

Etude Expérimentale et Théorique du Refroidissement par Evaporation de Gouttes Sessiles sous Pression Réduite.

Samuel DAVID¹, Khellil SEFIANE^{1*}, Lounès TADRIST², Gavin DUNN³, Stephen WILSON³, Brian DUFFY³

¹ School of Engineering & Electronics, University of Edinburgh
Sanderson building, Kings Buildings, Mayfield Road, Edinburgh EH9 3JL, United Kingdom

² Laboratoire IUSTI, UMR CNRS 6595, Polytech'Marseille, Université de Provence
Technopôle de Château-Gombert - 5, rue Enrico Fermi 13453 Marseille CEDEX 13, France

³ Department of Mathematics, University of Strathclyde
Livingstone Tower, 26 Richmond Street, Glasgow G1 1XH, United Kingdom

* (auteur correspondant : k.sefiane@ed.ac.uk)

Résumé - Ce papier présente l'étude expérimentale et théorique de gouttes sessiles en évaporation sous pression réduite. L'expérience, réalisée avec de l'eau déionisée déposée sur de l'Aluminium (conducteur) ou du PTFE (isolant), permet de mesurer pour différentes pressions (de 40mbar à 1000mbar) le taux d'évaporation de la goutte. Le modèle mathématique considérant que l'évaporation est limitée par la diffusion de la vapeur et tenant compte de la conductivité thermique du substrat est en bon accord avec les résultats expérimentaux. Le refroidissement des gouttes sur le substrat isolant et à basse pression est plus important.

Nomenclature

C_p	capacité calorifique, $J/g.K$	c	concentration de vapeur, kg/m^3
D	diffusivité massique, m^2/s	T	température, K
h	hauteur de la goutte, m	p	pression, Pa
H	humidité relative	<i>Symboles grecs</i>	
K	conductivité thermique, $W/m.K$	θ	angle de contact
L	chaleur latente, J/kg	<i>Indices et exposants</i>	
r	distance à l'axe de symétrie, m	a	ambient
R_a	rayon de la base de la goutte, m	s	solide
R_m	rayon de courbure de la goutte, m	sat	valeur à saturation

1. Introduction

L'évaporation de gouttes sessiles est un phénomène qui se retrouve aussi bien dans le monde de l'industrie que celui de la vie de tous les jours. Nous pouvons citer par exemple les procédés tels que le refroidissement, la désalination, les herbicides ou bien encore la formation d'une tache de café (étudié par Deegan [1] plus spécialement).

Les gouttes sessiles sont particulières dans le fait que trois phases co-existent : solide (substrat), liquide (goutte) et gazeuse (gaz environnant). Afin de bien comprendre l'évolution de gouttes sessiles en évaporation, une analyse complète des transferts de chaleur et de masse aux interfaces ainsi que les interactions solide-liquide (mouillabilité) sont essentielles.

Depuis une trentaine d'années, beaucoup de travaux ont permis de mieux comprendre les mécanismes du mouillage lors de l'évaporation [1-11]. Deegan et al. [1, 2] se sont intéressés à l'évaporation de gouttes sessiles où la ligne de contact est accrochée. Ils ont écrit l'expression du taux d'évaporation en utilisant l'analogie électrostatique, lentille biconvexe conductrice portée à un potentiel constant, résolu par Lebedev [12], et illustrent le fait que l'évaporation

est très forte au niveau de la ligne triple. Hu et Larson [13, 14] ont modélisé le cas où la goutte sessile était assez petite pour être schématisé comme une calotte sphérique et la ligne triple fixe. Ils considèrent que l'évaporation est principalement limitée par la diffusion de la vapeur d'eau dans le gaz et que ce procédé se déroule en régime stationnaire.

Dans des précédentes recherches [15, 16] nous avons montré que l'influence du substrat à travers sa conductivité thermique ne pouvait être négligé. Pour cela nous avons étudié les taux d'évaporation ainsi que la température de différents liquides déposés sur quatre substrats. Pour accentuer cet effet, des expériences complémentaires ont été faites pour de basses pressions, de 40 mbar à 1000 mbar. Les résultats montrent clairement que le taux d'évaporation variait avec la conductivité du substrat et que la température de la goutte chutait fortement dans le cas du substrat isolant.

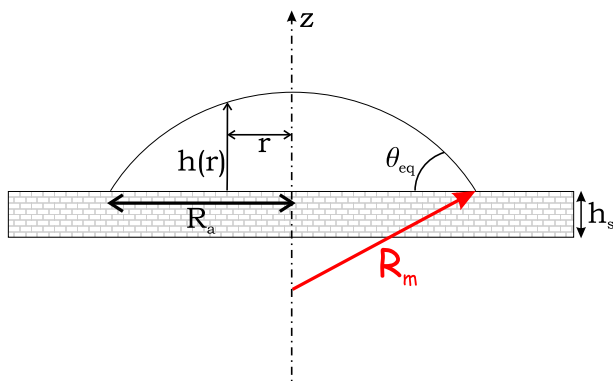


Figure 1 : Différents paramètres géométriques permettant de caractériser une goutte sessile.

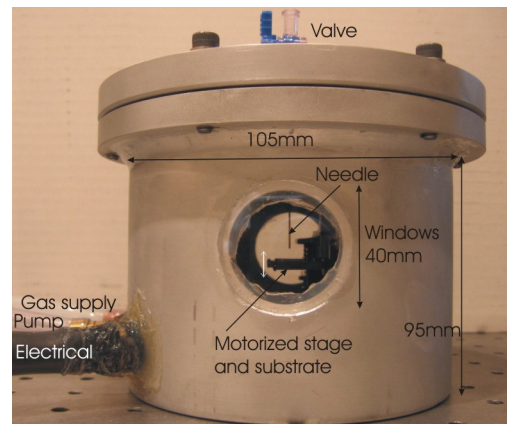


Figure 2 : Photographie de la chambre basse pression utilisée lors des expériences.

Dans la présente étude, un modèle mathématique de l'évaporation d'une goutte sessile tenant compte de la conductivité thermique du substrat a été élaboré. L'évaporation est quasi stationnaire et limitée par la diffusion de la vapeur dans le gaz ambiant. Tout d'abord les conditions expérimentales et le modèle sont présentés. Finalement les données sont exposées et comparées au modèle.

2. Procédures expérimentales

Les expériences sont réalisées avec de l'eau deionisée ultra pure (milliQ) déposée sur deux différents substrats (10×10×1 mm): l'aluminium et le PTFE. Ces deux matériaux ont été choisis pour leur conductivité thermique, trois ordres de grandeurs les différencient, 237 W/m.K pour l'aluminium et 0.25 W/m.K pour le PTFE. Afin de ne pas modifier l'interaction entre le liquide et le solide, une fine couche (3 μm) d'aluminium a été déposée sur le PTFE. Cette opération n'altère en rien sa conductivité thermique. De plus la rugosité de chaque surface a été analysée à l'aide d'un profilomètre ZYGO (microscopie par interférométrie) afin de confirmer qu'elles sont du même ordre, environ 300 nm.

Pour maîtriser la pression et la nature du gaz environnant, la goutte est placée dans une enceinte fermée (voir Figure 2). Cette enceinte nous permet de travailler sous des pressions comprises entre 40 mbar et 1000 mbar. Pour les plus basses pressions, la fluctuation ne

dépasse pas 5% au cours de l'expérience. Pour le gaz, notre choix s'est porté sur l'Hélium pour sa neutralité et aussi par commodité.

Les mesures des différents paramètres de la goutte (volume, angle de contact, diamètre, etc.) se font à l'aide d'un appareil de mesure d'angle de contact, le DSA100 de Krüss. Il permet de contrôler le volume de la goutte déposée, d'enregistrer des séquences vidéos (jusqu'à 25 images par seconde) et de les analyser afin d'obtenir les données souhaitées.

3. Modèle

A la différence de l'ébullition, l'évaporation est un phénomène interfacial. En effet, au niveau de l'interface liquide-gaz les molécules d'eau la traversent de part et d'autre. Si le gaz environnant n'est pas saturé, il y a un excédent de molécules s'échappant du liquide, il y a évaporation. Ce déséquilibre est maintenu par la diffusion des molécules au voisinage de l'interface vers le milieu ambiant. Ce dernier étant le transfert le plus lent, l'évaporation est donc limitée par la diffusion des molécules d'eau dans l'Hélium. Dans notre situation, ce procédé peut être considéré comme stationnaire, au niveau de l'interface on a une concentration de vapeur saturante $c_v(T_s)$ et elle est nulle loin de la goutte ($H = 0$).

Un modèle 2D (car la goutte sessile a un axe de symétrie) tenant compte de la diffusion de la vapeur d'eau dans le gaz ambiant ainsi que de la diffusion de la chaleur dans la goutte et le substrat a été élaboré. Que ce soit la température T dans la goutte ou bien celle dans le solide T_s , elles sont toutes deux gouvernées par l'équation de Laplace :

$$\nabla^2 T = 0 \quad \text{et} \quad \nabla^2 T_s = 0$$

On considère que la température ambiante est constante et égale à T_a . Au niveau de l'interface liquide-gaz, la perte de chaleur due à la vaporisation des molécules de liquide est compensée par l'apport d'énergie provenant du substrat. Aux différentes interfaces nous avons alors :

$$\begin{aligned} T_s &= T_a & \text{pour} & \quad z = -h_s \\ T_s &= T_a & \text{pour} & \quad z = 0, r > R \\ T_s &= T & \text{pour} & \quad z = 0, r < R \\ -k_s \frac{\partial T_s}{\partial z} &= -k \frac{\partial T}{\partial z} & \text{pour} & \quad z = 0, r < R \\ LJ &= -k \vec{\nabla} T \cdot \vec{n} & \text{pour} & \quad z = h, r < R \end{aligned}$$

Pour le profil de concentration de la vapeur dans le gaz nous avons aussi :

$$\nabla^2 c = 0$$

A l'interface liquide-gaz, la concentration en vapeur est saturée, sa valeur dépend de la température interfaciale :

$$c = c_{sat}(T_a) + \left. \frac{\partial c_{sat}}{\partial T} \right|_{T=T_a} (T - T_a) \quad \text{pour } z = h, \quad r < R$$

$$\frac{\partial c}{\partial z} = 0 \quad \text{pour } z = 0 \quad r > R$$

$$c \rightarrow Hc_{sat}(T_a) \quad \text{quand } \sqrt{r^2 + z^2} \rightarrow \infty$$

Le coefficient de diffusion intervient uniquement dans l'expression du flux de masse J , de tel manière que :

$$J = -D \left. \frac{\partial c}{\partial z} \right|_{z=h}$$

Comme le cas de la diffusion de la vapeur d'eau dans de l'Hélium a été maintes fois étudié, le coefficient de diffusion est connu, il vaut $0.8 \text{ cm}^2/\text{s}$. Dans le cas de mélanges binaires et pour des basses pressions, D est inversement proportionnel à la pression [17]. Donc à partir de sa valeur à pression atmosphérique, on détermine facilement $D(p)$.

Pour résoudre le problème une méthode numérique a été employée (à l'aide du logiciel COMSOL). La concentration de la vapeur et la température sont déterminées à chaque pas de temps, de même que le nouveau profil de la surface libre.

4. Résultat et Discussion

Comme notre étude porte sur l'évolution du taux d'évaporation, on s'intéresse principalement à l'évolution du volume de la goutte en fonction du temps. Les substrats ont été choisis de telle façon que la ligne triple reste accrochée la majeure partie de l'évaporation (c'est dû à la rugosité de la surface). Dans ces conditions, le volume décroît linéairement avec le temps (voir Figure 3). On en déduit aussi que le taux d'évaporation est proportionnel au rayon de base de la goutte R_a . C'est un résultat bien connu qui a déjà été montré par Grandas [18], Deegan [1, 2] ou Crafton [6].

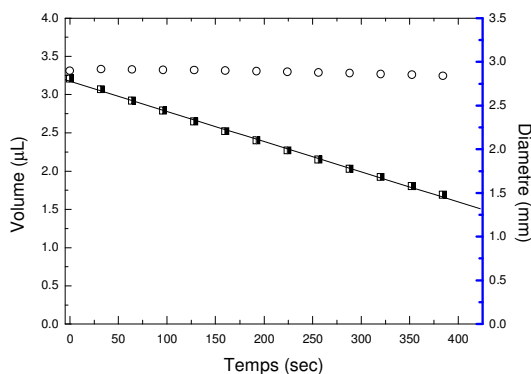


Figure 3 : Evolution du volume de la goutte sessile dans le temps.

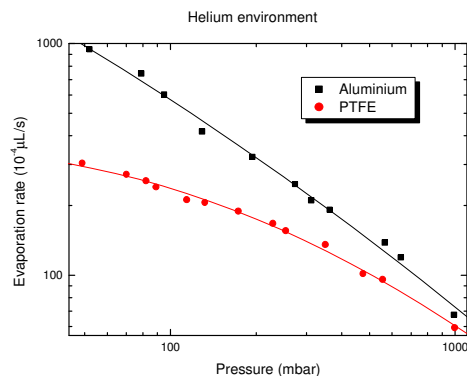


Figure 4 : Taux d'évaporation de la goutte déposée sur chaque substrat aux différentes pressions.

Toutes les mesures sont donc réalisées avec des gouttes de même volume, $2,5\mu\text{L}$, ce qui correspond à un rayon de la base de la goutte de 2,7 mm. Comme l'ont montré de précédents résultats, David et al. [15, 16], le taux d'évaporation augmente fortement avec la réduction de la pression (voir Figure 4). Les taux obtenus sur le substrat le plus conducteur (Al) sont toujours supérieurs à ceux obtenus avec le substrat isolant (PTFE).

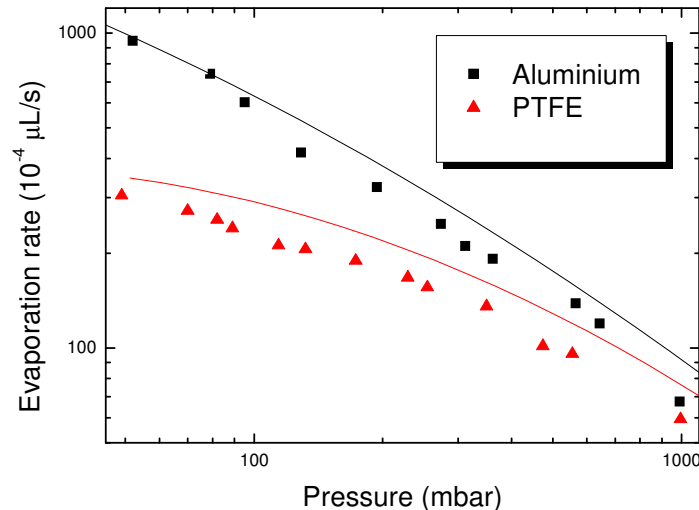


Figure 5. Comparaison entre le modèle mathématique et les données expérimentales.

Les résultats issus du modèle (voir Figure 5), même s'ils surestiment les résultats expérimentaux, ont la même allure. Les taux d'évaporation sur le substrat le plus conducteur, Al, sont bien supérieurs à ceux du PTFE. Les taux augmentent fortement avec les basses pressions. Ceci montre bien qu'il est essentiel de prendre en compte la nature du substrat utilisé afin de correctement estimer les pertes d'énergies dues à l'évaporation.

Actuellement, différentes améliorations au modèle sont à l'étude. Notre attention se porte plus particulièrement sur une meilleure estimation de la température à l'interface liquide-gaz, ainsi que sur la qualité de certaines hypothèses (absence de convection, humidité nulle loin de la goutte).

Références

- [1] R. Deegan, Pattern formation in drying drops. *Physical Review E*, 1998. 61(1): p. 475-485.
- [2] R. D. Deegan; O. Bakajin; T. F. Dupont et al., *Nature*, 1997, 389, 827.
- [3] C. Bourges-Monnier and M. Shanahan, Influence of Evaporation on Contact Angle. *Langmuir*, 1995. 11: p. 2820-2829.
- [4] DeGennes, P., Wetting: statistics and dynamics. *Rev. Mod. Phys.*, 1985. 57: p. 827-863.
- [5] Pickenett, R. and R. Bexon, The Evaporation of Sessile or pendant Drops in Still Air. *Journal of Colloid and Interface Science*, 1977. 61(2): p. 336-350.
- [6] Crafton, E. F. and Black, W. Z., Heat Transfer and Evaporation Rates of Small Liquid Droplets on Heated Horizontal Surfaces, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2004
- [7] Poulard, C., Benichou, O., Cazabat, A.M., Freely Receding Evaporating Droplets, *Langmuir*, 2003, 19, 8828-8834. 18

- [8] O.E. Ruiz and W.Z. Black, Evaporation of Water Droplets Placed on a Heated Horizontal Surface. *Journal of Heat Transfer*, 2002. 24.
- [9] Poulard, C. Guéna, G. and Cazabat, A. M., Diffusion-driven Evaporation of Sessile Drops, *J. Phys.: Condens. Matter*, 2005
- [10] Sultan, E., Boudaoud, A. And Ben Amar, M., Evaporation of Thin Film: Diffusion of the Vapour and Marangoni Instabilities, *J. Fluid Mech.*, 2005
- [11] Shahidzadeh-Bonn, N. Rafai, S. Azouni, A. And Bonn, D., Evaporating Droplets, *J. Fluid Mech.*, 2006
- [12] N. N. Lebedev, Special functions and their applications, *Prentice-Hall*, 1965
- [13] H. Hu and R.G. Larson, Evaporation of a Sessile Droplet on a Substrate. *Journal of Physical Chemistry B*, 2002. 106: p. 1334-1344.
- [14] H. Hu and R.G. Larson, Analysis of the Effect of Marangoni Stresses on the Microflow in an Evaporating Sessile Droplet, *Langmuir*, 2005, 21, 3972-3980.
- [15] S. David, K. Sefiane, L. Tadrist, On the effect of thermal conductivity of the substrate in the wetting and evaporation of sessile drops, *Colloid and surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*, 2005, doi:10.1016/j.colsurfa.2006.12.018
- [16] S. David, K. Sefiane, L. Tadrist, Influence of Substrate Thermal Properties on the Evaporation of Water under Reduced Pressure, *Congrès français de thermique*, SFT 2006, 2006
- [17] R.C. Reid, J.M. Prausnitz, B.E. Poling, The properties of gases and liquids, *MacGraw-Hill*, 1986
- [18] L. Grandas, G. Reynard, R. Santini, L. Tadrist, Etude expérimentale de l'évaporation d'une goutte posée sur une plaque chauffante. Influence de la mouillabilité, *International journal of thermal sciences*, 2005, issue 2, 44, 137-146.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier le ministère Britannique pour la recherche l'EPSRC (Engineering and Physical Sciences Research Council) pour le soutien financier apporté à ce travail sous le contrat GR/S59444/01.