

# Mesure de la température de paroi d'un tube capillaire par thermographie infrarouge: Application à l'étude de l'évaporation

F. Chauvet, P. Duru, M. Prat

Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse,  
UMR CNRS-INP/UPS No. 5502  
Allée du Professeur Camille Soula, 31400 Toulouse, France  
e-mail: [chauvet@imft.fr](mailto:chauvet@imft.fr)

**Résumé** - Le sujet de cette étude concerne l'évaporation de liquides volatils dans des tubes capillaires de section polygonale en lien avec le contexte plus général de l'étude des phénomènes d'évaporation en milieu poreux. La cinétique d'évaporation dans de tels tubes est bien plus rapide que dans des tubes de sections circulaires. Ceci s'explique par l'action de films liquides « épais » se maintenant par capillarité le long des « coins » des tubes. Nous étudions l'influence de ces films sur l'évaporation en combinant une technique de thermographie infrarouge et des visualisations par caméra CCD.

## 1. Introduction

Ce travail s'inscrit dans la problématique générale de l'étude de l'évaporation dans les milieux poreux. Ce phénomène est étudié dans notre groupe de recherche à partir de modélisations de type réseau de pores dans lesquelles l'espace des pores est vu comme un système de tubes capillaires interconnectés de diamètre hydraulique aléatoirement distribué. Nous choisissons ici d'étudier expérimentalement la « brique élémentaire » de cette représentation : un tube capillaire de section polygonale contenant un liquide volatil. Cette étude à l'échelle du pore, dans une géométrie présentant des singularités géométriques (les « coins » des tubes), est motivée notamment par la constatation suivante : il est indispensable de prendre en compte l'effet des films dans les modèles de réseaux de pores pour obtenir un bon accord avec les cinétiques d'évaporation obtenues dans les expérimentations d'évaporation sur réseaux de capillaires à section rectangulaire (micro modèles), [1]. Il est à noter également qu'à la différence du tube capillaire de section circulaire, peu de travaux de nature expérimentale ont été consacrés à l'étude de l'évaporation dans les capillaires de section polygonale.

Plus précisément, différents scénarii d'évaporation dans un tube capillaire de section carrée sont étudiés. Dans une telle géométrie, dont la taille caractéristique (diamètre du cercle inscrit) est inférieure à la longueur capillaire, des films liquides "épais" sont présents le long des coins intérieurs du tube (pourvu que le liquide soit suffisamment mouillant, c'est-à-dire lorsque son angle de mouillage est inférieur à  $45^\circ$  dans le cas d'un tube carrée, [1]). La capillarité « pompe » le fluide et le transporte, sous phase liquide, jusqu'à l'entrée du tube où a lieu le changement de phase. L'efficacité de ce transport dépend de la compétition entre les effets capillaires et les effets de la viscosité du fluide et de la gravité qui s'opposent tout deux au mouvement du fluide vers l'entrée du tube. Ces films épais ne sont pas présents dans des capillaires de section circulaire pour lesquels le transport de l'espèce volatile est uniquement assuré par la diffusion moléculaire dans la phase gazeuse (problème dit du « tube de Stefan », [2]). Il faut également noter que des films adsorbés sont également présents sur toute la surface interne d'un capillaire. Cependant, pour les échelles considérées, la conductivité

hydraulique de ce type de film est bien plus faible que celle des films épais et leur influence sur la cinétique d'évaporation est négligeable.

Dans cet article, nous présentons des résultats portant sur l'évaporation d'hexane dans un tube capillaire de section carrée, étudiée expérimentalement en utilisant une technique de visualisation par ombroscopie couplée à une technique de thermographie infrarouge. La visualisation permet de suivre l'évolution du volume de liquide contenu dans le capillaire pendant l'évaporation. La thermographie infrarouge permet de mettre en évidence l'action des films liquides et de caractériser les transferts thermiques entre le tube capillaire et son environnement. Dans la suite le dispositif expérimental est présenté, suivi par la présentation de la technique de thermographie infrarouge utilisée et nous terminons en exposant quelques résultats.

## 2. Dispositif expérimental

Nous utilisons un tube capillaire de section carrée en borosilicate. Le côté interne du tube mesure 1 mm et l'épaisseur du verre vaut 0,2 mm. L'hexane utilisé est pur à 99%. Le tube capillaire est fixé par une colle silicone à une aiguille raccordée à une seringue. La seringue est positionnée sur un pousse-seringue permettant un remplissage précis du tube. Cet ensemble est placé dans une enceinte en plexiglas qui permet de stabiliser la température de l'environnement du tube. La température de la pièce est régulée par un dispositif de climatisation. La température de l'air à l'intérieur de l'enceinte est suivie par thermocouples : elle reste constante ( $\pm 0,5^\circ\text{C}$ ) durant toute la durée de l'expérience, qui peut durer plusieurs heures. Ainsi on évite d'éventuels effets de dilatation du liquide qui pourraient fausser la valeur du taux d'évaporation mesurée. Il est possible de positionner le tube capillaire en position verticale ou horizontale pour pouvoir étudier l'influence de la gravité.

La visualisation par ombroscopie se fait en utilisant un panneau de LEDs (Phlox™) qui fournit une intensité lumineuse constante et homogène et ne dégage pas de chaleur. Les images sont acquises avec une caméra CCD (Sensicam, PCO™). Après binarisation, la position du ménisque principal (= point le plus avancé de la phase gazeuse à l'intérieur du tube) est aisément détectable et permet de remonter au taux d'évaporation.

Les mesures par thermographie infrarouge sont réalisées à l'aide d'une caméra de type Focal Plane Array (Jade MWIR, Cedip™). Sa bande spectrale de sensibilité se situe de 3,6 à 5,1  $\mu\text{m}$  et son détecteur, de 320x240 pixels, est refroidi à 79 K par un moteur Stirling. L'axe optique de la caméra infrarouge est perpendiculaire à celui de la visualisation ombroscopique. Une ouverture sur un des panneaux de l'enceinte permet de placer la caméra infrarouge en face du tube. Avec l'objectif utilisé, la résolution spatiale obtenue est de 22px/mm, ce qui permet de mesurer avec suffisamment de précision le champ de température sur la surface extérieure du tube. La face du tube imagée a été préalablement peinte avec une bombe aérosol de couleur noir mat. Les propriétés radiatives de cette couche de peinture, dans l'infra rouge, ont pu être estimées, [3] : l'émissivité vaut 0,94 et la peinture est opaque dans la bande spectrale de sensibilité de la caméra. Pour calibrer la caméra, nous disposons d'un corps noir (DCN 1000 N4, HGH™) consistant en une surface noire (émissivité de 0,98) de 100x100 mm<sup>2</sup> contrôlée en température par des éléments Peltier. Les deux caméras et le panneau de LEDs sont synchronisés grâce à un générateur de basses fréquences.

## 3. Thermographie infrarouge

Afin de pouvoir accéder de façon précise à la température de la surface externe du capillaire, les efforts ont été portés sur la détermination des bilans radiatifs entre le capillaire

et la caméra d'une part, et entre le corps noir et la caméra d'autre part (pendant la phase de calibration), en prenant en compte les effets de flux « parasites ». Si on néglige l'absorption du rayonnement par l'air, le bilan radiatif le plus général, entre le corps noir ou le capillaire et le détecteur de la caméra infra rouge s'écrit alors :

$$\Phi_m(T, T_a) = \varepsilon\phi(T) + (1 - \varepsilon)\phi(T_a) + \phi_{parasite}(T_a, T_c), \quad (1)$$

où  $\Phi_m$  est le flux reçu par le détecteur en  $W/m^2$ ,  $\phi(T)$  l'émittance du corps noir à la température de la surface considérée  $T$ ,  $\varepsilon$  l'émissivité de la surface observée,  $T_a$  et  $T_c$  respectivement la température ambiante et la température de la caméra. Dans le membre de droite de l'éq.(1), le terme  $(1 - \varepsilon)\phi(T_a)$  correspond au reflet de l'ambient sur la surface considérée. Le terme  $\phi_{parasite}(T_a, T_c)$  est la somme de flux « parasites » qui sont dus aux trois effets suivants : tout d'abord l'effet Narcisse, provoqué par le reflet du détecteur sur l'objet imagé, puis un effet d'illumination qui intervient particulièrement lorsque l'on filme un objet n'occupant qu'une faible partie du champ visualisé (ce qui est le cas lorsque l'on travaille avec un tube capillaire) et enfin un effet des flux non focalisés qui proviennent du rayonnement de « l'intérieur » de la caméra [4] (notamment le rayonnement de l'objectif, chauffé par la dissipation de la chaleur par le moteur Stirling, sur le détecteur).

Il est important de noter que l'amplitude de ces flux parasites ne dépend pas de la température  $T$  de l'objet imagé mais seulement de la température ambiante et de la température de la caméra. Par ailleurs, l'amplitude relative de ces différents effets dépend de l'objet visualisé. Lorsqu'il s'agit du corps noir, les effets Narcisse et d'illumination sont négligeables. Lorsque l'on filme un tube capillaire, les trois effets sont à prendre en compte. Quoiqu'il en soit, la caméra répond de manière linéaire au flux de rayonnement  $\Phi_m$  :

$$DL_m(T, T_a) = \alpha \Phi_m + \beta, \quad (2)$$

où  $DL_m(T, T_a)$  est le flux reçu par le détecteur exprimé en niveau numérique (« Digital Level »). Le bilan radiatif entre le détecteur et le corps noir, en terme de niveaux numériques, peut donc s'écrire :

$$DL_m(T_{CN}, T_a) = \varepsilon_{CN} DL^0(T_{CN}, T_a) + (1 - \varepsilon_{CN}) DL^0(T_a, T_a), \quad (3)$$

$$\text{avec } DL^0(T_{CN}, T_a) = \alpha(\phi(T_{CN}) + \phi_{par,cal}(T_c)) + \beta, \quad (4)$$

ici,  $DL^0(T_{CN}, T_a)$  est l'émittance « technique » du corps noir à  $T_{CN}$ , sous une température ambiante  $T_a$  et avec une température de caméra  $T_c$  : le flux parasite  $\phi_{par,cal}$  dû aux flux non focalisés qui dépend uniquement de  $T_c$  est inclus dans cette loi d'émittance. Le bilan radiatif entre le capillaire et le détecteur, en terme de niveaux numériques, s'écrit :

$$DL_m(T, T_a) = \varepsilon DL^0(T, T_a) + (1 - \varepsilon) DL^0(T_a, T_a) + DL_{par,tube}(T_a, T_c), \quad (5)$$

où  $DL_{par,tube}(T_a, T_c)$  est la somme des flux parasites supplémentaires qui apparaissent quand le tube est filmé (Figure 1), en l'occurrence l'effet d'illumination et l'effet Narcisse. Il est donc important de pouvoir quantifier ces flux parasites pour évaluer correctement la température.

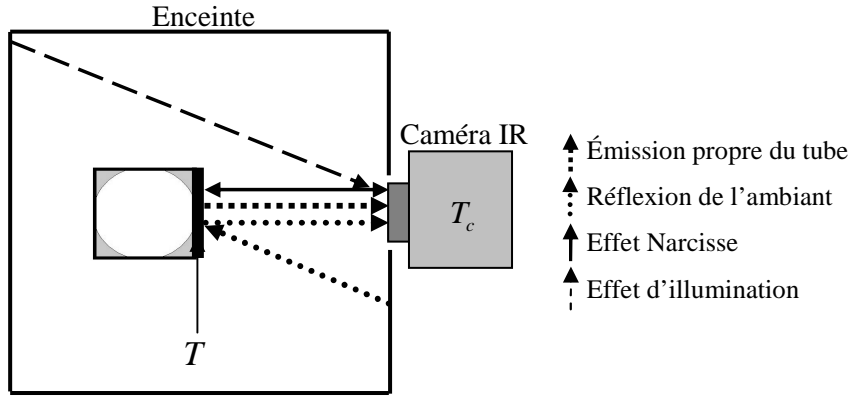


Figure 1 : Représentation des flux mesurés par la caméra infra rouge

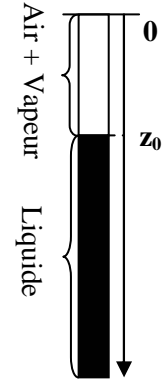


Figure 2 : Repère utilisé

De manière concrète, on procède comme suit. Une fois la caméra stabilisée en température (i.e.  $T_c$  a atteint une valeur constante), la caméra est calibrée afin de déterminer la loi d'émittance du corps noir en fonction de la température. La fonction  $DL_m(T, T_a) = f(T)$  est calculable si la contribution des flux parasites est mesurée. Pour ce faire, nous utilisons une mesure à  $T_a$  (mesure sur tube vide à température ambiante) pour laquelle le bilan (5) devient :

$$DL_m(T_a, T_a) = DL^0(T_a, T_a) + DL_{par, tube}(T_a, T_c). \quad (6)$$

D'après cette expression  $DL_{par, tube}(T_a, T_c)$  est donc donné par la « différence » entre l'image mesurée à  $T_a$  et la valeur de la loi de calibration à  $T_a$ . D'où :

$$DL_m(T, T_a) = \varepsilon(DL^0(T, T_a) - DL^0(T_a, T_a)) + DL_m(T_a, T_a). \quad (7)$$

Nos expériences montrent que la prise en compte ou non de ces effets parasites modifient la température mesurée d'environ quelques dixièmes de degrés, ce qui est relativement faible mais pourrait être important à prendre en compte dans la perspective de comparaisons avec des modèles permettant la prédiction de l'évolution de la température du tube.

## 4. Résultats

L'évolution de la position du ménisque principal  $z_0$  (Figure 2) en fonction du temps est reportée sur la Figure 3. Nous observons que lorsque le tube de section carrée est positionné horizontalement, la position du ménisque principal évolue linéairement avec le temps, le taux d'évaporation, proportionnel à  $dz_0/dt$ , est constant. Quand il est positionné verticalement, la cinétique est, au début, aussi rapide que dans le cas horizontal et ensuite, à partir de  $z_0 = 18$  mm, le taux d'évaporation décroît sensiblement. Nous avons également tracé la loi de Stefan qui prévoit la cinétique d'évaporation dans un capillaire de section circulaire. Il apparaît clairement ici que la présence des films liquides accélère considérablement la cinétique d'évaporation.

La thermographie permet d'accéder au profil de température le long du capillaire et de connaître la valeur et la position du minimum de température qui correspond à la zone où le changement de phase est le plus intense. Sur la Figure 4, la position de ce minimum est tracée

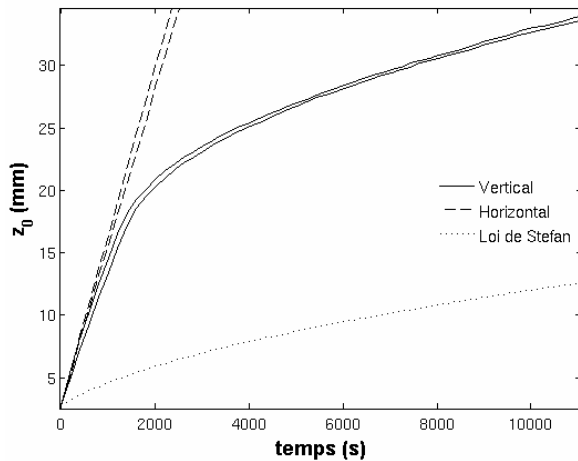


Figure 3 : Position du ménisque principal en fonction du temps. Deux expériences pour chaque cas. Lignes pleines : cas vertical, tirets : cas horizontal, pointillés : loi de Stefan appliquée à l'hexane.

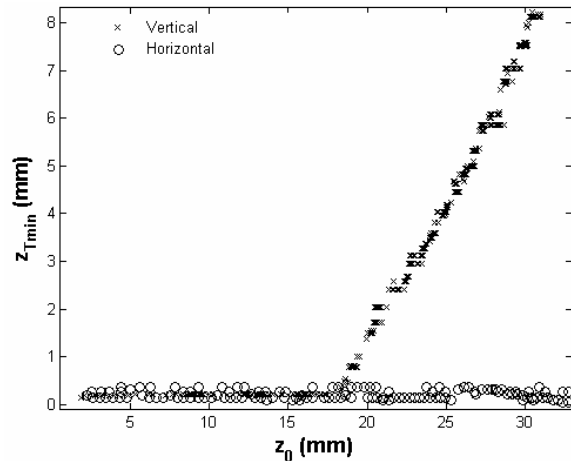


Figure 4 : Position du minimum de température le long du capillaire en fonction de la position du ménisque principal. Deux expériences pour chaque cas. Croix : cas vertical, ronds : cas horizontal.

en fonction de la position du ménisque principal. Dans le cas vertical, un net changement de pente est visible : quand  $z_0 < 18$  mm la position du minimum de température est stationnaire, et localisée en sommet de tube  $z = 0$  puis quand  $z_0 > 18$  mm la position du minimum de température évolue linéairement avec la position du ménisque principal. Dans le cas horizontal, la position du minimum de température reste constante et située proche du sommet du tube. On remarque que quelque soit l'orientation du capillaire, le ménisque principal n'est jamais le siège du changement de phase, ce qui diffère du cas du capillaire de section circulaire. Le changement de phase s'effectue en fait au niveau du sommet des films. Ces résultats illustrent les effets remarquables associés aux films liquides de coin en termes de localisation du changement de phase et montrent une phénoménologie et des lois d'évaporation très différentes du cas d'un tube de section circulaire.

Sur la Figure 5, la valeur minimale de la température de paroi du tube est tracée en fonction de la position du ménisque principal. Dans le cas vertical, la courbe comporte un point d'inflexion pour  $z_0 = 18$  mm : Quand  $z_0 < 18$  mm le refroidissement est important. Il diminue progressivement pour  $z_0 > 18$  mm. Pour le cas horizontal, le minimum de température reste constant,  $T_{\min} \approx 17,5^\circ\text{C}$ , cette valeur correspond d'ailleurs à celle mesurée en début d'évaporation dans le cas vertical. Ces observations nous montrent, en premier lieu, que les informations fournies par la visualisation ombroscopique et par la thermographie sont cohérentes : fort refroidissement quand l'évaporation est rapide, faible refroidissement quand l'évaporation est lente.

Dans le cas vertical, nous expliquons le changement de pente observé sur la Figure 4 et le point d'inflexion observé sur la Figure 5 comme étant dus à un « décrochage » des films. En effet, dans le cas vertical, la gravité engendre un gradient de pression hydrostatique dans les films liquides. Il existe donc, compte tenu de la loi de Laplace, un gradient de rayon de courbure selon la direction  $z$ , les films « s'amincissent », tout en diminuant ainsi leur potentiel de transport (diminution de la section de passage). A partir d'une longueur de doigt liquide critique (environ 18 mm dans cette expérience), l'épaisseur des films liquides en sommet de tube est trop faible pour permettre un « pompage » de liquide suffisant afin de maintenir les films accrochés en sommet de tube, ils décrochent. Ce décrochage freine alors l'évaporation, voir Figure 3. Il est à noter que la mesure de cette longueur de doigt critique

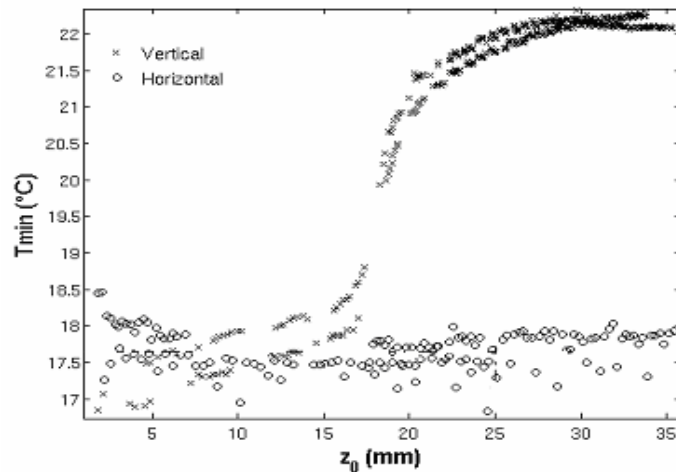


Figure 5 : Valeur minimale de la température le long du capillaire en fonction de la position du ménisque principal. Deux expériences pour chaque cas. Croix : cas vertical, ronds : cas horizontal. Incertitude :  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$

est très reproductible. A contrario quand la gravité est négligeable (tube horizontal), seul les effets visqueux peuvent freiner le transport et contribuer à l'amincissement du film. Ici nous n'observons pas de ralentissement, la longueur de développement des films de coin n'est en fait pas suffisante pour voir apparaître l'impact des effets visqueux (ceux-ci seraient observables pour un tube plus long ou de diamètre hydraulique plus faible).

## 5. Conclusion

L'évaporation d'hexane dans un capillaire de section carrée a été étudiée expérimentalement. La technique de thermographie infrarouge mise en oeuvre, couplée à la visualisation par ombroscopie, a permis de mettre en évidence l'impact des films liquides épais sur la cinétique d'évaporation ainsi que l'influence de la gravité sur le transport engendré par ces films. Quand le capillaire est orienté horizontalement (gravité négligeable), le taux d'évaporation est constant et les films s'étendent du ménisque principal jusqu'au sommet du tube. Quand il est orienté verticalement, à partir d'une longueur de films liquides de coin critique, l'évaporation est fortement ralentie. Nous expliquons ce changement de régime par l'amincissement des films induit pas les effets de gravité en accord avec des analyses théoriques précédentes, [5].

**Remerciements :** Nous remercions Sébastien CAZIN pour ses conseils concernant la technique de thermographie infrarouge. Cette étude a bénéficié du soutien du GIP ANR : (project ANR-06-BLAN-0119-01 « Intensifilm »).

## Références

- [1] M. Prat, On the influence of pore shape, contact angle and film flows on drying of capillary porous media, *Int. J. Heat and Mass Transfer.*, 50, 1455-1468, 2007.
- [2] R.B. Bird, W. Stewart, E.N. Lightfoot, *Transport Phenomena*, Wiley, NY, USA, 1960.
- [3] N. S. Kim, Analyse expérimentale d'un jet turbulent impactant sur une plaque plane et sur un obstacle de section carré, Ph.D. Université Paul Sabatier, 2005.
- [4] N. Horny, FPA camera standardisation, *Infrared Physics & Technology*, 44 (2), 10-119, 2003.
- [5] T. Coquard, B. Camassel, M. Prat, Evaporation in capillary tubes of square cross section, in: *Proceedings of HT2005, 2005 Summer ASME Heat Transfer Conference, San Francisco, CA, USA, 17-22 July 2005.*