

Transferts thermiques et instabilités au sein d'une goutte sessile d'éthanol en évaporation

Benjamin SOBAC*, David BRUTIN

Laboratoire IUSTI – Ecole Polytechnique Universitaire de Marseille – Aix-Marseille Université (I)
5 rue Enrico Fermi – Technopôle de Château-Gombert – 13013 Marseille

* (benjamin.sobac@polytech.univ-mrs.fr)

Résumé - A l'aide de deux caméras visible et infrarouge, nous suivons simultanément l'évolution géométrique et thermique d'une goutte sessile d'éthanol en évaporation. Grâce à un fluxmètre thermique placé sous la goutte, nous avons accès aux transferts thermiques entre le substrat et la goutte. Nous décrivons le processus d'évaporation sur une expérience de référence et mettons en évidence l'existence de quatre phases durant l'évaporation. De plus, nous nous intéresserons à la puissance thermique transférée à la goutte durant chaque étape du processus d'évaporation afin d'obtenir une information importante concernant le couplage entre la dynamique interne et le coefficient d'échange thermique. Enfin, nous présenterons l'influence de la température du substrat et de la taille de goutte sur le processus d'évaporation.

Nomenclature

C_p	capacité thermique massique, $J.kg^{-1}.K^{-1}$	T_s	température du substrat, $^{\circ}C$
D	diamètre de goutte, m	T_{sat}	température de saturation, $^{\circ}C$
h	coefficient d'échange global, $W.m^{-2}.K^{-1}$	V	volume de goutte, m^3
H	hauteur de goutte, m	<i>Symboles grecs</i>	
m	masse de goutte, kg	ρ	masse volumique, $kg.m^{-3}$
N_c	nombre de cellules convectives, (-)	μ	viscosité, $Pa.s$
L_c	longueur capillaire, m	λ	conductivité thermique, $W.m^{-1}.K^{-1}$
L_v	chaleur latente de vaporisation, $J.kg^{-1}$	σ	tension de surface, $N.m^{-1}$
Pr	nombre de Prandtl, (-)	θ	angle de contact, (-)
P	puissance, W	<i>Indices et exposants</i>	
t_{evap}	temps d'évaporation, s	l	liquide
t	temps, s	v	vapeur
T_a	température ambiante, $^{\circ}C$		

1. Introduction

L'évaporation d'une goutte déposée sur un substrat est un processus qui paraît simple. Ce phénomène est communément observable dans la nature et largement utilisé dans l'industrie. Malgré de nombreuses études sur ce sujet, la vitesse d'évaporation est toujours prédite de manière empirique du fait d'un manque de connaissance sur les cellules convectives qui se développent au sein d'une goutte en évaporation et les mécanismes d'évaporation ne sont pas tous compris. Il est cependant aujourd'hui reconnu que la ligne triple joue un rôle privilégié et que l'évaporation d'une goutte apparaît comme le couplage complexe de différents mécanismes: a) le transfert thermique par conduction avec le substrat, b) le transfert thermique par convection induit par des gradients de tension surfaciques ou de la convection naturelle due aux gradients de température au sein de la goutte, c) l'interaction moléculaire liquide/solide entre la goutte et le substrat. La rugosité du substrat tend à modifier la

mouillabilité de la goutte et donc la surface de contact pour un volume identique et d) la diffusion de vapeur autour de la goutte.

Les premières études expérimentales consistent à observer l'évolution du profil et de la masse d'une goutte sessile en évaporation. On en déduit notamment différents modes d'évaporation : à angle de contact constant ou non. Alors que de nombreuses études considèrent une goutte comme une sphère, Erbil & Meric [1] développent un modèle considérant les gouttes comme des formes ellipsoïdales afin de prendre en compte la déformation due aux effets gravitaires. En 2002, Hu & Larson [2] obtiennent numériquement le champ de concentration de vapeur entourant la goutte pour une goutte sessile accrochée et vérifient que le flux d'évaporation devient beaucoup plus important vers la périphérie. En 2008, un modèle incluant les effets de tension de surface, d'évaporation, de gravité, de pression de disjonction et de transferts thermiques avec le substrat fut développé pour décrire la dynamique de goutte de fluide volatile sur des surfaces chauffées [3]. Un bon accord avec les expériences est observé lorsque l'hypothèse de lubrification est vérifiée. Cependant, les aspects thermiques intervenants dans le processus d'évaporation n'ont pas été approchés de façon systématique. En 2009, Dunn & al. [4] démontrent cependant que l'évaporation d'une goutte est fortement influencée par la conductivité du substrat.

Les premières visualisations d'un écoulement interne au sein d'une goutte en évaporation ont été réalisées par Hegseth en 1996 [5]. Utilisant des particules de polystyrène de 2 μm de diamètres comme traceurs, l'auteur révèle que la convection naturelle peut apparaître lors de l'évaporation d'une goutte de méthanol due aux gradients de tension de surfaces. En 2002, une nouvelle méthode d'ombroscopie permettant simultanément de mesurer la dynamique de l'angle de contact et de visualiser l'écoulement interne fut présentée [6]. Grâce à cette méthode, Zhang & Chao observent clairement un écoulement convectif durant l'évaporation de gouttes (pour du n-pentane et du fréon 113). En 2000, Deegan & al. expliquent les mécanismes à l'origine des tâches de café par la migration des particules vers la périphérie de la goutte due à la création d'un courant vers l'extérieur, l'évaporation étant plus importante près de la ligne de contact [7]. Les auteurs utilisent aussi du particule tracking afin de mesurer la vitesse moyenne radiale.

D'autres types de visualisations expérimentales peuvent être réalisées par thermographie IR. En effet, les mesures IR sont des mesures non-intrusives qui ont l'avantage de pouvoir observer l'écoulement sans le perturber. La difficulté réside alors dans l'interprétation correcte du flux IR mesuré en respectant les propriétés radiatives des fluides observés. En effet, le liquide utilisé doit être semi-transparent dans la gamme spectrale de mesure ce qui rend difficile la conversion de la luminance mesurée en température. Certains auteurs [8], [9] choisissent de ne pas observer le fluide mais la face du substrat en contact avec la goutte. Cela peut être une couche de BaF_2 transparent recouvert d'une peinture opaque très émissive permettant la mesure de température en surface de ce substrat et donc à la base de la goutte. Dans d'autres publications, les auteurs observent directement le fluide [10], [11], [12]. Faisant l'hypothèse de l'opacité des différents fluides observés (eau, éthanol, n-pentane) dans la gamme spectrale de la caméra (environ 9-10 μm), seule l'émissivité des fluides est nécessaire pour en déduire la température du fluide.

Le but de notre expérience est d'obtenir une meilleure connaissance sur l'évaporation de goutte sessile et plus spécifiquement comprendre l'influence des instabilités thermo-convectives sur le processus d'évaporation.

2. Montage expérimental

L'expérience a été conçue afin de suivre et caractériser l'évolution d'une goutte en évaporation aussi bien d'un point de vue cinématique que des transferts associés à ce phénomène. Le montage comprend un support chauffant où est déposée la goutte. Ceci est placé au sein d'une cellule expérimentale afin de ne pas être perturbé par la convection naturelle externe à la goutte. La cellule comprend une instrumentation dédiée aux mesures thermiques (température, flux). Les conditions ambiantes (température, pression, humidité) sont enregistrées en permanence. Un schéma du montage expérimental peut-être visualisé figure 1.

Le dispositif chauffant est un cylindre d'aluminium de 10 mm de diamètre et 8 mm de hauteur. Une résistance chauffante est collée entre les cylindres d'acétal et d'aluminium. Celle-ci est couplée à un régulateur PID afin d'imposer une température constante au substrat (entre 25°C et 45°C). Un fluxmètre placé à l'extrémité supérieure du cylindre chauffant permet d'obtenir le flux transmis à la goutte. Ce fluxmètre est peint avec une peinture noire mate afin d'avoir une émissivité proche de 1. Une feuille de PTFE 200 μm , collée sur le fluxmètre, est destinée à être le substrat de nos gouttes. Cette feuille de PTFE est régulièrement changée pour garantir la propreté et la qualité de surface. De plus, un nettoyage avec du papier optique et de l'air comprimé est effectué entre chaque expérience afin d'enlever les dépôts résiduels qui peuvent résulter de l'évaporation. Enfin, la reproductibilité des résultats expérimentaux a été vérifiée. Ceci atteste aussi la propreté de l'expérience.

Le liquide utilisé dans cette expérience est de l'éthanol pur à 99%. Il est utilisé pour ses propriétés de semi-transparence dans les longueurs d'ondes de la caméra infrarouge utilisée. Le fluide a été passé au spectrophotomètre FTIR NICOLET Connexion 560 pour accéder à la transmittivité monochromatique d'une épaisseur de liquide donnée dans une gamme spectrale de 2,5 à 14 μm . Nous analysons et extrayons uniquement les données dans la gamme de 3 à 5 μm qui correspond à la plage de longueurs d'ondes observable par notre caméra infrarouge. Les mesures de transmittivité ont été effectuées trois fois. La figure 2 fournit l'évolution de l'émissivité globale de notre fluide dans la plage de longueurs d'ondes considérée. L'épaisseur du fluide examinée s'étend de 0,2 à 2,0 mm ce qui correspond à la majeure partie des hauteurs de gouttes considérées. La variation d'émissivité peut être modélisée par une loi exponentielle comme suit : $\varepsilon(x) = 1 - \exp(-x/A)$ où x est l'épaisseur optique fluide et ε l'émissivité globale du fluide. La constante A pour l'éthanol est $1,85 \text{ mm}^{-1} \pm 2,1\%$. Les propriétés physiques de l'éthanol à 25°C et 1 atm sont les suivantes: $\rho_L = 789 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$; $\rho_V = 1,50 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$; $C_p = 2845 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$; $L_v = 841 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$; $\lambda = 0,140 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$; $\mu = 1.095 \text{ mPa}\cdot\text{s}$; $\sigma = 22,0 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$; $T_{\text{sat}} = 78,0^\circ\text{C}$; $L_c = 1,69 \text{ mm}$; $\text{Pr} = 22,3$.

Un diagnostic optique permettant l'acquisition de vidéos est obtenu en utilisant une caméra visible JAI BM500GE 2456 par 2058 pixels avec une fréquence d'acquisition maximale de 15 images/s couplée à une lentille microscopique VZM100i. Cet appareil permet la visualisation latérale de la goutte avec une résolution spatiale de 4 μm . Après un traitement d'image, une analyse des films est réalisée avec un logiciel commercial (Kruss - DSA3). Le diagnostic IR est effectué à l'aide d'une caméra infrarouge FLIR SC6000 (640 par 512 pixels) montée d'un objectif microscopique permettant d'atteindre la résolution de 10 μm soit un champ d'observation de 6,4 mm x 5,12 mm. La caméra IR est fixée verticalement afin d'observer la goutte par-dessus. Le fluxmètre en cuivre est recouvert d'une peinture noire mate afin d'obtenir une réflectivité quasi-nulle.

Un thermocouple de type T dont l'acquisition de fait à une fréquence de 1 Hz, nous permet d'avoir la température de la cellule expérimentale. Un fluxmètre à gradient tangentiel,

fabriqué par la société CAPTEC, de diamètre 10 mm, de hauteur 0,8 mm et de sensibilité $0,725 \mu\text{V}\cdot\text{W}^{-1}\cdot\text{m}^2$ est collé à l'extrémité supérieure du cylindre en aluminium afin de suivre le flux transmis par le substrat vers la goutte. Ce fluxmètre est instrumenté en son cœur par un thermocouple de type T afin de connaître la température imposée à la goutte. Tous les signaux mesurés sont enregistrés par le biais d'une station d'acquisition HP34970A.

3. Résultats expérimentaux

3.1. Expérience de référence

Dans cette partie, nous allons complètement décrire et analyser l'évaporation d'une goutte sessile d'éthanol à l'aide des données visibles, de la visualisation IR, des mesures de température et de flux de chaleur. Dans cette expérience, le substrat est à une température imposée $T_s = 34,5^\circ\text{C}$ et le gradient de température entre le substrat et la température ambiante $\Delta T = 16^\circ\text{C}$. La caméra IR nous permet de vérifier l'homogénéité thermique de notre substrat avant l'expérience. Si la différence maximale de température est en dessous de 1°C , nous effectuons l'expérience. La figure 3 montre l'évolution des différentes informations obtenues : les paramètres géométriques à partir de vidéos visibles, la température du substrat et le flux à partir du fluxmètre et le mouvement fluide grâce aux mesures IR. La puissance considérée correspond à celle transmise à la goutte. La contribution de la convection naturelle de la couronne ayant été retranchée, il s'agit donc de la puissance évaporée. Grâce à ses données, on peut mettre en évidence que le processus d'évaporation est composé de quatre phases :

Phase 0 - Mise en température de goutte - Le début de l'expérience est défini par le contact initial de la goutte sur le substrat. Les deux premières secondes sont caractérisées par un phénomène de transition; la goutte, initialement à température ambiante, est déposée sur une surface chaude; la goutte est alors chauffée pour atteindre la température du substrat. Cette première étape est principalement gouvernée par la capacité thermique massique du fluide.

Phase 1 - Evaporation de goutte – Le flux de chaleur atteint un maximum qui correspond au début de notre investigation sur l'évaporation. Au cours de cette phase, on peut observer grâce à la caméra IR, l'apparition et l'évolution d'instabilités thermo-convectives que nous appellerons d'une manière générale 'cellules convectives'. La goutte est formée d'un cœur froid entouré par des cellules convectives. On observe que les cellules convectives évoluent de manière décroissante tout comme la puissance évaporée. Ceci peut s'expliquer par l'évolution géométrique de la goutte due aux transferts de masse provoqués par l'évaporation.

Phase 2 – Transition – Cette phase commence avec la déstabilisation du centre de la goutte et finit par la disparition de toutes instabilités. Il apparaît difficile dans cette phase de suivre précisément l'évolution du nombre de cellules.

Phase 3 – Evaporation de film – Cette dernière phase est caractérisée par une absence de cellules convectives. Le processus d'évaporation est alors principalement gouverné par la conduction. La goutte ressemble à un film.

On observe différents modes d'évaporation dans cette expérience. Durant les 40 premières secondes, l'évaporation s'effectue à surface de contact constante (la ligne de contact est accrochée) et en phase 2, la goutte réduit à angle de contact constant. La goutte s'évapore ensuite avec la diminution à la fois de l'angle de contact et de la surface de contact. Les faibles perturbations observées sur la mesure de puissance sont dues à la régulation PID.

3.2. Couplage entre la dynamique des fluides internes et les transferts

On peut noter que la puissance évaporée est directement liée à la dynamique des fluides internes à la goutte. En effet, la puissance évaporée est maximale à l'apparition des cellules convectives i.e à l'instant où le nombre de cellules convectives est aussi maximum. Ensuite, la puissance décroît suivant l'évolution des cellules de convection (réduction du nombre de cellules dans le temps jusqu'à disparition). Enfin, il existe d'une manière générale un changement de dynamique ou une rupture de pente entre les phases 1 et 3. La puissance évaporée décroît plus rapidement en phase 3, lorsque les cellules de convections ont disparu. L'échange devient alors principalement conductif. Les instabilités thermo-convectives semblent donc participer à l'augmentation de la puissance et de la même façon de la masse évaporée.

3.3. Loi d'échelle

Une campagne expérimentale a été réalisée afin de comprendre l'influence de la température du substrat et de la taille de la goutte sur l'évaporation. La dynamique de la puissance évaporée apparaît identique dans tous les cas. Cependant, on peut noter :

- à température de substrat fixé, la puissance évaporée augmente avec le diamètre. Le coefficient de transfert global apparaît donc amélioré avec la taille de la goutte.
- à taille de goutte fixée, la puissance est d'autant plus importante, que le gradient de température est accru.

Enfin, on peut observer que, pour des gouttes de taille quasi-identique, toutes les courbes de puissance divisée par le gradient de température en fonction du temps adimensionné se regroupent. La même chose est observable, à température de substrat fixée, en divisant la puissance par le diamètre de goutte. Ces résultats nous ont amené à une loi d'échelle illustrée figure 4. Le processus d'évaporation de goutte apparaît alors caractérisé par un coefficient d'échange linéique.

4. Conclusion et Perspectives

Dans ce papier, nous fournissons une revue sur les récents travaux réalisés sur l'évaporation de gouttes sessiles autant d'un point de vue expérimentale, théorique ou de simulation numérique. Nous présentons le dispositif expérimental élaboré afin de réaliser des observations thermiques. En effet, grâce à une caméra IR et une caméra visible, nous pouvons suivre respectivement l'évolution des mouvements internes à la goutte et la forme de la goutte pendant l'évaporation. Un fluxmètre placé sous la goutte permet d'analyser les transferts de chaleur entre le substrat et la goutte. Nous décrivons complètement le processus d'évaporation sur une expérience référence ce qui nous permet de montrer l'existence de plusieurs phases. Enfin, nous présentons l'influence de la taille de la goutte et de la température du substrat sur le processus d'évaporation ce qui nous a permis d'obtenir une loi d'échelle.

Références

- [1] H.Y. Erbil and R.A. Meric, Evaporation of Sessile Drops on Polymer Surfaces: Ellipsoidal Cap Geometry, *J. Phy. Chem. B*, 18(7):6867-6873 (1997).
- [2] H. Hu and R.G. Larson, Evaporation of a Sessile Droplet on a Substrate, *J. Phy. Chem. B*, 6(106):1334-1344 (2002).
- [3] C. Sotke, V.S. Ajaev and P. Stephan, Dynamics of volatile liquid droplets on heated surfaces: theory versus experiment, *J. Fluid Mech.* 610:343-362 (2008).

- [4] G.J. Dunn, S.K. Wilson, B.R. Duffy, S. David and K. Sefiane, The strong influence of substrate conductivity on droplet evaporation, *J. Fluid Mech.*, 623, 329-351 (2009).
- [5] J.J. Hegseth, N. Rashidnia and A. Chai, Natural convection in droplet evaporation, *Phys. Rev. E*, 54(2):1640-1644 (1996).
- [6] N. Zhang and D.F. Chao, A new laser shadowgraphy method for measurements of dynamic contact angle and simultaneous flow visualization in a sessile drop, *Optics & Laser Technology*, 34(3):243 - 248 (2002).
- [7] R.D. Deegan, O. Bakajin, T.F. Dupont, G. Huber, S.R. Nagel and T.A. Witten, Contact line deposits in an evaporating drop, *Phys. Rev. E*, 62(1):756- 765 (2000).
- [8] P. Tartarini et al., Dropwise cooling: Experimental tests by infrared thermography, *Appl. Therm. Eng.*, 29(7):1391-1397 (2008).
- [9] L. Tarozzi, A. Muscio and P. Tartarini, Experimental tests of dropwise cooling in infrared-transparent media, *Exp. Therm. and Fluid Sci.*, 31:857- 865 (2007).
- [10] R. Tuckermann, S. Bauerecker and H.K. Cammenga, IR-Thermography of evaporating acoustically levitated drops, *Int. J. Thermophysics*, 26(2) (2005).
- [11] E. Wulstenand and G. Lee, Surface temperature of acoustically levitated water microdroplets measured using Infrared Thermography, *Chem. Eng. Sci.*, doi: 10.1016/j.ces.2008.07.020 (2008).
- [112] R. Savino and S. Fico, Transient Marangoni convection in hanging evaporating drops, *Phys. Fluids*, 16(10):3738-3754 (2004).

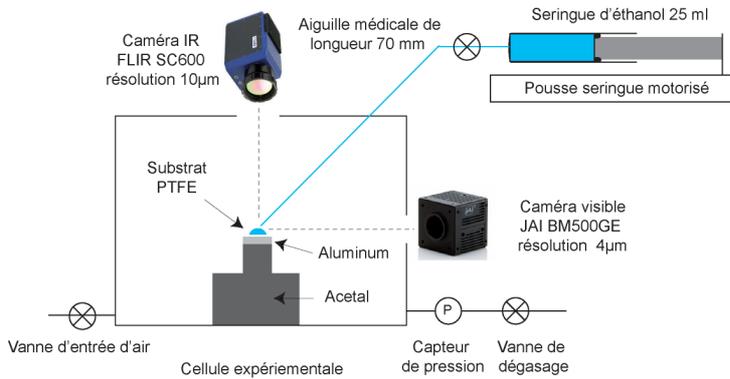


Figure 1 : Dispositif expérimental.

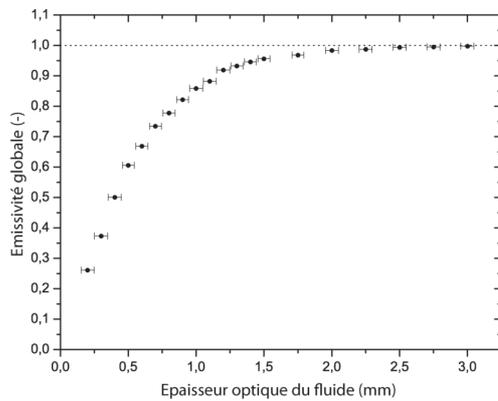


Figure 2 : Propriétés radiatives de l'éthanol entre 3 et 5 μm.

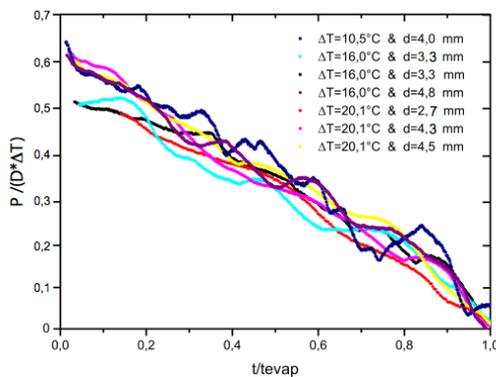


Figure 4 : Loi d'échelle sur la puissance.

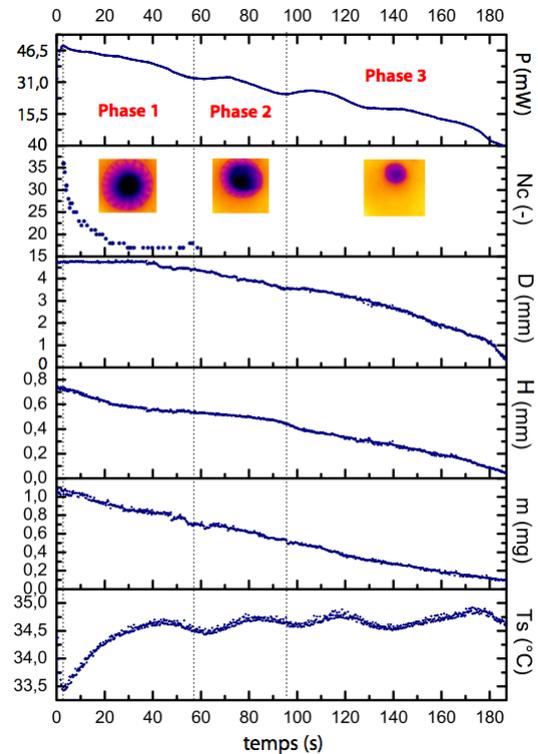


Figure 3 : Expérience référence pour une goutte d'éthanol à $T_s = 34,5^\circ\text{C}$, $[D = 4,8 \text{ mm}, H = 0,75 \text{ mm}, V = 7 \mu\text{l}, \Delta T = 16^\circ\text{C}, t_{\text{evap}} = 187 \text{ s}, \theta_L = 37,6^\circ, \theta_R = 38,3^\circ \text{ et } \theta_{YL} = 36,6^\circ$.