

# Etude du coefficient d'échange et méthodes de mesure en ébullition dans les micro-canaux

Nadia CANEY\*, Francesc MADRID, Philippe MARTY

\*(auteur correspondant : [nadia.caney@cea.fr](mailto:nadia.caney@cea.fr))

LEGI-GREThE, CEA Grenoble  
17, rue des martyrs – 38054 Grenoble Cedex 9

**Résumé** - Ce travail expérimental a pour objectif d'étudier un fluide en ébullition dans un réseau de mini-canaux identiques et parallèles. Le dispositif expérimental muni d'une section d'essais instrumentée en thermocouples de paroi et en capteurs de pression permet ainsi de connaître l'évolution locale du coefficient d'échange en fonction du titre local. Les analyses des mesures thermiques ont montré que la chute brutale du coefficient d'échange, caractéristique du phénomène d'assèchement se produit pour une valeur constante de la vitesse superficielle. Les résultats obtenus sont comparés aux études thermiques les plus récentes dans les mini-canaux, publiées dans les conférences et journaux internationaux.

## Nomenclature

$J$	vitesse superficielle, $m.s^{-1}$		
$\dot{m}$	débit massique, $kg.s^{-1}$	$h, \alpha$	coefficient d'échange, $W.m^{-2}.K^{-1}$
$S$	section de passage, $m^2$	$\rho$	masse volumique, $kg.m^{-3}$
$x$	titre massique		Indices et exposants
$T$	température, $K$	$L, V$	liquide, vapeur

## 1. Présentation des outils expérimentaux

### 1.1. Le dispositif expérimental

Les éléments suivants composent le circuit principal du dispositif expérimental (cf. figure 1) : la section d'essais, un débitmètre massique Coriolis de gamme 0-160 kg/h, deux résistances électriques montées en parallèle enroulées autour d'un tube inox qui préchauffent le fluide à la température désirée, un réservoir condenseur et un échangeur à contre-courant chargé de sous refroidir le liquide en entrée de la pompe.

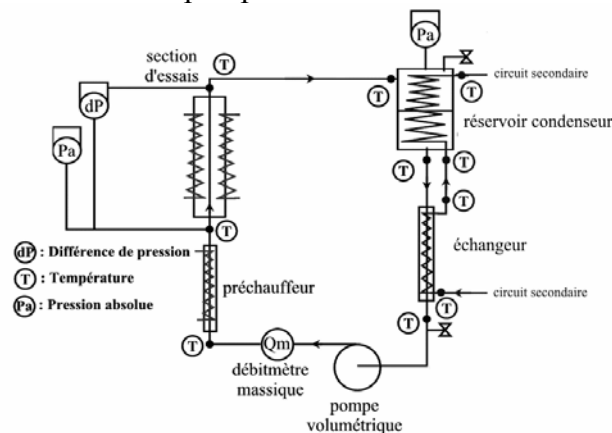


Figure 1 : Schéma de principe simplifié du banc d'essais

La section d'essais est composée de 40 canaux parallèles de diamètre hydraulique 0,8 mm. Le chauffage du fluide est assuré par un film chauffant. Le titre à l'entrée des canaux est

déterminé à l'aide d'un bilan thermique sur le préchauffeur : les valeurs locales de titre et de température le long du canal sont ainsi déduites en supposant le flux homogène sur toute la plaque ; cette hypothèse a été étayée par des mesures de caméra infrarouge.

## 2. Résultats

Afin d'étudier localement le coefficient d'échange en fonction du titre massique les essais ont été effectués à titre imposé en entrée de section d'essais (cf. figure 2). En considérant le canal central, les 5 mesures locales de température permettent de calculer 5 valeurs du coefficient d'échange local sur un intervalle de titre de 0,2 pour différents flux et vitesses massiques. Nous observons une chute brutale du coefficient d'échange qui est caractéristique du phénomène d'assèchement. Ce phénomène semble dépendre du titre et de la vitesse massique. Afin de le caractériser, introduisons la vitesse superficielle définie comme la somme des vitesses superficielles des deux phases soit :

$$J = J_v + J_L = \frac{\dot{m} x}{S \rho_v} + \frac{\dot{m}(1-x)}{S \rho_L} \quad (1)$$

Lorsque le coefficient d'échange est tracé en fonction de cette vitesse, les valeurs des différentes expériences se regroupent (cf. figure 3). De plus, l'assèchement correspondant à la chute du coefficient d'échange se produit maintenant pour une vitesse  $J$  comprise entre 7 et 8  $\text{m.s}^{-1}$ . Il est ainsi possible de distinguer trois zones dans l'évolution du coefficient d'échange :

- Pour des faibles titres, le coefficient d'échange est stable (ébullition nucléée).
- A partir d'une certaine vitesse (environ 5  $\text{m.s}^{-1}$ ), le coefficient d'échange augmente. Cela peut s'expliquer comme le début de la transition vers l'écoulement annulaire. En effet, les bulles ont atteint une certaine taille et commencent à coalescer entre elles pour former des bouchons de plus en plus gros. Il y a alors apparition d'un film liquide en paroi dont l'épaisseur va diminuer progressivement, c'est le régime d'ébullition convective.
- Enfin, à partir d'une certaine valeur de la vitesse, le film liquide ne peut plus se maintenir en paroi. La vitesse de la vapeur vient alors arracher le liquide ce qui a pour conséquence de faire chuter brutalement le coefficient d'échange, cela pour  $J = 7$  à 8  $\text{m.s}^{-1}$ .

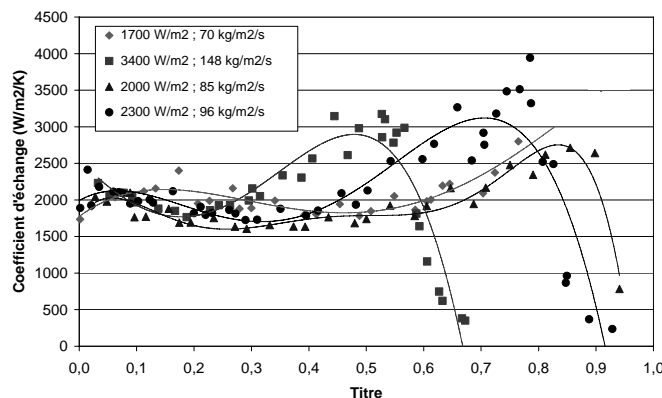


Figure 2 : Analyse du coefficient d'échange en fonction du titre local

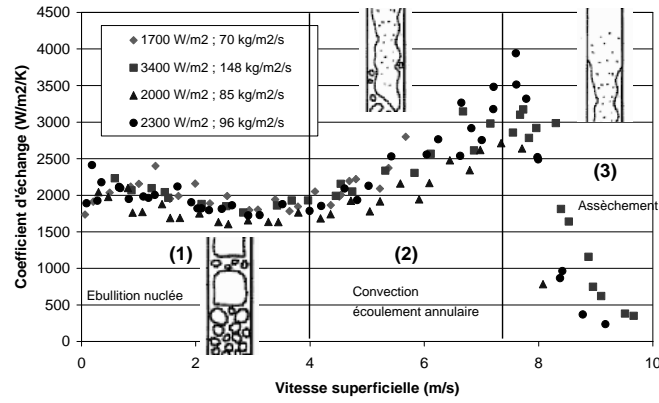


Figure 3 : Analyse locale du coefficient d'échange en fonction de la vitesse superficielle

### 3. Contexte international actuel

Les résultats obtenus dans le cadre de cette étude ont montré une évolution de la thermique dépendant des configurations d'écoulement et de l'évolution du titre. Les études les plus récentes tentent aussi par les moyens de la mesure et/ou de la visualisation de caractériser l'échange thermique dans les mini-canaux.

Les résultats de l'étude de Ohta [1] montrent l'évolution du coefficient d'échange local en fonction du titre pour des flux compris entre 2 et 24 kW/m<sup>2</sup>s et des débits variant entre 100 et 400 kg/m<sup>2</sup>s à pression atmosphérique avec du FC72. La section d'essais est composée d'un unique canal horizontal en acier inoxydable de diamètre hydraulique de 0,51 mm et de 200 mm de longueur. La section d'essais est chauffée par effet Joule et isolée thermiquement dans une enceinte à vide.

Pendant l'ébullition l'évolution du coefficient d'échange est divisée en trois zones en fonction du titre (cf. figure 4), comme dans notre étude. A bas titre, il y a prédominance de l'ébullition nucléée. Pour les titres moyens, le transfert thermique s'effectue par convection forcée. Pour les forts titres, une chute du coefficient d'échange est observée : cette chute est interprétée comme l'apparition de zones d'assèchement entre deux bouchons.

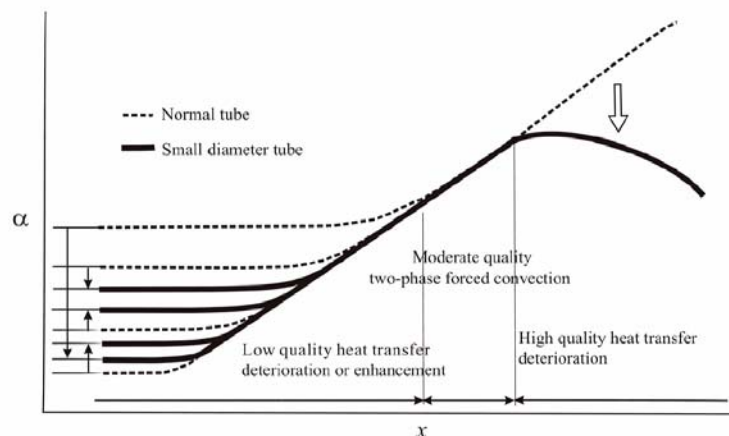


Figure 4 : Interprétation des résultats de Ohta [1]

Cortina [2] présente l'étude de deux fluides, l'hexane et l'octane. La section d'essais à monocanal rectangulaire de 0,3 mm × 12,7 mm est fabriquée en un alliage de nickel

(Iconel600). L'écoulement circule verticalement et est chauffé électriquement. La température en paroi est mesurée par thermographie infrarouge. La surface externe est couverte d'une couche noire à grande émissivité. Malgré le comportement souvent oscillant de cette température, une valeur moyenne est utilisée pour le calcul du coefficient d'échange thermique. La température du fluide est calculée à l'aide d'un bilan énergétique entre l'entrée et le point d'établissement de l'ébullition. Au-delà elle est fixée à la température de saturation du fluide.

L'auteur mesure le coefficient d'échange thermique pour des flux allant jusqu'à  $150 \text{ kW/m}^2$  et des débits variant entre  $40$  et  $400 \text{ kg/m}^2\text{s}$ . Le coefficient d'échange thermique décroît rapidement dès le début de l'ébullition pour les deux fluides. L'auteur observe aussi la présence de l'assèchement, (cf. figure 5). Un comportement très similaire a celui obtenu dans notre étude est observé pour l'octane a  $100 \text{ kg/m}^2\text{s}$ .

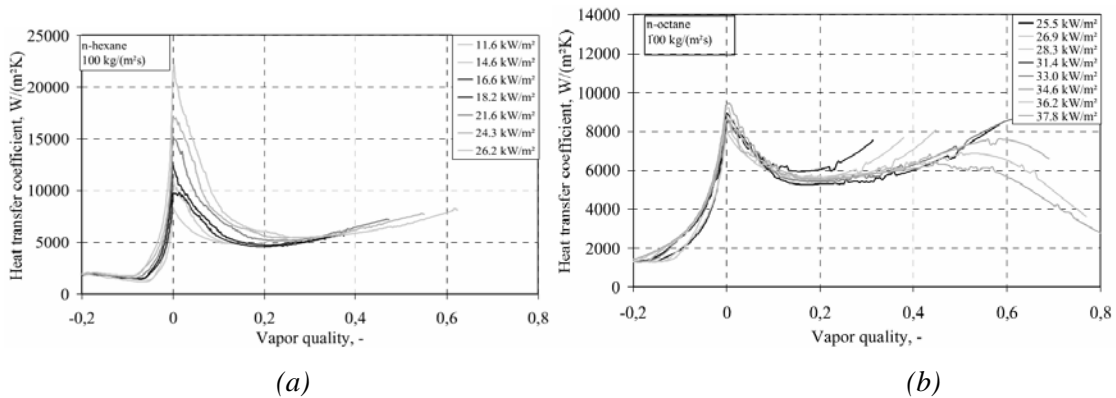


Figure 5 : Résultats obtenus par Cortina [2], (a) n-hexane, (b) n-pentane

Pamitran [3] réalise des mesures avec les fluides suivants : R-407C, R410A, R-22 et CO<sub>2</sub>. La section d'essais est un canal unique horizontal en acier inoxydable. Les flux varient entre  $5 \text{ kW/m}^2$  et  $20 \text{ kW/m}^2$  et les débits massiques entre  $200$  et  $600 \text{ kg/m}^2\text{s}$ . Deux types de diamètres sont testés,  $1,5 \text{ mm}$  et  $2,0 \text{ mm}$  avec des longueurs chauffées de  $1,5$ ,  $2,0$  et  $3,0 \text{ m}$ . La section d'essais est chauffée directement par effet joule, le titre à l'entrée est imposé par un préchauffeur et la mesure de la température est faite avec des thermocouples en partie supérieure et inférieure, et sur chaque côté de la section à intervalles de  $100 \text{ mm}$ . La pression permettant le calcul de la température de saturation est mesurée à différents points de la section. Les résultats obtenus sont de nouveau similaires aux tendances typiques observées dans la littérature (cf. figure 6), bien que la section d'essais soit constituée d'un monocal horizontal.

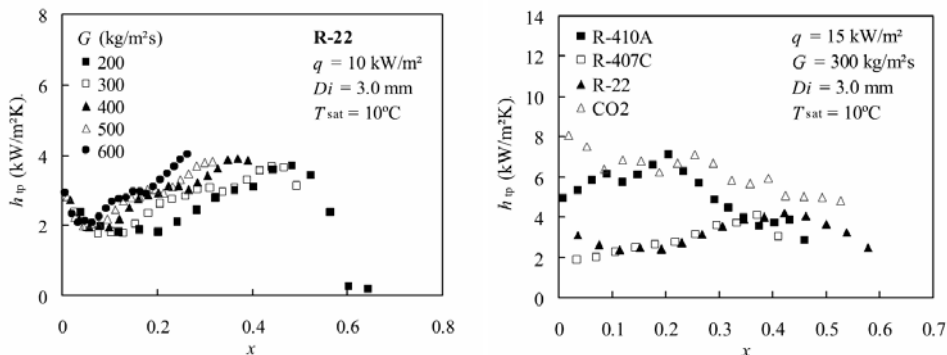


Figure 6 : Résultats de Pamitran [3]

D'autres auteurs associent la visualisation à leurs mesures thermiques. Yen [4] propose une expérience de visualisation d'un écoulement diphasique horizontal et de mesure simultanée du coefficient d'échange thermique local dans un micro canal. Plusieurs sections d'essais monocanal en pyrex ont été testées : un canal circulaire ( $D_h=210\mu\text{m}$ ) et un canal carré ( $D_h=214\mu\text{m}$ ), tous deux de 10 cm de longueur. Le fluide utilisé est le HCFC123, et la plage de débits massiques varie de  $100\text{ kg/m}^2\text{s}$  à  $800\text{ kg/m}^2\text{s}$ . Un film semi transparent d'ITO/Ag (100nm) déposé sur le diamètre externe produit de la chaleur par effet joule. Des thermocouples effectuent la mesure la température en paroi. Les écoulements sont visualisés à l'aide d'une camera rapide.

Au début de l'ébullition et à bas titre, les coins du canal carré sont en fait des cavités de nucléation, comme le montre la figure 7(a). Par conséquent, les coefficients d'échange sont plus élevés que dans le canal circulaire. A l'aide de la visualisation, il a été possible de quantifier avec précision la transition entre ébullition nucléée et convective (cf. figure 8) pour un titre de 0,4. Dans cette région le coefficient d'échange est indépendant du flux. Les auteurs ont aussi observé le début de l'assèchement. Les deux sortes de canaux présentent différentes modes d'assèchement. Dans le canal carré les coins capturent le film liquide en empêchant l'assèchement total, tandis que pour le canal circulaire, le film se rassemble en petites gouttelettes qui sont facilement entraînées ou arrachées. Il est aussi décrit comment l'allongement des bouchons peut inverser le sens de l'écoulement et provoquer des larges fluctuations de la pression. Des variations périodiques des configurations de l'écoulement ont été observées.

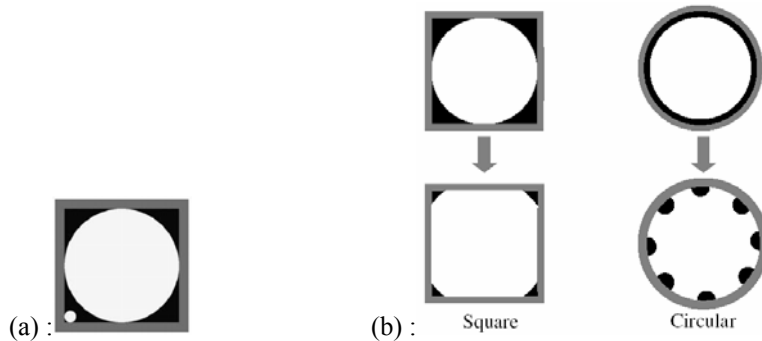


Figure 7 : (a) : Nucléation au coin du canal carré, (b) : Déclenchement de l'Assèchement, Yen [4]

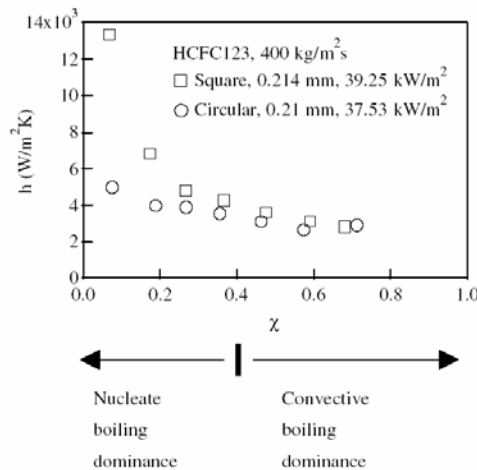


Figure 8 : Détermination des régimes d'ébullition en fonction du titre, Yen [4]

D'autres auteurs comme Owhaib [5] ont étudié par les mêmes techniques un canal de 1,33 mm de diamètre. L'objectif était d'observer la configuration des écoulements à titres élevés et l'assèchement du film liquide. Douze thermocouples collées sur la section d'essais et isolés électriquement de la couche conductrice permettent la mesure de la température de paroi. Toute la section d'essais est placée dans un tube en verre à vide afin de l'isoler thermiquement. Les expériences ont été menées avec du R134a, pour des flux variant entre 5 kW/m<sup>2</sup> et 13,6 kW/m<sup>2</sup> pour un débit de 47,4 kg/m<sup>2</sup>s et des flux variant entre 20 et 32,4 kW/m<sup>2</sup>. Les visualisations ont été enregistrées à l'aide d'une camera rapide. Les résultats montrent que pour de faibles débits, lors de l'assèchement, l'emplacement du front liquide fluctue. Des vagues montent sur les parois du canal. Entre elles, le film liquide s'évapore doucement sans se casser. A haut débit, il est observé que le film liquide ne tient pas sur la paroi. Il se casse en plusieurs coulées avec des zones sèches entre elles.

#### 4. Conclusion

Concernant l'aspect thermique, le paramètre important pour le dimensionnement se révèle être la vitesse superficielle. Trois zones d'échange thermique ont pu être identifiées en fonction de ce paramètre. La première pour des vitesses inférieures à 5 m.s<sup>-1</sup>, où le coefficient d'échange varie peu. Une seconde pour des vitesses comprises entre 5 et 8 m.s<sup>-1</sup> où l'écoulement devient annulaire et le coefficient d'échange augmente avec la vitesse et qui correspond à une zone d'ébullition convective. Enfin une troisième zone de démarrage d'assèchement pour des vitesses supérieures à 8 m.s<sup>-1</sup> où le coefficient d'échange chute brutalement. Les résultats les plus récents dans les mini et micro-canaux sont en accord avec cette évolution du coefficient d'échange en trois zones distinctes. De plus, certaines études en visualisation ont permis d'identifier clairement les transitions entre les deux zones d'ébullition nucléées et convectives. Concernant l'apparition de la zone d'assèchement, elle est plus difficile à caractériser mais certains auteurs ont réussi à montrer qu'elle dépend fortement de la géométrie. Aucune étude n'a mis encore en évidence l'influence à la fois de la structure de la paroi, de la géométrie et de la nature du fluide ce qui laisse envisager d'importantes perspectives.

#### Références

- [1] H. Ohta, K. Inoue, Y. Shimada, Experimental study on flow boiling heat transfer in an extremely small tube, *Proceedings of ICNMM2006 Fourth International Conference on Nanochannels, Microchannels and Minichannels*, June 19-21, (2006), Limerick, Ireland.
- [2] M. Cortina Díaz, J. Schmidt, Flow boiling heat transfer of n-hexane and n-octane in a minichannel, *International Heat Transfer Conference IHTC 1*, Sydney 13-18 August (2006).
- [3] A.S. Pamitran, K.I. Choi, J.T. Oh., Two-phase flow boiling heat transfer and pressure drop with R-407C, R-410A, R-22, AND CO2 in horizontal minichannels, *International Heat Transfer Conference IHTC 13*, Sydney 13-18 August (2006).
- [4] T.H. Yen, M. Shoji, F. Takemura, Yuji Suzuki and N. Kasagi, Visualization of convective boiling heat transfer in single microchannels with different shaped cross-sections, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Volume 49, Issues 21-22, October (2006), 3884-3894.
- [5] W. Owhaib, B. Palm and C. Martín-Callizo, Flow boiling visualization in a vertical circular minichannel at high vapor quality, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Volume 30, Issue 8, August (2006), 755-763.