

Étude expérimentale de l'évaporation d'une goutte posée sur une plaque chauffante. Influence de la mouillabilité

Experimental study of the evaporation of a sessile drop on a heat wall. Wetting influence

Laura Grandas *, Christelle Reynard, Robert Santini, Lounès Tadrist

IUSTI-CNRS (UMR 6995), université de provence, technopôle Château Gombert, 5, rue Enrico Fermi, 13453 Marseille cedex 13, France

Reçu le 1^{er} avril 2004 ; reçu en forme révisée le 7 juillet 2004 ; accepté le 14 juillet 2004

Résumé

L'évaporation d'une goutte d'eau bi distillée, posée sur une surface chauffante (entre 30 et 60 °C) est étudiée expérimentalement, au moyen de deux techniques de mesure distinctes : optique et thermique. Le volume initial des gouttes varie de 5 mm³, où les forces de tension superficielle dominent, à 60 mm³ où les forces dues à la gravité sont prépondérantes.

Grâce à la première technique basée sur le traitement d'images les caractéristiques géométriques de la goutte (angle de contact, diamètres, hauteur, volume et surface) au cours du phénomène sont présentées pour deux surfaces d'essai (aluminium et PTFE (polytétrafluoroéthylène)). L'influence de la mouillabilité est alors discutée. Ensuite, la cinétique d'évaporation déduite de la mesure de volume est étudiée pour différentes conditions expérimentales dans le cas de l'aluminium. On montre que l'évaporation dépend uniquement du rayon de mouillage.

Contrairement à la première technique, la deuxième basée sur la mesure du flux thermique permet d'obtenir cette cinétique jusqu'à totale disparition de la goutte. Une étude pour différentes tailles de goutte montre que la gravité n'a pas d'influence sur les transferts de chaleur et de masse. Une comparaison des deux techniques utilisées simultanément est effectuée.

© 2004 Elsevier SAS. Tous droits réservés.

Mots-clés : Évaporation ; Goutte ; Angle de contact ; Flux thermique ; Cinétique d'évaporation

Keywords: Evaporation; Drop; Contact angle; Heat flux; Evaporation rate

1. Introduction

L'évaporation est un processus communément rencontré dans la nature et dans de nombreux procédés industriels tels que la microélectronique, la soudure, le séchage des peintures, l'optimisation des caloducs, des évaporateurs en couches minces et des technologies utilisant le changement de phase liquide vapeur. Le taux de transfert thermique pendant le processus d'évaporation est beaucoup plus grand que

celui obtenu avec des techniques traditionnelles utilisant le refroidissement sans changement de phase (liquide ou gaz). Les nombreuses études expérimentales ont démontré que le processus d'évaporation est une combinaison d'interactions entre la dynamique du liquide, les propriétés du solide et le transfert thermique [1,2]. L'évaporation d'une goutte sessile a fait l'objet de nombreux travaux théoriques [3], expérimentaux [4,5] et numériques [6]. Les travaux théoriques ont surtout porté sur le mouillage des gouttes avec des analyses du comportement d'un liquide qui s'étale [6]. D'une façon générale, les principales études traitent de gouttes de très petite taille [7,8] ou de gouttes si plates qu'elles peuvent être

* Auteur correspondant. Tél. : +33 491106895 ; fax : +33 491106969.
Adresse e-mail : laura.grandas@polytech.univ-mrs.fr (L. Grandas).

Nomenclature

D	diamètre de mouillage.....	mm
m	masse.....	mg
g	gravité.....	$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$
H	hauteur.....	mm
L_v	enthalpie de changement d'état.....	$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$
l_c	longueur capillaire	
P	puissance.....	W
r	rayon de mouillage.....	mm
T	température.....	$^{\circ}\text{C}$
S	surface du fluxmètre thermique.....	mm^2

V	volume.....	mm^3
-----	-------------	---------------

Symboles grecs

σ	tension superficielle.....	$\text{mN}\cdot\text{m}^{-1}$
θ	angle de contact.....	$^{\circ}$
ρ	masse volumique du liquide.....	$\text{kg}\cdot\text{mm}^{-3}$
ϕ	flux thermique.....	W

Indices et exposants

i	initial
p	paroi

assimilées à des films [9]. Par exemple, récemment la cinétique d'évaporation a été étudiée expérimentalement sur des gouttes de volume inférieur à $0,45 \text{ mm}^3$ pour l'eau et $2,5 \text{ mm}^3$ pour le *n*-heptane sur des surfaces d'aluminium ou de cuivre chauffées, en dessous de la température de saturation du liquide, de façon à observer et quantifier le transfert de chaleur [10]. Par ailleurs, l'évaporation d'une gouttelette d'eau avec des diamètres de 1 mm ou moins déposée sur une surface chaude isotherme, a été modélisée en supposant la ligne triple accrochée [7,8]. Ruiz et Black [8], ont considéré l'existence des mouvements thermocapillaires dans la goutte, ce qui donne une distribution d'isothermes complètement différente de celle obtenue avec seulement le transfert de chaleur par conduction. Hu et Larson [7] ont montré avec un modèle (FEM) que la cinétique d'évaporation est presque constante pendant tout le phénomène pour des gouttes posées avec un angle initial de $2\pi/9$. Dans les trois cas [7,8,10] les auteurs ont étudié les phénomènes d'évaporation pour de petites gouttes, où l'effet de pesanteur est négligeable comparé aux effets de tension superficielle. La forme de ces gouttelettes est assimilée à une calotte sphérique. Dans la pratique, cette hypothèse n'est valable que pour des gouttes de taille inférieure à une taille critique. L'aspect thermique (transfert de chaleur et de masse) du phénomène n'a jamais été vraiment abordé de manière systématique. C'est pourquoi nous étudions le phénomène d'évaporation dans le cas d'une large gamme de taille de gouttes d'eau sessiles, expérimentalement [11] et numériquement [12]. Nous avons déjà effectué des études préliminaires sur la cinétique d'évaporation sur deux surfaces à température imposée (50°C) : l'évolution de la goutte dépend du couple liquide-surface (mouillabilité) [13]. Dans ce papier notre étude porte sur l'évaporation de gouttes d'eau bi distillée, pour des volumes compris entre 5 et 60 mm^3 , posées sur deux surfaces (le PTFE et l'aluminium) maintenue à température constante entre 30 et 60°C . Pour cette gamme de volume, l'hypothèse de calotte sphérique n'est plus valable à partir de 20 mm^3 . L'objet du présent travail est d'étudier et d'analyser les phénomènes d'évaporation aussi bien sur des gouttes de grande taille où l'effet de la gravité sur la forme de la goutte n'est pas négligeable, que sur des petites gouttes où les forces

de tension superficielle sont prépondérantes. Tout d'abord, au moyen d'une analyse d'images, l'évolution temporelle des caractéristiques de la goutte (angle de contact, taille et forme : diamètres, hauteur et volume) est déterminée pour ces deux types de surfaces. Dans le cas du premier support (PTFE) l'angle de contact initial solide liquide est supérieur à 90° , la surface est dite non mouillante. Dans le cas du deuxième support (aluminium) l'angle de contact initial est inférieur à 90° , la surface est dite mouillante. Une analyse de la cinétique du phénomène est approfondie dans le cas de la surface mouillante, et sa dépendance en fonction du rayon de mouillage est montrée.

Nous présentons ensuite des résultats obtenus à partir d'une méthode thermique utilisant un fluxmètre collé sous la surface d'aluminium. Nous montrons l'évolution temporelle des transferts de chaleur au cours de l'évaporation pour différentes tailles de gouttes pour une température constante de 60°C . Nous discutons des différentes phases observées avec ce type de mesures. La cinétique d'évaporation constatée par la méthode optique est retrouvée par cette méthode. Une comparaison avec les résultats obtenus par les deux techniques montre un bon accord sur une large plage de mesures, ainsi que les limites d'utilisation de la méthode optique.

2. Dispositif expérimental

Un dispositif expérimental a été mis en œuvre afin de caractériser géométriquement la goutte durant son évaporation et d'analyser la cinétique et les transferts thermiques associés à ce phénomène. Ce dispositif, présenté ci-dessous, comprend :

- une cellule test, où est déposée la goutte, comportant une instrumentation dédiée à des mesures thermiques (température, densité de flux),
- un diagnostic optique couplant acquisition vidéo et traitement d'images en temps réel.

2.1. Cellule test et instrumentation de mesures thermiques associées

L'évaporation est étudiée, dans le cas d'une goutte d'eau posée sur une surface chauffée entourée d'une boîte ($100 \times 100 \times 120 \text{ mm}^3$). Cette boîte composée de quatre parois verticales en polyméthylméthacrylate (PMMA) est partiellement ouverte sur sa face supérieure. Cette configuration permet de travailler comme l'ont fait certains auteurs [10] à l'air libre dans des conditions ambiantes, d'isoler le phénomène d'évaporation d'éventuels courants d'air perturbateurs et de le visualiser simultanément par le côté ou par dessus. Les conditions ambiantes (température, pression, humidité)

sont surveillées et mesurées en permanence avec une station météo.

La surface chauffée se compose de trois étages (Fig. 1). Le premier étage correspond à un bloc chauffant en aluminium ($5 \times 5,5 \times 2 \text{ mm}^3$) instrumenté, à l'intérieur par deux cartouches chauffantes, et en surface par un thermocouple de type K et une sonde de platine (Pt 100). Cette dernière est couplée à un régulateur (PID) de température (UDC 1000 Honeywell®). Le signal du thermocouple de type K est enregistré au cours du temps toutes les 15 secondes avec une centrale d'acquisition HP 34970, connectée à un ordinateur.

Le second étage est un fluxmètre thermique à gradient tangentiel (CAPTEC® d'aire 100 mm^2 ; d'épaisseur $0,4 \text{ mm}$ et de sensibilité de $0,349 \mu\text{V} \cdot \text{W}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$) instrumenté en son centre par un thermocouple de type T. Cet élément a déjà été utilisé au sein de notre laboratoire pour quantifier les transferts thermiques induit par l'effet Marangoni autour d'une bulle isolée [14]. Ce capteur est collé sur le bloc chauffant avec une feuille d'aluminium adhésive double face. Les signaux délivrés en température et en densité de flux par ce dernier sont également enregistrés par la centrale.

Le dernier étage, amovible, correspond à la surface d'essai accueillant la goutte posée. Le contact entre le deuxième étage (fluxmètre) et la surface d'essai est réalisé avec une fine couche de graisse thermique (compound silicone Jelt Cm®) d'épaisseur environ $200 \mu\text{m}$ assurant un bon transfert de chaleur. La surface d'essai recouvre entièrement le fluxmètre. Deux surfaces différentes (aluminium ou PTFE) sont successivement utilisées afin de tester l'influence de la mouillabilité sur le phénomène d'évaporation. Les surfaces sont des films de $200 \mu\text{m}$ d'épaisseur pour le PTFE et $12 \mu\text{m}$ pour l'aluminium à 99,9 % de pureté. Les deux surfaces ont été caractérisées à l'aide d'un microscope à force atomique (Fig. 2). Le film de PTFE est plus rugueux ($6,03 \mu\text{m}$) que celui de l'aluminium ($1,99 \mu\text{m}$). L'anisotropie présentée par le film d'aluminium ne se traduit pas par une déformation de la goutte. Son axisymétrie a été vérifiée. Ces films sont changés à chaque expérience pour éviter le problème parti-

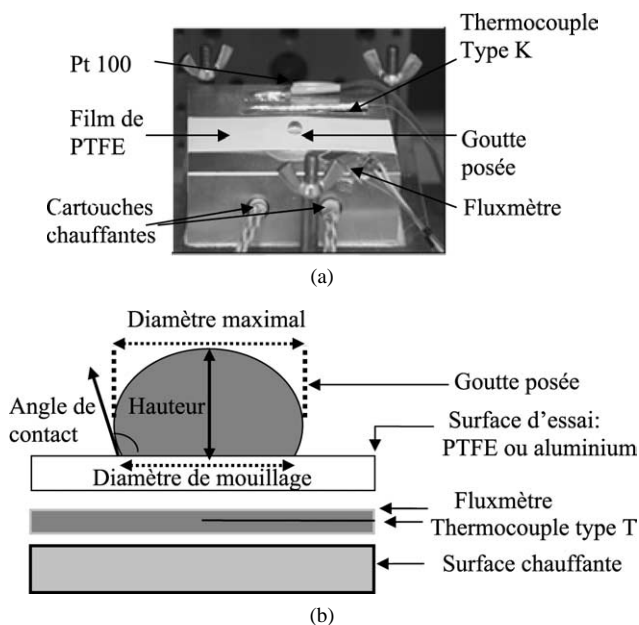


Fig. 1. (a) Photographie décrivant les éléments du bloc central, (b) schéma du bloc.

Fig. 1. (a) Photograph and description of central bloc elements, (b) schematic bloc.

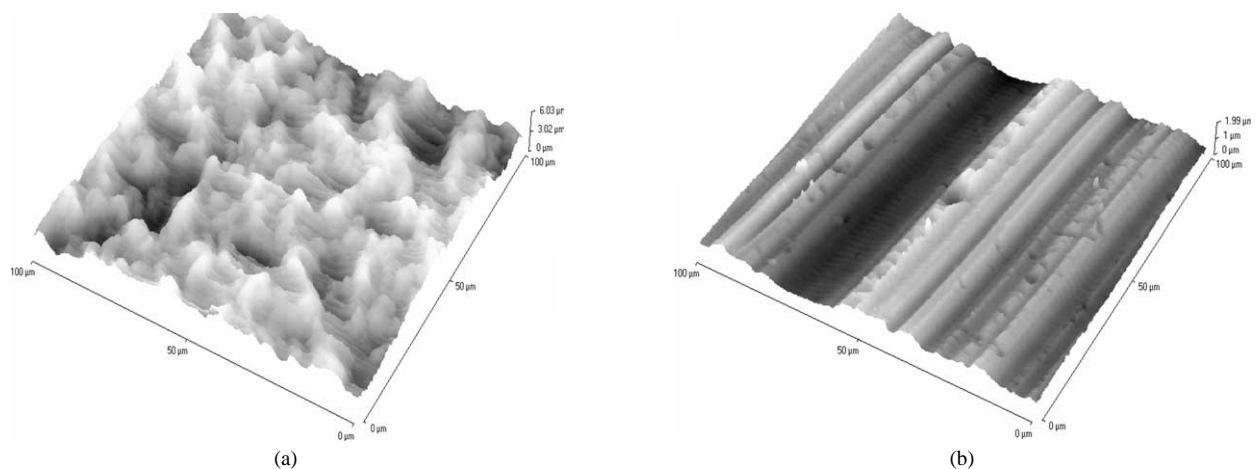


Fig. 2. Analyse au microscope AFM des surfaces utilisées : (a) PTFE, et (b) aluminium.

Fig. 2. AFM microscopy analyse of test surfaces: (a) PTFE, (b) aluminium.

culier du nettoyage et garantir la reproductibilité de l'état de surface.

2.2. Diagnostic optique

Ce diagnostic optique permet une visualisation de la goutte par côté et par dessus.

La vue de dessus sert à vérifier l'hypothèse de goutte axisymétrique au cours de l'évaporation (hypothèse réalisée dans le traitement d'images présenté ci-dessous).

Les images de la vue de côté, acquises à partir d'une chaîne classique (caméra 25 images/s + zoom macro + carte d'acquisition + lumière parallèle) sont traitées toutes les 1 seconde par un logiciel (déjà utilisé dans d'autres configurations [15]) afin de déterminer les paramètres géométriques de la goutte (angles de contact gauche et droit, hauteur, diamètre de mouillage, surface extérieure et volume) (Fig. 1(b)).

En début d'évaporation l'incertitude sur l'angle est de $\pm 0,2^\circ$; à la fin d'évaporation elle peut aller jusqu'à $\pm 1^\circ$. L'incertitude est de $\pm 0,06$ mm pour les autres paramètres, par suite de la résolution de la caméra. Ces valeurs ont été obtenues à partir d'échantillons calibrés antérieurement [15]. Les écarts observés pour les mesures des angles de contact gauche et droit, sont montrés dans le Tableau 1, pour une condition opératoire : température ambiante.

2.3. Protocole expérimental

Initialement une calibration du diagnostic optique dans le plan vertical est réalisée à l'aide d'une bille étalon de 4,72 mm de diamètre ($\pm 5 \mu\text{m}$). Ensuite la température de consigne du régulateur est fixée, et les différentes acquisitions sur la centrale de mesures sont lancées (températures, densité de flux). Lorsque la température de surface du radiateur, mesurée par le thermocouple de type *K* collé à 20 mm du centre de fluxmètre, devient constante (~ 400 s), la surface d'essai (aluminium ou PTFE) est déposée sur le fluxmètre. Lorsque l'on atteint un nouvel état stationnaire détectable par le signal du fluxmètre (100 s), une goutte d'eau est déposée sur la surface d'essai au moyen d'une seringue. Le traitement d'images est alors lancé dans une zone d'intérêt choisie à l'écran. Lorsque l'évaporation totale de la goutte d'eau est terminée (détectée par le fluxmètre), la surface d'essai est enlevée et le protocole décrit précédemment

est à nouveau appliqué afin de tester de nouvelles conditions opératoires.

3. Résultats

Nous traitons tout d'abord dans cette section des résultats obtenus au moyen du traitement d'images. Nous présentons ensuite ceux obtenus au moyen du fluxmètre thermique. Nous concluons par une comparaison des deux méthodes.

3.1. Par traitement d'images

3.1.1. Caractéristiques géométriques

Le premier paragraphe présente une série d'images décrivant le phénomène d'évaporation d'une goutte d'eau bi distillée déposée sur le PTFE ou l'aluminium. Les résultats obtenus par traitement de ce type d'images permettent de déterminer l'évolution des différentes caractéristiques géométriques au cours du temps. L'influence de la nature du couple est discutée.

Les photos de la Fig. 3 montrent l'évolution temporelle dans un plan vertical de deux gouttes posées, de même volume, sur les deux surfaces (volume initial : 54 mm^3 , température de paroi : $51,4^\circ\text{C}$). La première photo des Figs. 3(a)

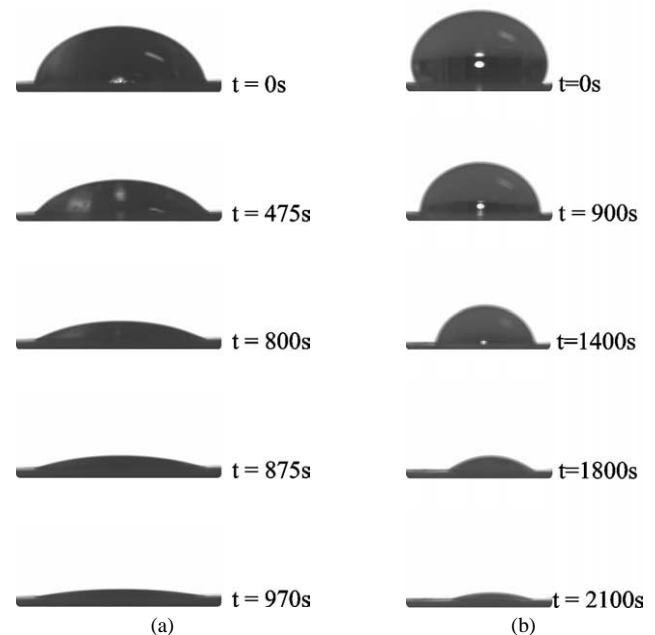


Fig. 3. Évolution de la forme d'une goutte d'eau distillée lors de l'évaporation sur : (a) l'aluminium ; et (b) le PTFE à différents temps $T_p = 51,8^\circ\text{C}$. Pour l'aluminium les pas de temps sont : 0 s ($V = 54 \text{ mm}^3$), 475 s ($V = 25 \text{ mm}^3$), 800 s ($V = 10 \text{ mm}^3$), 875 s ($V = 5 \text{ mm}^3$) et 970 s ($V = 1,5 \text{ mm}^3$). Pour le PTFE : 0 s ($V = 55 \text{ mm}^3$), 900 s ($V = 25 \text{ mm}^3$), 1400 s ($V = 11 \text{ mm}^3$), 1800 s ($V = 3,7 \text{ mm}^3$), et 2100 s ($V = 0,3 \text{ mm}^3$).

Fig. 3. Bidistilled drop shape evolution during evaporation: (a) aluminium, and (b) PTFE $T_p = 51.8^\circ\text{C}$. For the aluminium surface: 0 s ($V = 54 \text{ mm}^3$), 475 s ($V = 25 \text{ mm}^3$), 800 s ($V = 10 \text{ mm}^3$), 875 s ($V = 5 \text{ mm}^3$) and 970 s ($V = 1.5 \text{ mm}^3$). For PTFE: 0 s ($V = 55 \text{ mm}^3$), 900 s ($V = 25 \text{ mm}^3$), 1400 s ($V = 11 \text{ mm}^3$), 1800 s ($V = 3.7 \text{ mm}^3$), and 2100 s ($V = 0.3 \text{ mm}^3$).

Tableau 1

Valeurs des angles de contact initiaux, gauche et droit, pour une goutte déposée sur l'aluminium et sur le PTFE, à température ambiante. Volume initial des gouttes 55 mm^3

Table 1

Initial contact angles values, left and right, for a drop on aluminium and PTFE surfaces at ambient temperature. Drop initial volume: 55 mm^3

Surface	Angle gauche [$^\circ$]	Angle droit [$^\circ$]
Aluminium	63,14	65,32
PTFE	120,96	120,85

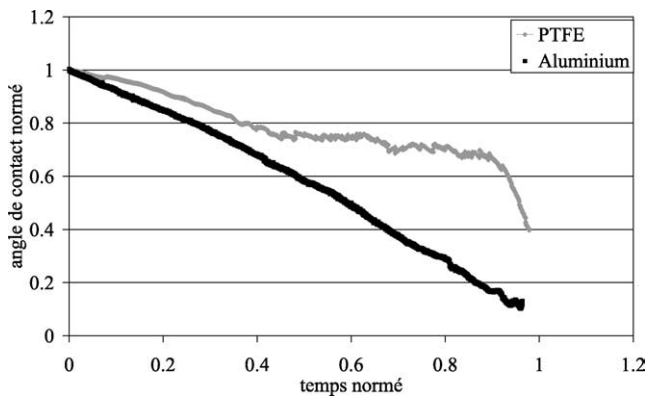


Fig. 4. Variation de l'angle de contact moyen normé pour une goutte de volume initial de 55 mm^3 sur aluminium et PTFE à température ambiante, en fonction du temps normé.

Fig. 4. Average normalised contact angle variation for an initial drop volume of 55 mm^3 on aluminium and PTFE surface at ambient temperature, versus normalized time.

et (b) correspond à l'instant initial lorsque la goutte est déposée. On constate une différence d'angle de contact : il est d'environ 70° pour l'aluminium (Fig. 3(a)) et de 120° pour le PTFE (Fig. 3(b)). On note que le diamètre de mouillage, correspondant à la ligne de contact solide–liquide–vapeur, est plus grand pour une goutte sur l'aluminium que sur le PTFE. Si l'on compare l'évolution de la goutte sur les deux surfaces, on constate une différence de comportement. Dans le cas de l'aluminium, la goutte reste accrochée pendant toute la durée du phénomène ce qui se traduit par un diamètre de mouillage constant (Fig. 3(a)). Par contre dans le cas du PTFE, la goutte reste accrochée au début de l'évaporation (les trois premières images), puis elle décroche lorsque l'angle de contact atteint une valeur proche de 90° (Fig. 3(b)).

Ce type de comportement est confirmé par le traitement d'images et retrouvé lors d'une étude systématique en fonction de la température de paroi (entre 30 et 60°C) et pour différentes tailles de goutte (entre 5 et 60 mm^3 de volume initial). Nous détaillons les caractéristiques géométriques correspondantes (angle contact, diamètre de mouillage, hauteur, volume) de la goutte pour une seule condition expérimentale (volume initial : 55 mm^3 , température de paroi : 25°C , humidité : 45%). À partir de la mesure des angles de contact droit et gauche un angle de contact moyen est défini. Ensuite chaque paramètre géométrique (angle contact, diamètre de mouillage, hauteur) est adimensionné par rapport à sa valeur initiale et est représenté en fonction d'un temps adimensionné par rapport au temps total d'évaporation (Figs. 4–6) obtenu à partir de mesures du fluxmètre thermique.

On remarque à partir de ces courbes que le phénomène d'évaporation peut être décrit suivant différentes étapes dont le nombre dépend de la nature de la surface. Il existe deux phases dans le cas de l'aluminium, et trois pour le PTFE. La première phase est identique dans les deux cas : l'angle

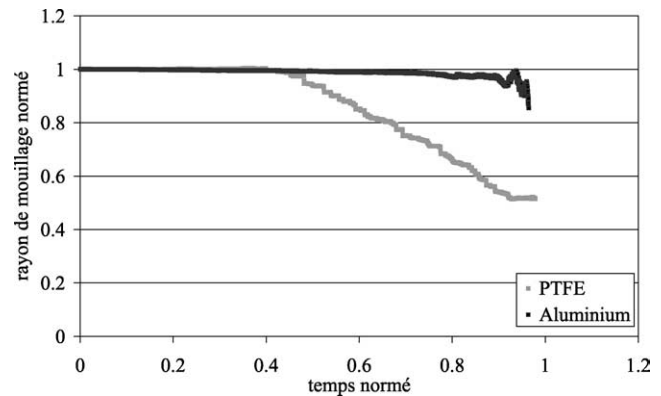


Fig. 5. Variation du rayon de mouillage normé d'une goutte sur aluminium et PTFE à température ambiante en fonction du temps normé. Volume initial de 55 mm^3 .

Fig. 5. Normalised drop diameter variation on aluminium and PTFE surface at ambient temperature versus normalized time. Drop initial volume: 55 mm^3 .

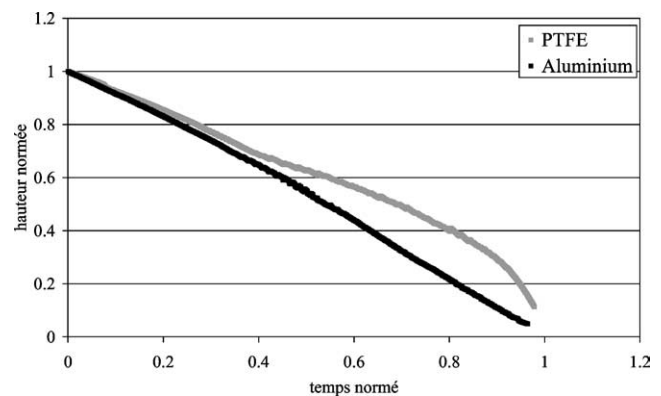


Fig. 6. Variation de la hauteur normée d'une goutte sur aluminium et PTFE à température ambiante en fonction du temps normé. Volume initial de 55 mm^3 .

Fig. 6. Normalised drop height variation on aluminium and PTFE surface at ambient temperature versus normalized time. Drop initial volume: 55 mm^3 .

de contact θ (Fig. 4) diminue et le diamètre reste constant (Fig. 5) pour les deux surfaces.

Pour l'aluminium cette phase est observée pendant la quasi totalité du phénomène d'évaporation. Le diamètre de mouillage est le diamètre maximal. Cette phase (pour l'aluminium) est suivie par une phase finale se caractérisant par la disparition des dernières traces de liquide.

Pour le PTFE, une deuxième étape apparaît à partir du « décrochage » de la goutte. Dans la Fig. 2(a), on montre une surface en PTFE, plus rugueuse que celle d'aluminium (Fig. 2(b)). Dans le cas du PTFE la rétraction n'est pas symétrique (Fig. 3(b)) à cause des inhomogénéités au niveau du substrat (la goutte reste cependant axisymétrique). Elle se traduit par un angle de contact qui reste quasiment constant, et qui correspond à la valeur de l'angle de recul, et un diamètre de mouillage qui diminue. Ces deux types de comportement se caractérisent par une évolution différente de la hauteur (Fig. 6). Le temps utilisé pour la normalisa-

tion est le temps total d'évaporation. Ces deux phases ont déjà été observées par Shanahan et Bourges [16], Bourges-Monnier et Shanahan [17], sur des gouttelettes d'eau ou de décane posées sur des surfaces en polyéthylène, en résine époxy et en PTFE. L'évaporation d'une goutte se fait soit à diamètre constant et angle variable (phase accrochée), soit à diamètre variable et angle constant (lorsque l'angle de recul est atteint). Cette deuxième phase est suivie par une phase finale semblable à celle observée pour l'aluminium et qui correspond aux dernières traces de liquide. La mesure optique n'est alors plus valable car l'hypothèse effectuée dans le traitement d'images (goutte axisymétrique) ne correspond pas à la réalité, réalité confirmée par les observations effectuées à l'aide de la caméra placée au dessus de la goutte. Ce type de comportement a été retrouvé pour toutes les tailles de goutte et les températures étudiées.

3.1.2. Cinétique d'évaporation : eau–aluminium

La cinétique d'évaporation est étudiée systématiquement dans le cas de la surface d'aluminium à la température ambiante extérieure (25 °C) pour différentes températures de plaque imposées de 30 à 60 °C, et différents volumes initiaux (entre 5 et 60 mm³), ce qui correspond à des rayons de mouillage de 1 à 4 mm.

Notre étude se situe sur un domaine plus large de températures de plaque et de volumes des gouttes que les travaux présentés dans la littérature. Par exemple l'étude de cette cinétique en fonction du rayon de mouillage faite par Deegan et al. [9] considère des gouttes d'eau d'un volume de 2 à 14 mm³ à température ambiante. Un autre étude plus récente réalisée à plus haute température (60, 80 et 95 °C) ne porte que sur des petites gouttes de 0,45 et 2,5 mm³ [10].

Contrairement à Deegan et al. [9], qui effectuent une mesure directe par pesée nous déterminons la cinétique d'évaporation à partir de la variation du volume de la goutte en fonction du temps obtenu par traitement d'images (intégration à partir du contour avec l'hypothèse d'axisymétrie). La Fig. 7 montre l'évolution temporelle du volume pour une goutte d'un volume initial de 55 mm³ déposée sur une surface d'aluminium à température ambiante. On constate que le volume dépend linéairement du temps.

Le flux de masse déterminé à partir des mesures de volume est déduit de l'équation suivante (1) :

$$\frac{dm}{dt} = \rho_{\text{eau}} \frac{dV}{dt} \quad (1)$$

où $\frac{dV}{dt}$ correspond à la pente de la droite représentant le volume en fonction du temps. Pour chaque goutte déposée, ce flux de masse est représenté en fonction du rayon de mouillage de chacune. La Fig. 8 synthétise les résultats pour différents volumes de goutte et différentes température de plaque (entre 30 et 60 °C). La représentation de cette cinétique d'évaporation montre une dépendance linéaire en fonction du rayon de mouillage de la goutte. Par conséquent, l'évaporation pour le couple étudié (eau–aluminium) semble dépendre de façon prépondérante du périmètre de mouillage,

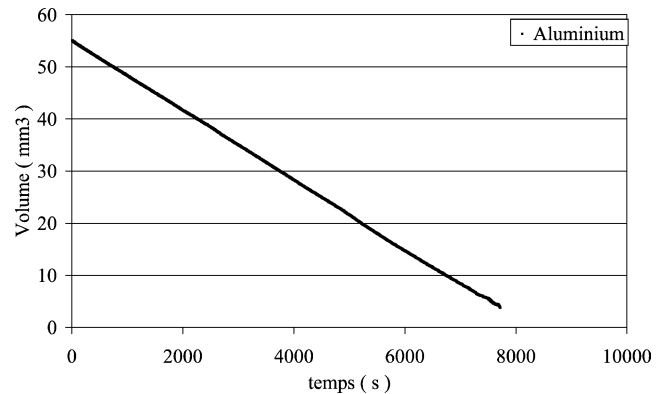


Fig. 7. Évolution temporelle du volume pour une goutte d'eau à la température ambiante sur le PTFE et sur l'aluminium.

Fig. 7. Water drop volume variation on aluminium and PTFE surface at ambient temperature.

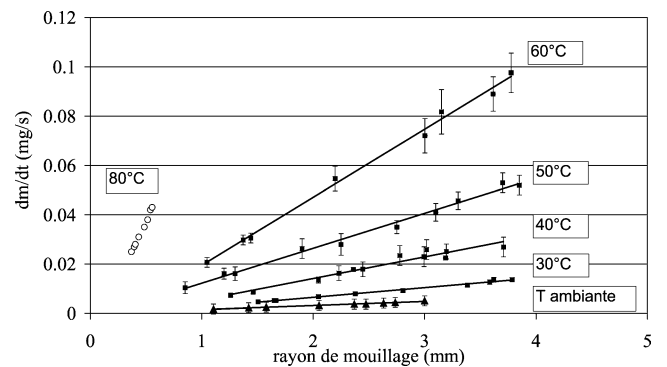


Fig. 8. Cinétique d'évaporation en fonction du rayon pour des gouttes d'eau sur l'aluminium à différentes températures de surface (30, 40, 50, 60 °C). Comparaison avec les résultats de Deegan et al. [9] et Crafton et Black [10]. ■ Nos résultats, ▲ Deegan et al., ○ Crafton et Black.

Fig. 8. Drop wetting radius vs. rate evaporation for different size drop on aluminium and temperatures (30, 40, 50, 60 °C). Comparison with Deegan et al. [9] and Crafton et Black [10] results. ■ Our results, ▲ Deegan et al., ○ Crafton et Black.

la surface extérieure de la goutte ne semble pas avoir un rôle important sur le phénomène. Ce résultat est en accord avec les mesures de Deegan et al. [9] et Crafton et Black [10] reportés sur la Fig. 8. Par ailleurs on constate que, le même comportement est observé quelque soit la valeur du rayon de mouillage (inférieur et supérieur à la longueur capillaire (Tableau 2)).

Il apparaît que l'influence de la gravité sur la cinétique d'évaporation est négligeable pour la gamme de gouttes testée.

3.2. Par des mesures thermiques : eau–aluminium

Nous détaillons dans ce paragraphe les résultats obtenus par une nouvelle méthode, utilisant un capteur spécifique (fluxmètre thermique à gradient tangentiel), permettant de connaître à chaque instant la cinétique d'évaporation.

Le signal obtenu à partir du fluxmètre pour des gouttes de différent volume (13 et 50 mm³) sur une surface d'alumi-

Tableau 2

Tension superficielle et longueur capillaire pour l'eau distillée à différentes températures

Table 2

Surface tension and capillary values for a bidistilled water drop at different temperatures

Temperature, T [°]	30	40	50	60
Tension superficielle, σ [mN·m ⁻¹]	71,2	69,6	67,9	66,2
Longueur capillaire, (mm)	2,70	2,66	2,63	2,59
$l_c = \sqrt{\frac{\sigma}{g\rho}}$				

nium à 50 °C est représenté (Fig. 9). La densité de flux est adimensionnée pour chaque expérience par la densité de flux à vide (sans goutte). On définit ainsi un gain caractérisant le transfert de chaleur.

Le début du signal correspond à un régime stationnaire sans goutte. Puis la goutte est déposée sur la surface en température. On observe alors trois étapes. La première étape est transitoire. Elle se traduit sur la courbe par une augmentation brutale de la densité de flux. Cet accroissement des transferts thermiques correspond au réchauffement de la goutte qui est initialement à la température ambiante (température inférieure à celle de la surface). La seconde étape se caractérise par un plateau horizontal de la densité de flux, ce qui correspond à une cinétique d'évaporation constante. Dans la troisième étape, la densité de flux diminue brutalement jusqu'à atteindre à nouveau la valeur initiale. Cette dernière étape correspond à l'évaporation des dernières traces de liquide présentes sur la surface et au retour au régime initial sans goutte. Contrairement aux mesures optiques, qui ne sont pas possibles jusqu'aux dernières traces de liquide, les mesures thermiques permettent le suivi du phénomène d'évaporation depuis l'instant initial jusqu'à la disparition totale du liquide. C'est d'ailleurs à partir de cette méthode que l'on peut déterminer le temps total d'évaporation utilisé pour normer les courbes précédemment présentées.

La gamme de volumes balayée correspond à des gouttes pour lesquelles soit les effets gravitationnels, soit les effets de tension superficielle, prédominent.

Quelque soit le volume initial, nous retrouvons les différentes étapes décrites précédemment (Fig. 9). Par contre il est intéressant de noter que plus le volume déposé est important plus le gain augmente. Pour les volumes testés, le gain est compris entre 12 et 25.

3.3. Comparaison des deux méthodes

Afin de comparer les deux méthodes utilisées nous déterminons à partir de la mesure du flux de masse une première puissance P_1 :

$$P_1 = \frac{dm}{dt} L_v \quad (2)$$

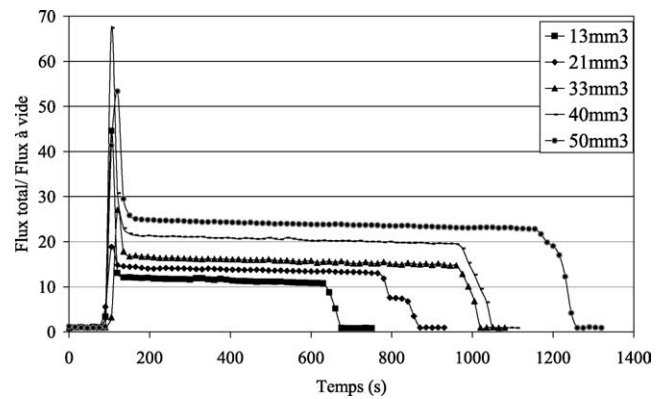


Fig. 9. Rapport du flux total avec goutte, avec le flux à vide obtenu à partir des mesures thermiques pour différentes gouttes sur l'aluminium à une température de 50 °C.

Fig. 9. Total heat flux with drop under heat flux without drop obtained from thermal measurements for different drop initial volume on aluminium surface at 50 °C.

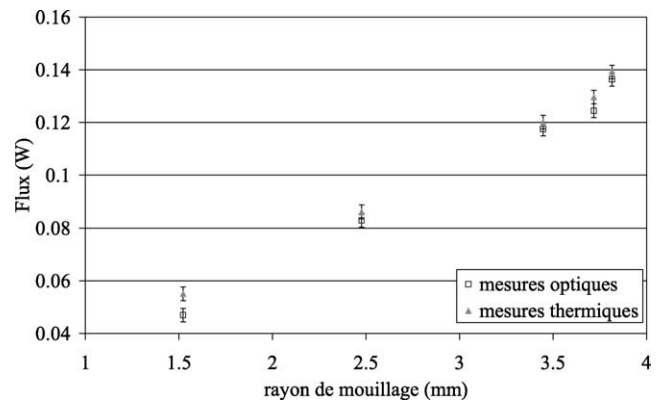


Fig. 10. Puissance mesurée par les deux méthodes (thermique et optique) en fonction du rayon de mouillage à 50 °C pour des gouttes entre 7 et 40 mm³.

Fig. 10. Thermal flux comparison from two measurements techniques vs. wetting radius at 50 °C for drop initial volume of 7 to 40 mm³.

Ensuite nous calculons à partir de la mesure de densité de flux, une moyenne dans l'étape 2 (plateau horizontal). Cette densité de flux moyenne est alors utilisée pour estimer la puissance P_2 comparative :

$$P_2 = \varphi S \quad (3)$$

La Fig. 10 montre cette comparaison des puissances pour différents volumes entre 7 et 40 mm³. En terme d'allure, on observe la même dépendance linéaire en fonction du rayon de mouillage déduite des deux méthodes. Par ailleurs les résultats sont en très bon accord pour la plage des gouttes étudiées. La densité de flux mesurée par le fluxmètre est une densité totale. En effet le fluxmètre intègre les transferts de chaleur sur sa surface totale toujours supérieure à la surface de la goutte. Il mesure donc à la fois les transferts de chaleur induits par la goutte et les transferts de chaleur par conduction/convection/rayonnement sur la surface libre du fluxmètre autour de la goutte. Ce flux parasite représente de 3 à 10 % du flux total selon la taille de la goutte. Il est d'au-

tant plus faible que la goutte est plus grosse. La méthode thermique qui permet une mesure plus complète (du début à la fin de l'évaporation) peut être utilisée directement pour définir le phénomène d'évaporation.

4. Conclusions et perspectives

L'évaporation d'une goutte d'eau bi-distillée déposée sur une surface à température imposée a été étudiée expérimentalement avec deux techniques de mesures.

La première technique basée sur l'acquisition et le traitement d'images a permis de caractériser géométriquement la goutte au cours de son évaporation dans le cas de deux surfaces (aluminium) et (PTFE). La valeur de l'angle de contact, qui traduit la mouillabilité, conditionne le comportement du phénomène. Ainsi dans le cas de la surface mouillante (aluminium), la goutte reste accrochée pendant toute l'évaporation c'est-à-dire que le diamètre de mouillage reste constant et l'angle diminue. Par contre dans le cas du PTFE, deux étapes existent. Le passage de l'une à l'autre correspond au décrochage de la ligne triple et à une évaporation à angle constant et diamètre qui diminue. Ces deux comportements ont été retrouvés pour différentes tailles de goutte et différentes températures. L'exploitation d'une caractéristique, le volume, a permis d'analyser la cinétique d'évaporation dans le cas de l'aluminium. L'étude systématique montre que le flux de masse dépend linéairement du rayon de mouillage pour les températures de paroi testées (30 à 60 °C) il semblerait que l'évaporation se produit essentiellement au niveau de la ligne de contact ou ligne triple.

Notre travail a été comparé avec ceux des autres auteurs (Fig. 8) Deegan et al. [9] et Crafton et Black [10], cette même linéarité a été montrée, mais ce deux auteurs travaillent dans de domaines de tailles très réduits.

Dans des travaux récents, Parisse et Allain [18] ont proposé une loi d'évaporation, en fonction du rayon de mouillage. Cette loi basée sur un modèle diffusif conduit à une relation faisant intervenir implicitement la surface extérieure de la goutte et explicitement un pré facteur fonction de θ . Cette approche n'est donc pas compatible avec nos résultats qui sont indépendants de ces deux paramètres.

Par ailleurs étant données les tailles de goutte testées (inférieures ou supérieures à la longueur capillaire), on constate que la gravité n'a pas une influence significative. Cette méthode ne permet pas de suivre la totalité du phénomène, en particulier lorsque la goutte se réduit à un film.

La deuxième méthode utilisant un fluxmètre thermique fournit une information à la fois sur les transferts de chaleur avant le dépôt de la goutte (régime à vide stationnaire) et sur toute la période d'évaporation de celle-ci c'est-à-dire jusqu'à sa complète disparition. On observe ainsi trois phases : le réchauffement de la goutte, l'évaporation continue, et la disparition des dernières traces. Une étude en fonction du volume initial de la goutte a permis de déterminer un gain

de transfert de chaleur par rapport à un régime sans goutte. Le gain peut atteindre 25 pour la plus grosse goutte.

Une comparaison des deux méthodes en terme de puissance dissipée montre la validité des mesures thermiques et permet de conclure que les valeurs de densité de flux mesurées par le capteur sont une représentation pertinente de la densité de flux induite par l'évaporation.

Par la suite nous déterminerons les variations de flux de masse par les deux techniques pour le couple eau—PTFE. Ceci nous permettra de mieux comprendre le phénomène d'évaporation des gouttes sessiles pour un autre type de mouillabilité. Nous déterminerons la loi de variation de la cinétique dans ce cas afin de savoir si l'évaporation se localise encore au niveau de la ligne triple. Enfin nous allons réaliser des mesures dans un autre domaine de températures se rapprochant de la température d'ébullition afin de voir si la dépendance en fonction du diamètre mouillé est conservée.

Abridged English version

Sessile bidistilled water drop evaporation on a heated surface (between 30 and 60 °C) is studied experimentally, by means of two different measurement techniques: optical and thermal. The initial drop volume varies from 5 mm³, where the forces of surface tension dominate, to 60 mm³ where the forces due to gravity are predominant.

With the first measurement technique based on the image processing the geometrical characteristics of the drop (contact angle, diameter, height, volume and surface) during the process are obtained for two test surfaces (aluminium and PTFE (polytétrafluoroéthylène)).

Each geometrical parameter is normalized with respect to its initial value and is represented according to a normalized time scaled with the total evaporation time of obtained from the fluxmeter signal (Figs. 4–6).

We notice from these curves that the evaporation phenomenon can be described as a sequence of various stages, the number of which depends on the nature of the surface. There are two stages in the case of aluminium, and three for PTFE. The first phase is identical in both cases: the contact angle θ (Fig. 4) decreases and the diameter remains constant (Fig. 5) for the two surfaces. For aluminium this phase is observed during almost the whole evaporation process. This phase (for aluminium) is followed by a final stage characterized by the disappearance of the last traces of liquid.

For a PTFE surface, a second stage appears from the depinning of the drop. It results in a contact angle which remains almost constant, and which corresponding to the value of the receding angle, and a decreasing wetting diameter. This second phase is followed by a final phase, similar to what is observed for the aluminium and which corresponds to the last traces of liquid. These two kinds of behaviors are characterized by a different height evolution (Fig. 6). These phases were already observed by Shanahan and Bourges

[16], Bourges-Monnier and Shanahan [17] on water or decane droplets deposited on polyethylene, PTFE and epoxy resin surfaces. The drop evaporation exists either with constant diameter and variable angle, or with variable diameter and constant angle.

The optical measurement is not valid during the entire evaporation process because the axisymmetry assumption considered in the image processing does not correspond to the reality. This is confirmed by the observations carried out using the camera placed at the top of the drop. Contrary to the first technique, the second method based on the heat flux measurements enables us to obtain the evolution until the total disappearance of the drop.

Fig. 7 shows the time evolution of a drop with an initial volume of 55 mm^3 , deposited on an aluminium surface at ambient temperature. It is noted that this volume depends linearly on time. Contrary to Deegan et al. [9], who have performed a direct measurement by weighting, we determine the rate of evaporation from the volume variation according to the time obtained by image processing (the integration starting from an axisymmetric drop shape).

The evaporation rate is deduced from the volume measurement, and it is displayed in Fig. 8 for different experimental conditions in the case of aluminium (from 30 to 60°C) and different initial volumes (from 5 to 60 mm^3), corresponding to a wetting radius of 1 to 4 mm. The mass rate was determined from the volume measurements and deduced from Eq. (1).

It is shown that evaporation only depends on the wetting radius of the drop. Consequently, evaporation for the studied couple (water–aluminium) seems to mainly depend on the wetting perimeter and the external surface of the drop does not seem to have a significant role on the phenomenon.

Our results were compared with the previous results (Fig. 8) by Deegan et al. [9] and Crafton and Black [10], the same linearity was shown, but these studies were performed for a smaller size range.

In addition, it is noted that for the entire wetting radius values (lower and higher than the capillary length (Table 2)), the same behavior is observed.

A study for different drop sizes shows that gravity does not have a significant influence on heat and mass transfer.

The second method, using a thermal fluxmeter, provides simultaneously information at the same time on heat transfer before the deposit of the drop and over all the period of evaporation of this one, until its complete disappearance.

The signal obtained from the fluxmeter for drops of different volume (13 and 50 mm^3) on an aluminium surface at 50°C is represented (Fig. 9). The heat flux is normalized for each experiment by the heat flux without drop. We can define a gain characterizing the heat transfer.

The beginning of the signal corresponds to a stationary mode without drop. Then the drop is deposited on the surface. Three stages are observed. The first transient stage shows an important increase in the heat flux, this increase in the thermal transfers which corresponds to the heating of

the drop is initially at the ambient temperature (temperature lower than surface one). The second stage is characterized by a constant heat flux, which corresponds to a constant evaporation rate. In the third stage, the heat flux decreases. This last stage corresponds to the evaporation of the last traces of liquid present on surface and to the return to the initial mode without drop.

The range of volumes studied corresponds to drops for which either the gravitational effects, or the effects of surface tension, are predominant. The gain could reach 25 for the largest drop.

A comparison of the two methods in term of the dissipated flux (Fig. 10) shows the validity of thermal measurements and makes it possible to conclude that the values of heat flux measured by the sensor are an appropriate representation of the heat flux induced by evaporation.

Remerciements

Nous adressons nos remerciements à E.S.A. et au C.N.E.S. pour le support financier dans le cadre du contrat européen CIMEX (Convection and Interfacial Mass Exchange). Ainsi que M. André Bois, Maître de Conférences, à l'Université de Provence, pour son assistance dans le traitement d'image.

Références

- [1] N. Zhang, W.J. Yang, Natural convection in evaporating minute drops, *Trans. ASME* 104 (1982) 656–662.
- [2] J. Rymkiewicz, Z. Zapalowicz, Analysis of the evaporation process for water droplet on flat heated surface, *Internat. Comm. Heat Mass Transfer* 20 (1993) 687–697.
- [3] V.A. Kuz, Evaporation of small drops, *J. Appl. Phys.* 10 (15) (1991) 7034–7036.
- [4] K.S. Birdi, D.T. Vu, Wettability and the evaporation rates of fluids from solids surfaces, *J. Adhes. Sci. Technol.* 7 (6) (1993) 485–493.
- [5] K.S. Birdi, D.T. Vu, A.J. Winter, A study of the evaporation rates of small water drops placed on a solid surface, *J. Phys. Chem.* 93 (1989) 3702–3703.
- [6] F. Brochard, P.G. De Gennes, Spreading laws for liquid polymer droplets: interpretation of the “foot”, *J. Phys. Lett.* 45 (1984) 597–602.
- [7] H. Hu, R.G. Larson, Evaporation of a sessile droplet on a substrate, *J. Phys. Chem. B* 106 (2002) 1334–1344.
- [8] O.E. Ruiz, W.Z. Black, Evaporation of water droplets placed on a heated horizontal surface, *J. Heat Transfer* 124 (2002) 854–863.
- [9] R.D. Deegan, O. Bakajin, T.F. Dupont, G. Huber, S.R. Nagel, T.A. Witten, Contact line deposits in an evaporating drop, *Phys. Rev. E* 62 (1) (2000) 756–765.
- [10] E.F. Crafton, W.Z. Black, Heat transfer and evaporation rates of small liquids droplets on heated horizontal surfaces, *Internat. J. Heat Mass Transfer* 47 (2003) 1187–1200.
- [11] L. Grandas, R. Santini, L. Tadrist, Heat transfer induced by evaporation of a sessile drop. Influence of wetting surface, in: M. El-Genk (Ed.), *Proceedings of Space Technology & Applications International Forum, STAIF 2004*, American Institut of Physics, EEUU, Albuquerque, New Mexico, 2004, pp. 156–163.
- [12] L. Grandas, D. Veyret, R. Santini, L. Tadrist, Heat and mass transfer of an evaporating sessile drop: An experimental and numerical investigation, in: G.P. Celata, P. Di Marco, A. Mariani, R.K. Shah

- (Eds.), *Proceedings of 3rd International Symposium on Two-Phase Flow Modelling and Experimentation*, Pisa, Italia, 22–24 September 2004.
- [13] L. Grandas, R. Santini, L. Tadrist, A. Steinchen, Étude de la cinétique d'évaporation d'une goutte sessile à partir de mesures thermiques et optiques, in : P. Marty, A. Bontemps, S. Le Person, F. Ayela (Eds.), *Proceedings of Thermique and Microtechnologies 2003*, Elsevier, Grenoble, 2003, pp. 457–462.
- [14] C. Reynard, R. Santini, L. Tadrist, Etude expérimentale des transferts de chaleur fluide-paroi induits par convection thermocapillaire : Influence du nombre de Prandtl, *C. R. Mécanique* 331 (2003) 237–244.
- [15] G. Faour, M. Grimaldi, J. Richou, A. Bois, Real time pendant drop tensiometer using image processing with interfacial area and interfacial tension control capabilities, *J. Colloid Interface Sci.* 181 (1996) 385–392.
- [16] M.E.R. Shanahan, C. Bourges, Effects of evaporation on contact angles on polymer surfaces, *Internat. J. Adhesion Adhesives* 14 (1994) 201–205.
- [17] C. Bourges-Monnier, M.E.R. Shanahan, Influence of evaporation on contact angle, *Langmuir* 11 (1995) 2820–2829.
- [18] F. Parisse, C. Allain, Drying of colloidal suspension droplets: experimental study and profile renormalization, *Langmuir* 13 (1997) 3598–3602.