

## Condensation, micro-canaux et pile à combustible.

B. Mecheri, A. Odaymat, H. Louahlia Gualous & M. De Labachellerie

*Institut FEMTO ST/LPMO/ FCLAB  
UTBM, Batiment F, rue Thiery Mieg, 90010 Belfort  
hasna.gualous@femto-st.fr*

### Résumé :

la taille du confinement des canaux de circulation des fluides diphasiques modifie la structure de l'écoulement et intensifie le phénomène de transfert de chaleur. Cet article présente les résultats d'une étude expérimentale sur la condensation de la vapeur d'eau dans un seul micro-canal transparent. Différents régimes d'écoulement périodiques sont identifiés. Une analyse locale de certains phénomènes physiques est menée en se basant sur des visualisations de l'écoulement et une procédure de traitement d'images.

### Abstract:

Numerous studies reported that the scale of the hydraulic diameter influenced the condensation process and the heat transfer. This study concerns the condensation inside a miniature tube. The visualization of different instantaneous and periodically two-phase flow was conducted for different experimental conditions. The characterization of the two-phase flow was obtained using the image processing.

### Mots-clefs :

**condensation ; microcanaux ; pile à combustible**

### 1 Introduction

Les piles à combustibles (PAC) apparaissent comme des excellents convertisseurs d'énergie qui répondent aux préoccupations environnementales. Elles sont destinées plus particulièrement à l'alimentation des véhicules électriques. Un consensus international s'est formé autour de la filière de piles à combustible à membranes échangeuses de protons (PEMFC). L'étude des régimes d'écoulements diphasiques dans une pile à combustible est directement liée au problème de gestion de l'eau au cœur de la pile. Elle représente un véritable verrou scientifique vu son effet sur la durée de vie et les performances énergétiques d'une pile à combustible.

Le fonctionnement d'une pile à combustible à haute densité de courant entraîne une importante production de quantité d'eau liquide difficile à évacuer à l'extérieur des cellules de la pile d'une manière suffisante. Ceci peut causer une inondation de la cellule au niveau de la couche poreuse ou au niveau des canaux de circulation des gaz. Par conséquent, le potentiel de la pile et ses performances chutent brusquement [1]. La figure 1-1 montre les problèmes engendrés par une production d'eau dans la cathode d'une pile à combustible qui dépasse la masse d'eau évacuée. Le premier cas concerne le problème de noyage de la couche de diffusion par l'eau produite ; ce qui réduit considérablement la diffusion massique de l'oxygène vers la membrane. Le second cas concerne le problème de blocage des canaux de circulation des gaz par l'eau produite. Ce problème apparaît généralement dans le cas où les forces de capillarité déstabilisent le film liquide formé. Des études ont démontré que l'effet de la capillarité augmente et que celui de la gravité décroît en réduisant le diamètre des canaux de circulation des fluides. Les problèmes

d'instabilités et de blocage de l'écoulement sont également rencontrés dans les échangeurs compacts à changement de phase. Les applications industrielles des systèmes à microcanaux sont diverses et ne se limitent pas qu'au système pile à combustible.

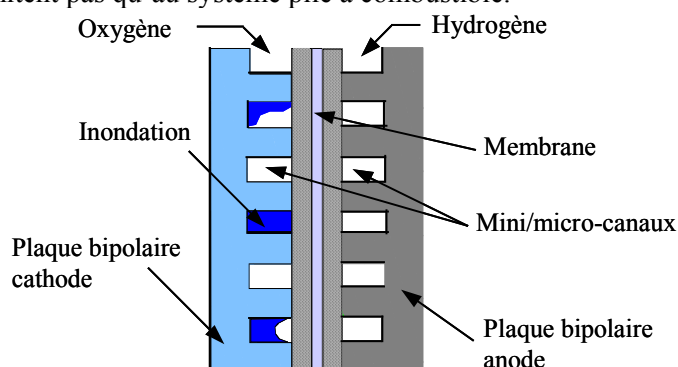


FIG 1-1. Micro/mini-canaux dans une pile PEMFC

Dans cet article, on présente les résultats d'analyse de différents régimes d'écoulements diphasiques observés lors de la condensation dans un micro-canal transparent. L'étude expérimentale est conduite avec un seul canal afin de localiser les zones de formation d'instabilités et de les analyser.

## 2 Dispositif et procédure expérimentale

Le banc d'essais expérimental se compose d'un circuit ouvert constitué d'un générateur de vapeur, des vannes de réglage de débit de vapeur, d'un minicondenseur expérimental et d'un second minicondenseur permettant de condenser la vapeur restante à la sortie de la section d'essais. Une balance de précision 0,01 g est utilisée pour mesurer le débit massique condensé (Figure 2-1). La pression de la vapeur à l'entrée de la section d'essais est mesurée par un capteur de pression à déformation de membrane HBM de précision 0,8%.

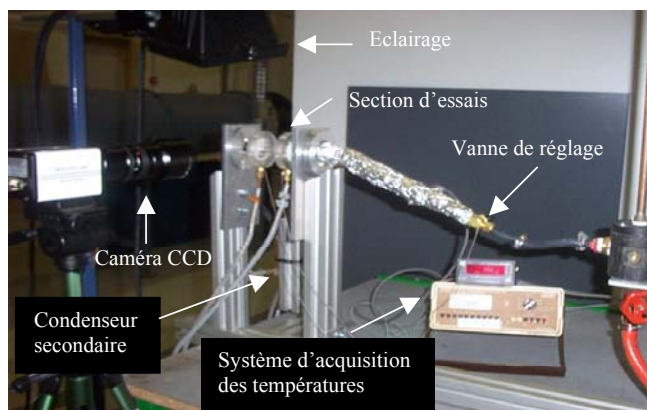


FIG 2-1. Banc d'essais expérimental

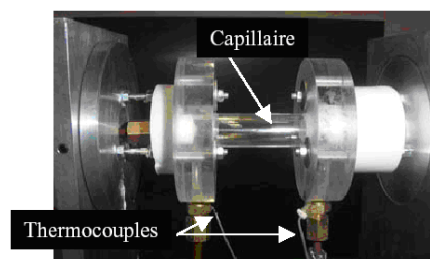


FIG 2-2. Section d'essais

La section d'essais présentée sur la figure 2-2 est composée d'un capillaire de diamètre 780  $\mu\text{m}$  et de longueur 66 mm. Il est inséré dans un tube transparent de diamètre 10 mm dans lequel on fait circuler de l'eau de refroidissement en contre courant par rapport à l'écoulement de la vapeur d'eau. Les températures d'entrée et de sortie du fluide de refroidissement sont mesurées par des microthermocouples ( $\pm 0,1^\circ\text{C}$ ) afin d'évaluer la puissance de refroidissement. Le débit de

l'eau de refroidissement est mesuré à par pesée avec une balance de précision 0,01g. Un système d'acquisition de données est utilisé pour enregistrer toutes les températures.

Avant chaque expérience, le bouilleur est déchargé afin d'évacuer les gaz non condensables. Tous les résultats ont été obtenus en utilisant de la vapeur d'eau distillée. Pendant les expériences, différents modes d'écoulement diphasique sont enregistrés à l'aide d'une caméra rapide CCD avec une résolution de 512x480 pixels, à une vitesse de 125 images/seconde. La pression et la température de la vapeur ainsi que le débit massique total sont contrôlés à l'entrée du capillaire. L'écoulement du condensat à la sortie de la section d'essais est à la pression atmosphérique.

### 3 Résultats et discussions

#### 3.1 Les différentes structures de l'écoulement diphasique

A partir des essais sur la condensation dans un microcanal, différents modes d'écoulement sont observés et dépendent essentiellement de la puissance de refroidissement qui contrôle le taux de condensation, de la pression d'admission, ainsi que du débit massique de la vapeur à l'entrée du capillaire qui définit la vitesse de la phase vapeur [2].

Au cours des essais, le mode d'écoulement prédominant dans le capillaire est l'écoulement annulaire et à bulles sphériques ou allongées (Figs. 3-1.1 a-c).

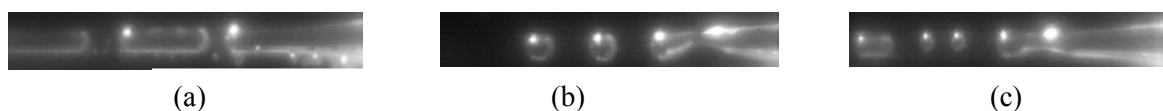


FIG 3-1.1. Exemples de modes d'écoulements : a – annulaire/bulles allongées , b- annulaire/bulles sphériques, c- annulaire/bulles sphériques/bulle allongée.

L'écoulement annulaire est caractérisé par une vitesse de la vapeur prépondérante par rapport à celle du film liquide. Dans ce cas, les forces de gravité sont négligeables par rapport aux forces à l'interface liquide-vapeur, ce qui rend l'effet de la stratification insignifiant [3,4]. L'écoulement à bulles allongées se produit dans le cas où on a formation des instabilités interfaciales comparables à celles observées dans le cas d'écoulements diphasiques (sans changement de phase) dans un capillaire (Fig. 3-1.2). Ces instabilités sont connues sous le nom des instabilités de Rayleigh-Taylor [5]. La formation de vagues à l'interface liquide-vapeur est due principalement à une différence de vitesses liquide et vapeur au niveau de l'interface. Par conséquent, une accumulation du liquide et une augmentation de l'épaisseur du condensat se produit sur les parties inférieure et supérieure du canal. Au cours des essais, on a remarqué la naissance des vagues interfaciales bidimensionnelles ou tridimensionnelles au niveau de la surface de l'écoulement annulaire. L'augmentation de l'amplitude de ces vagues engendre l'apparition d'un étranglement de la phase vapeur pour donner naissance à des bulles sphériques ou allongées.

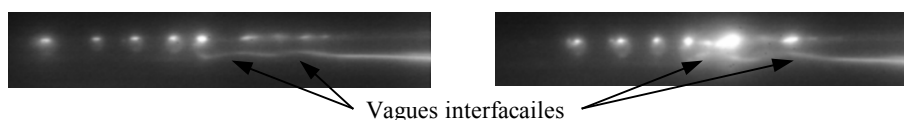


FIG 3-1.2. Exemple d'écoulements avec formation des vagues interfaciales

#### 3.2 Cycle d'écoulement diphasique et taux de vide

Les aspects transitoire et périodique des écoulements diphasiques observés sont présentés sous la forme de cycles d'écoulements définis en fonction de la longueur de déplacement du ménisque

de l'écoulement annulaire et de celui des bulles. Ces longueurs sont mesurées à partir de l'entrée du capillaire. La figure 3.2.1 présente un exemple de cycle obtenu dans le cas du régime d'écoulement annulaire/bulles sphériques/bulles allongées, présentant les zones et le temps de production des bulles. On montre le déplacement du ménisque de l'écoulement annulaire dans le capillaire jusqu'à la production de la première bulle allongée à un temps approximativement égal à 240 ms. Après cet instant, une brusque diminution de la longueur de l'écoulement annulaire se produit à cause du phénomène d'étranglement et de l'éjection de la première bulle allongée (bulle de Taylor). Ce phénomène se produit à une distance approximativement égale à 14 mm loin de l'entrée du canal. La figure 3.2.1 met en évidence un amortissement de l'écoulement dans le capillaire au moment de la formation des vagues interfaciales. Ceci est illustré dans la figure 3.2.1 par une stabilité de la longueur de déplacement durant un bref instant pendant lequel les vagues se forment et leurs amplitudes s'amplifient jusqu'à la phase d'étranglement (caractérisée par une brusque chute de la longueur de déplacement du ménisque).

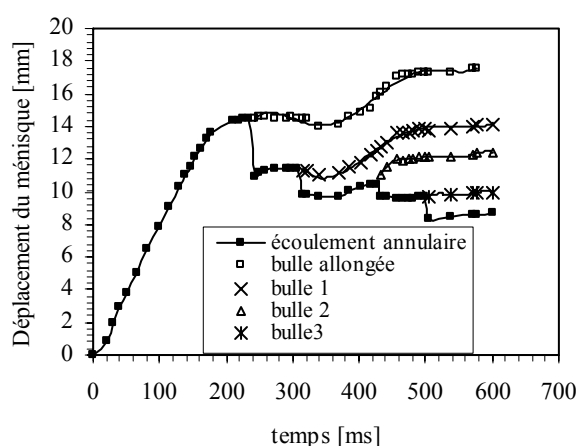


FIG 3-2.1. Cycle d'écoulement diphasique

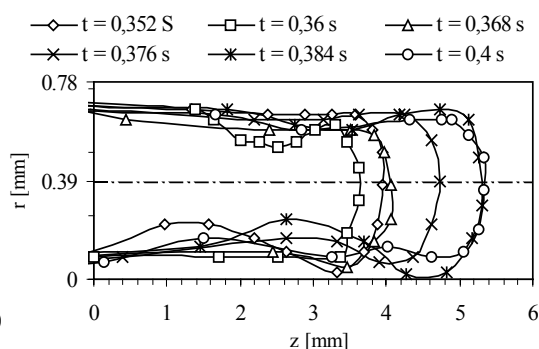


FIG 3-2.2. Courbures de l'interface

La figure 3.2.2 présente les évolutions temporelles de l'interface liquide-vapeur dans le cas où l'écoulement est annulaire. L'écoulement diphasique est caractérisé par une longueur diphasique et un taux de vide variables suivant le temps et la localisation dans le canal. Les figures 3.2.3 et 3.2.4 présentent les évolutions locales du taux de vide ( $\alpha$ ) calculé à partir des équations suivantes :

$$\alpha = \frac{A_v}{A_t} \quad (1)$$

$A_v$  représente la section du canal occupée par la phase vapeur,  $A_t$  représente la section totale du canal de diamètre  $D$ .

Pour chaque abscisse  $z$ , nous avons pris en compte le caractère dissymétrique de l'écoulement en considérant :  $\delta_s$  l'épaisseur du microfilm liquide formée sur la partie supérieure du canal et  $\delta_i$  l'épaisseur du microfilm liquide formée sur la partie inférieure du canal (Fig. 3-2.3). Dans ce cas, le taux de vide s'écrit sous la forme suivante :

$$\alpha = \frac{(D - 2\delta)^2}{D^2} \quad (2)$$

avec : l'épaisseur  $\delta$  égale à  $\delta_s$  ou à  $\delta_i$ .

Les figures 3.2.4 a et b présentent des exemples d'évolutions locales du taux de vide dans deux cas différents. Le premier concerne un écoulement annulaire avec présence d'une zone

d'étranglement où le taux de vide tend vers 0. Le second cas concerne un écoulement annulaire avec présence de deux bulles de tailles différentes. Dans les deux cas le taux de vide diminue depuis l'entrée du canal et atteint sa valeur minimale (2%) à  $z \approx 9$  mm et  $z \approx 13$  mm qui représentent respectivement les zones de formation de vague et le ménisque qui marque la fin de l'écoulement annulaire (Fig. 3.2.4 a). Cette dernière figure est obtenue au moment du détachement et de l'éjection de la première bulle (bulle de Taylor). Elle montre que l'écoulement diphasique est dissymétrique et que le taux de vide est inférieur dans la partie inférieure du tube à cause du phénomène de stratification (accumulation du condensat en dessous de la phase vapeur sous l'effet de la gravité). Ce phénomène diminue en réduisant le diamètre du canal et tend à être négligeable dans le cas d'un microcanal.

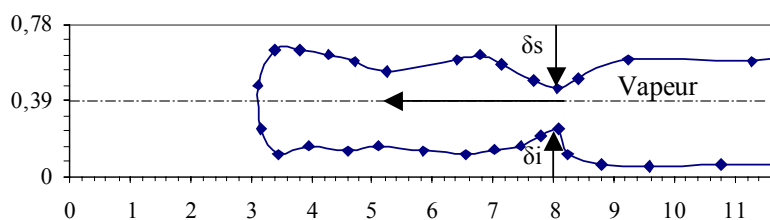


Fig. 3.2.3. Ecoulement annulaire (dimensions en mm).

La figure 3.2.4 b obtenue dans les mêmes conditions expérimentales à  $t = 310$  ms montre la présence d'une bulle allongée et d'une bulle sphérique de tailles approximativement égales à 3 mm et 1 mm respectivement. Ces tailles représentent les valeurs des rayons horizontaux mesurés à l'axe du canal. L'incertitude sur la mesure du taux de vide est estimée au maximum à 10% [2].

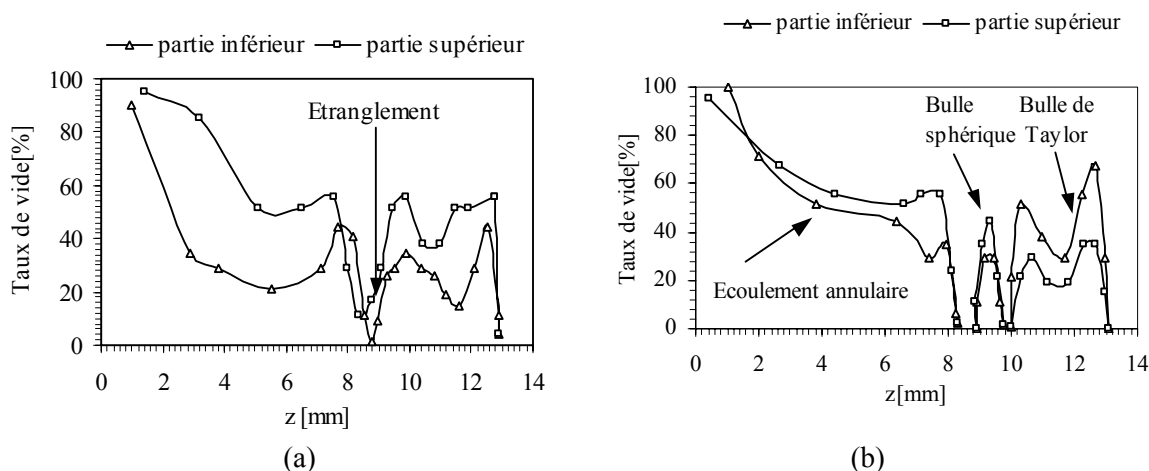


FIG. 3-2.4 Evolutions locales des taux de vide : (a) écoulement annulaire à  $t = 230$  ms, (b) écoulement annulaire/à bulles à  $t = 310$  ms.

Dans le cas d'un écoulement dans un microcanal, les forces de capillarité contrôlent la dynamique de l'écoulement et augmentent l'effort de cisaillement entre les deux phases liquide-vapeur. En condensation, les forces exercées par la vapeur sur le liquide provoquent des ondulations surfaciques (instabilités de Rayleigh-Taylor). Les bulles éjectées se déplacent vers la sortie du canal en se condensant. Elles suivent un parcours proche de la partie supérieure du canal sous l'effet des forces de flottabilité (Fig. 3-2.4. b).

### 3.3 Forme du ménisque et pression capillaire

La fin de la longueur capillaire est clairement délimitée par un ménisque dont la forme est quasiment ellipsoïde. Le ménisque représente le front de changement de phase dont la forme varie au cours du temps et suivant la distribution du condensat. La figure 3.3.1 montre les courbures de l'interface liquide-vapeur déterminées à deux instants différents ( $t = 80$  ms et  $t = 176$  ms). L'écoulement est annulaire avec présence d'instabilité située approximativement à  $z = 2,6$  mm. L'évolution locale de la pression capillaire est déduite de celle de l'épaisseur du film liquide. Elle est calculée à partir de l'équation de Laplace modifiée [2, 6]. La figure 3.3.2 montre les évolutions locales de la pression capillaire calculées à  $t = 80$  ms et  $t = 176$  ms. Pour  $t = 80$  ms, la pression capillaire est sensiblement uniforme tout au long du canal et atteint une valeur maximale dans la zone où le ménisque se forme. A  $t = 176$  ms, la pression capillaire est maximale dans la zone de formation d'instabilité où l'épaisseur de condensat est maximale.

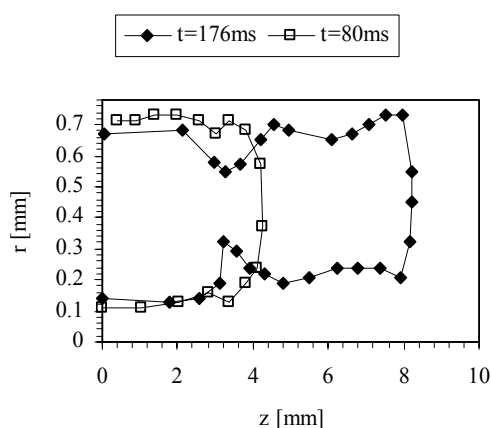


FIG. 3-3.1 Interface liquide-vapeur.

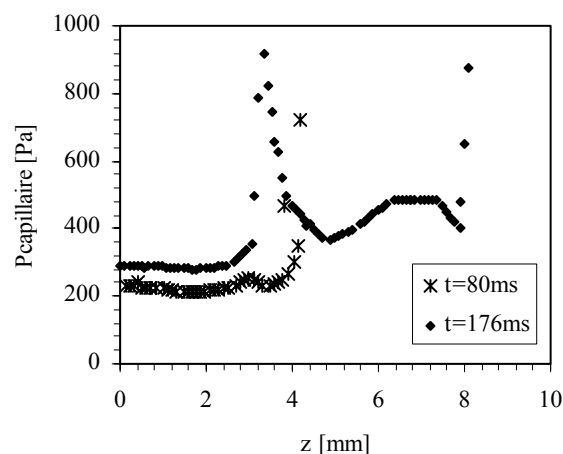


FIG. 3-3.2 Variation locale de la pression capillaire.

#### 4 Conclusions

Cet article présente des résultats d'analyse de la condensation de la vapeur d'eau dans un microcanal. Le caractère périodique et instationnaire de l'écoulement diphasique est représenté par un cycle de l'écoulement. Ce dernier peut être analysé dans le but d'obtenir les vitesses de déplacement de la phase vapeur dans le capillaire. On constate que l'écoulement diphasique est dissymétrique et que la formation des vagues interfaciales se produit proche de l'entrée du canal. La valeur locale de la pression capillaire dépend de la distribution de l'épaisseur du film liquide qui définit la courbure de l'interface.

#### Références

- [1] Allen, J.S., Son, S.Y. & Kihm, D.K. 2003 Characterization and control of two phase flow in microchannels : PEM Fuel Cell channels and manifolds, Research for design report, 1-29.
- [2] Louahlia-Gualous, H., Mecheri, B., 2007, Unsteady steam condensation flow patterns inside a miniature tube, *Applied Thermal Engineering*, **27**, 1225-1235.
- [3] Wu, H.Y., Cheng, P., 2005, Condensation flow patterns in silicon microchannels, *Int. J. Heat and Mass Transfer*, **48**, 2186-2197.
- [4] Colmen, J.W., Garimella, S., 1999, Characterization of two-phase flow patterns in small diameter round and rectangular tubes, *Int. J. Heat and Mass Transfer*, **42**, 2869-2881.
- [5] Goren S.L., 1962, The instability of an annular thread of fluid, *J. Fluid Mechanics*, 309-319.
- [6] Zhang Y., Faghri A., Shafii M.B., 2001, Capillary blocking in forced convection condensation in horizontal miniature channels. *J. of Heat Transfer*, Trans. ASME, **123**, 501-511.