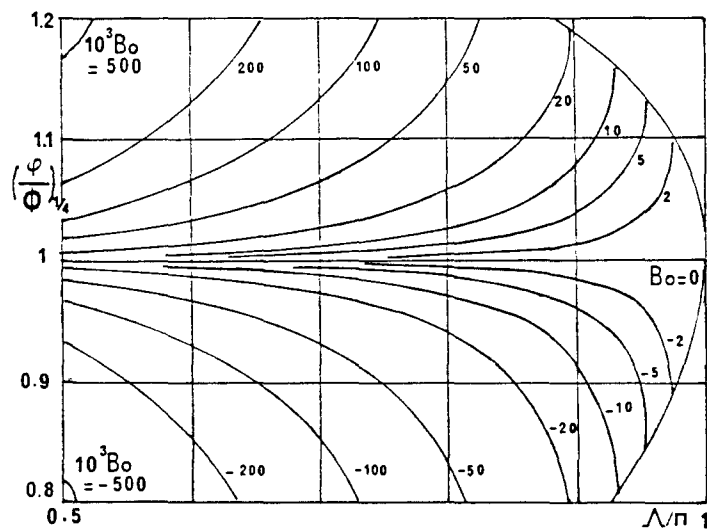


Figure 4 : Variations du diamètre relatif $(\phi/\Phi)_{1/4}$ au quart de la hauteur du pont liquide en fonction de l'élanement réduit Λ/π pour différents nombres de Bond

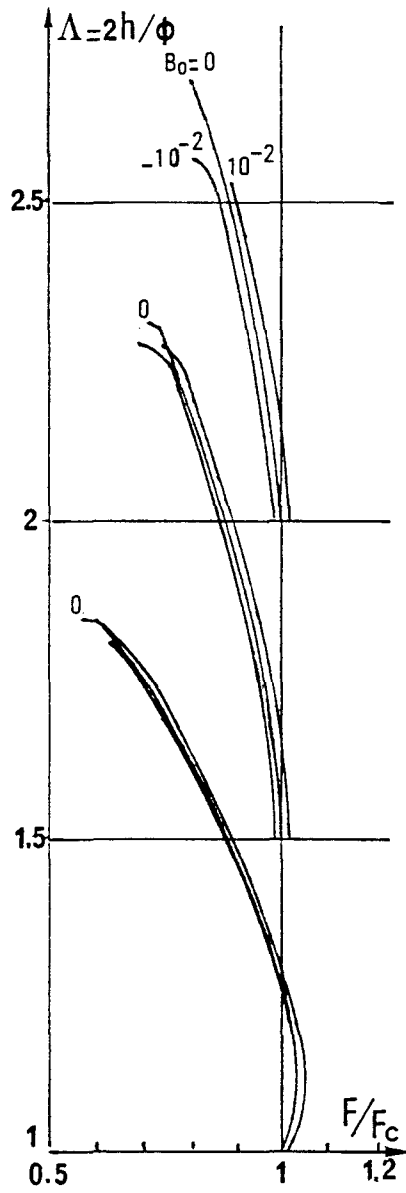


Figure 5 : Evolution du rapport F/F_c de trois cylindres ($\Lambda_c = 1 ; 1,5 ; 2$) en fonction de l'élancement Λ pour $B_0 = -10^{-2}, 0, 10^{-2}$