



Guidage d'une microgoutte par un faisceau laser

Pierre-Gilles de Gennes

Collège de France, 3, rue d'Ulm, 75005 Paris, France

Reçu le 30 septembre 2005 ; accepté le 23 novembre 2005

Disponible sur Internet le 10 janvier 2006

Présenté par Pierre-Gilles de Gennes

Résumé

Un faisceau laser de puissance modeste (0,1 watt) doit pouvoir déplacer une goutte par effet Marangoni (en chauffant légèrement le liquide). Une élévation de température de quelques degrés doit permettre de vaincre l'hystérésis de surface. Les vitesses attendues sont assez élevées. La direction du mouvement peut être variée optiquement. Le mouvement d'une ou plusieurs gouttes peut être contrôlé rétroactivement. *Pour citer cet article : P.-G. de Gennes, C. R. Physique 6 (2005).*

© 2005 Publié par Elsevier SAS pour l'Académie des sciences.

Abstract

Pushing a micro droplet using a laser beam. A weak laser beam (~ 0.1 watt) should be able to displace a drop using the Marangoni effect (via an imposed temperature gradient). Temperature shifts of $\sim 10^\circ$ should overcome pinning forces on the supporting surface. The expected drop speeds are rather high. The direction of motion can be monitored optically. The movement of one (or many) droplets may be controlled retroactively. This system should be efficient for drop sizes $\sim 10 \mu\text{m}$, and less efficient for smaller drops (which do not absorb much energy). *To cite this article: P.-G. de Gennes, C. R. Physique 6 (2005).*

© 2005 Publié par Elsevier SAS pour l'Académie des sciences.

Mots-clés : Effet Marangoni ; Déplacement d'une goutte

Keywords : Marangoni effect; Drop movement

1. Principe

Nous envisageons le montage de la Fig. 1. Une goutte liquide de turbidité moyenne (longueur d'atténuation ~ 1 cm) est exposée à une tache lumineuse médiocrement focalisée (diamètre de la tache : r_t).

Par un dispositif optique nous assurons que l'intensité lumineuse n'est pas uniforme dans la tache, mais a un gradient selon une direction x du plan horizontal. La goutte va alors s'échauffer, et son élévation de température ΔT aura, elle aussi, un gradient dans la direction x . Ceci doit engendrer un gradient de tension superficielle $\nabla\sigma$, et donc un effet Marangoni, qui entraîne la goutte du côté froid. Le but de la présente Note est d'estimer (au niveau des lois d'échelle) l'importance de ces effets.

Adresse e-mail : pogg@curie.fr (P.-G. de Gennes).

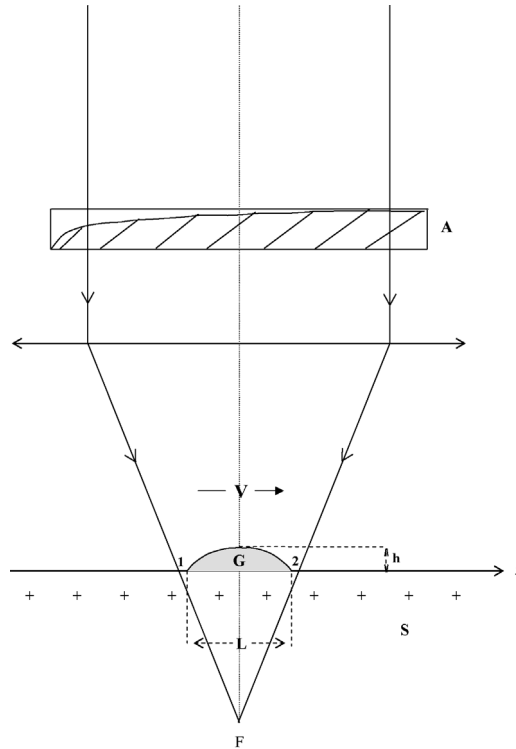


Fig. 1. Une goutte G, posée sur un support solide S, est exposée à un gradient d'intensité lumineuse grâce à un coin absorbant A. La goutte est plus froide à droite qu'à gauche. Sa tension superficielle (plus élevée au point 2 qu'au point 1) la tire vers la droite.

Fig. 1. A drop G on a smooth solid S is exposed to a gradient of optical heating (through an absorbing wedge A in the incoming beam). The drop is warmer at point 1, and the surface tension is larger at point 2 than at point 1. This pulls the drop to the right.

2. Élévation de la température ΔT

Soit W la puissance fournie par cm^2 de la tache. Si la source a une puissance de 0,1 watts, répartie sur un faisceau initial de largeur 1 cm, et si la tache a un diamètre $r_t = 10^{-3}$ cm, on aura $W = 10^5$ watts/ cm^2 . Une fraction f de cette énergie sera absorbée dans la goutte. Si s est la longueur caractéristique d'absorption dans le liquide, et h l'épaisseur de la goutte, on aura :

$$f = h/s \quad (h \ll s) \quad (1)$$

Par exemple, pour $h = 10^{-3}$ cm et $s = 1$ cm (eau légèrement turbide), on aura $f = 10^{-3}$. On peut, si cela est nécessaire, renforcer la turbidité du liquide par une faible fraction de particules opaques passives (TiO_2 , argiles, latex).

La chaleur libérée dans la goutte s'écoule vers le support par conduction thermique. Pour un liquide comme l'eau, la conductivité thermique κ est, en gros, comparable à celle d'un support vitreux. Le flux thermique dans cet ensemble implique des distances spatiales de l'ordre de l'épaisseur h de la goutte. L'élévation de température ΔT est alors régie par

$$\kappa \frac{\Delta T}{h} \cong Wf \quad (2)$$

et la variation relative vaut

$$\varepsilon = \frac{\Delta T}{T} \cong \frac{Wfh}{\kappa T} \quad (3)$$

Avec $\kappa = 6 \times 10^{-3}$ J/s/ cm°C , $h = 10$ micromètres, $Wf = 100$ watts/ cm^2 , on attend $\Delta T = 20$ K et $\varepsilon \cong 6\%$.

3. Conséquences capillaires

La tension superficielle σ décroît quand la température augmente. Pour un liquide loin de son point critique, on peut estimer sa chute $\Delta\sigma$ en écrivant

$$\frac{\Delta\sigma}{\sigma} \cong \frac{\Delta T}{T} = \varepsilon \quad (4)$$

Considérons d'abord une goutte sans hystérésis de mouillage. Supposons que W (et l'échauffement ΔT) ont un gradient spatial caractérisé par la dimension de tache r_t (intensité nulle à un bout, et égale à W à l'autre bout). Supposons enfin que la goutte a une dimension horizontale L inférieure ou égale à r_t (nous postulons toujours que $L > h$). Alors la différence de tension superficielle entre les deux extrémités est

$$\Delta\sigma_{12} \cong \frac{L}{r_t} \Delta\sigma \quad (5)$$

Un mouvement de gouttes en présence de $\Delta\sigma_{12}$ a été discuté jadis à propos des « gouttes filantes » où les angles de contact sont modifiés par une réaction chimique du liquide avec la surface [1–4]. On peut écrire très qualitativement que la vitesse de la goutte est

$$V \cong \frac{\Delta\sigma_{12}}{l\eta} \cong \frac{\sigma}{l\eta} \varepsilon \quad (6)$$

où l est un facteur logarithmique décrivant la dissipation près de la ligne triple, et η la viscosité du liquide. Prenant $\sigma = 70 \text{ mJ/m}^2$, $\eta = 10^{-2}$ poises, $h = r_t$, et $l = 10$, on aurait $V \cong 40 \text{ cm/s}$ pour $\varepsilon = 6 \times 10^{-2}$. (Mais, bien entendu, cette vitesse ne subsistera que tant que la tache reste au-dessus de la goutte !).

Il faut néanmoins garder présente à l'esprit la possibilité d'une *hystérésis capillaire*, si la surface solide a des défauts physiques ou chimiques. Lorsque l'angle de contact θ est compris dans un intervalle $\theta_e \pm \delta\theta$ (où θ_e est l'angle d'équilibre) la goutte ne se met pas en mouvement parce que la ligne de contact est arrêtée sur des défauts [4, Chap. 5.5]. L'hystérésis sera vaincue seulement si $\varepsilon \geq \delta\theta$.

Avec notre exemple ($\varepsilon = 6 \times 10^{-2}$) ceci impliquerait une hystérésis faible. Mais il serait facile de gagner un facteur 10 sur ε (par exemple en montant la puissance de la source, ou bien la turbidité).

4. Conclusions et commentaires

- (1) Il paraît possible de déplacer des gouttes de taille 10 microns par un faisceau laser de puissance inférieure au watt. Une fois l'hystérésis vaincue, les déplacements attendus sont rapides¹ et il peut être intéressant d'utiliser des régimes *pulsés*. Le régime thermique stationnaire envisagé par l'Éq. (2) est valable tant que la durée des pulses est supérieure :
 - (i) au temps de diffusion thermique dans l'épaisseur h : $\tau_{th} = h^2/D$ (D = diffusivité thermique) ;
 - (ii) au temps d'oscillation d'une goutte : $\tau_{os} \cong (\rho/\sigma h)^{1/2} L^2$ (ρ = densité du liquide).
- (2) Il est possible, par des dispositifs optiques simples (agissant à l'échelle de 10 millisecondes), de changer la direction du gradient, donc la direction du mouvement. Il est également possible de suivre optiquement le mouvement de la goutte, et éventuellement de coupler par rétroaction le mouvement de la goutte et le mouvement de la tache.
- (3) Les obstacles principaux sont l'hystérésis (discutée plus haut) et un excès de transparence : les effets sont très sensibles au facteur f défini par l'Éq. (1). On peut évidemment s'intéresser dans certains cas à des gouttes *métalliques* où f est beaucoup plus grand ($s \leq 1$ micron).
- (4) Comme $\Delta T \sim h^2$ (Eqs. (1) et (3)) il y a nécessairement sur le bord arrière une région où le gradient thermique est *inversé* comme nous l'a signalé le rapporteur. Pour rendre cette région petite, il faut que l'atténuation du faisceau crée un gradient fort vers l'arrière.
- (5) Le même montage pourrait être utilisé pour le guidage de *bulles* dans une eau fortement turbide. Le signe du mouvement est inversé. L'épaisseur h qui intervient est ici celle de la veine liquide, mais pour maintenir un gradient on doit garder h comparable au diamètre de bulle. Un avantage intéressant de bulles flottant dans le liquide est que (vu l'absence de contacts avec un solide) on élimine les problèmes d'hystérésis : donc on peut travailler avec des puissances faibles.
- (6) On peut aussi déplacer des gouttes dans une *émulsion* ; mais ici les effets sont peut-être plus subtils : l'élévation de température pourrait induire une désorption du surfactant.

¹ Il faut néanmoins éviter que le mouvement ne réalise une uniformisation de ΔT par convection. Ceci suppose $V < D_{th}L/h^2$.

- (7) Au lieu de chauffer la goutte, on pourrait chauffer le support, supposé très absorbant. On gagne alors sur le facteur f , mais on perd sur les conductivités thermiques.
- (8) La gamme de tailles permises pour les gouttes (h) est limitée.
- (i) Si on va vers des gouttes plus grosses (en gardant le même rayon de tache pour focaliser l'énergie lumineuse), on doit assurer que la tache porte sur la partie *arrière* de la goutte ; donc un asservissement paraît nécessaire.
 - (ii) Si on va vers des gouttes plus petites, on doit noter que f est proportionnel à h (Éq. (1)) et que ε est proportionnel à h^2 ; donc on est rapidement arrêté à h petit. Un montage avec support absorbant est alors préférable.

Mais, globalement, le pilotage laser permet peut-être des effets intéressants (impliquant une ou plusieurs gouttes) en microhydrodynamique.

Remerciements

Nous avons bénéficié (a) de 3 remarques importantes d'un rapporteur ; (b) de discussions très utiles avec A. Buguin et M. Joanicot.

Références

- [1] C. Bain, G. Burnett-Mall, R. Montgomerie, *Nature* 372 (1994) 414.
- [2] E. Dominguez Dos Santos, T. Ondarçuhu, *Phys. Rev. Lett.* 75 (1975) 2972.
- [3] F. Brochard, P.-G. de Gennes, *C. R. Acad. Sci. (Paris) II* 321 (1995) 285.
- [4] Pour une analyse détaillée, voir : F. Brochard, D. Quéré, P.-G. de Gennes, *Gouttes, Bulles, Perles et Ondes*, Belin, Paris, 2002 (Chap. 10).