



**HAL**  
open science

## Evaporation du CO<sub>2</sub> dans des microcanaux en silicium: performances thermiques et visualisations d'écoulement

Maxime Vacher, Damien Colombet, Frédéric Ayela, Pierre Delebecque,  
Stéphane Jézéquel, R. Kossakowski

### ► To cite this version:

Maxime Vacher, Damien Colombet, Frédéric Ayela, Pierre Delebecque, Stéphane Jézéquel, et al.. Evaporation du CO<sub>2</sub> dans des microcanaux en silicium: performances thermiques et visualisations d'écoulement. 32eme congrès français de thermique, 2024, Strasbourg, France. hal-04848457

**HAL Id: hal-04848457**

**<https://hal.science/hal-04848457v1>**

Submitted on 19 Dec 2024

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Evaporation du CO<sub>2</sub> dans des microcanaux en silicium: performances thermiques et visualisations d'écoulement

Maxime VACHER<sup>1,2\*</sup>, Damien COLOMBET<sup>1</sup>, Frédéric AYELA<sup>1</sup>, Pierre DELEBECQUE<sup>2</sup>, Stéphane JEZEQUEL<sup>2</sup>, Roman KOSSAKOWSKI<sup>2</sup>

\*[maxime.vacher@univ-grenoble-alpes.fr](mailto:maxime.vacher@univ-grenoble-alpes.fr)

<sup>1</sup>Laboratoire d'Écoulements Géophysiques et Industriels, 1209 Rue de la Piscine 38610 Gières

<sup>2</sup>Laboratoire d'Annecy de Physique des Particules, 9 chemin de Bellevue 74940 Annecy

## 1. Introduction

Ce travail est consacré à la caractérisation d'échangeurs à multi-microcanaux en silicium-Pyrex fonctionnant avec du CO<sub>2</sub> diphasique. Ces systèmes sont envisagés pour assurer le refroidissement des détecteurs à Pixel du futur accélérateur de particules du CERN (Future Circular Collider) à l'horizon 2040. Dans la littérature, il ressort que très peu d'auteurs ayant étudié expérimentalement l'ébullition du CO<sub>2</sub> en microcanal ont fait le lien entre les tendances d'évolution du coefficient de transfert de chaleur (HTC) et les régimes d'écoulements. Or des transitions de régimes d'écoulements sont fréquemment observées en microfluidique, et induisent des modifications dans les modes de transfert de chaleur dominants et dans l'efficacité du refroidissement. L'objectif de ce travail expérimental et numérique est notamment d'exploiter la visualisation de l'écoulement pour expliquer les variations du HTC et améliorer la compréhension du transfert de chaleur.

## 2. Principe de fabrication des microcanaux en silicium

La fabrication de micro-canaux en silicium s'appuie sur la lithographie optique, un procédé de reproduction qui consiste, à travers plusieurs opérations, à dupliquer un motif sur un matériau appelé substrat, à l'aide de lumière UV. A ce jour, c'est la technique la plus utilisée pour la fabrication de circuits intégrés dans l'industrie électronique. La fabrication de ces microcanaux s'effectue en grande partie en salle blanche, à partir de disques en silicium (appelés 'wafers') de 3 pouces de diamètre et de 400 microns d'épaisseur pour notre application. Les étapes principales de fabrication sont illustrées sur la Figure 1 :

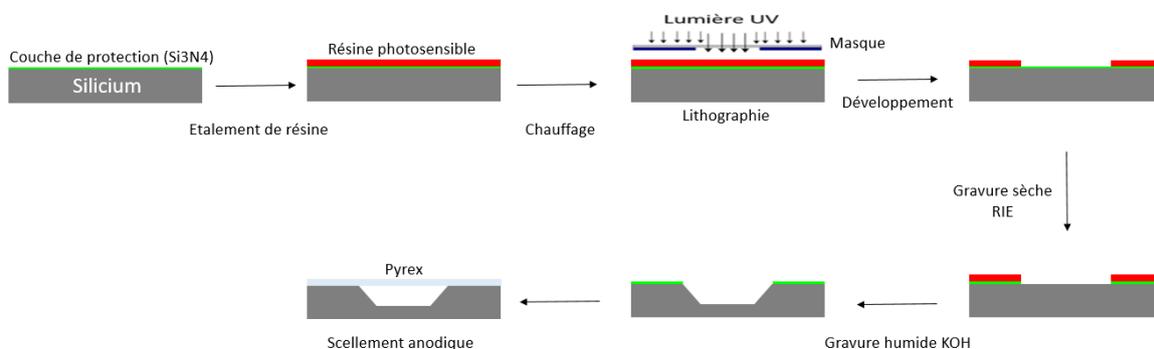


Figure 1 : Etapes principales de fabrication des échantillons en silicium

Le développement de connectiques robustes résistantes aux conditions opératoires du CO2 (pressions entre 6 et 50 bars, températures entre +25°C et -50°C) a constitué un réel challenge. De premiers essais ont été réalisés sur des connectiques collées de type PEEK, mais les décollements fréquents constatés à des pressions supérieures à 20 bars ont écarté cette solution.

La solution technique que nous avons mise en œuvre a consisté à braser des tubes en laiton de diamètre extérieur 6 mm sur des motifs en cuivre déposés sur le silicium (Figure 4). Cette technique a été éprouvée et validée à des pressions supérieures à la pression opératoire maximale du CO2 en conditions subcritiques ( $P < 73$  bars).

Au total, la fabrication d'un seul échantillon comporte entre 35 et 40 étapes. Il est possible de regrouper sur un wafer 3 pouces deux ou trois échantillons.

Deux échantillons comportant respectivement 8 et 16 microcanaux ont été caractérisés sur le banc d'essai (Figure 2). De dimensions  $6\text{ cm} \times 2,5\text{ cm} \times 3,4\text{ mm}$  (8 canaux) et  $6\text{ cm} \times 2,5\text{ cm} \times 1,4\text{ mm}$  (16 canaux), ils sont constitués d'une zone de détente, comportant des capillaires disposés en fourchette, permettant d'abaisser de plusieurs bars la pression du CO2 liquide et d'effectuer la transition liquide-diphasique : ainsi l'écoulement est diphasique dès l'entrée des microcanaux. Des diodes microfluidiques (inventées par Nikola Tesla) ont été utilisées sur l'échantillon à 8 canaux pour lutter contre le phénomène de reflux fréquemment observé en microfluidique. Finalement, ces diodes ne se sont pas avérées utiles, puisque le reflux n'a jamais été observé sur l'échantillon à 16 canaux n'en contenant pas : l'utilisation de capillaires suffisamment fins par rapport aux microcanaux est un moyen efficace d'empêcher l'apparition d'instabilités d'écoulement [1]. Les dimensions des canaux sont présentées dans le tableau N°1.

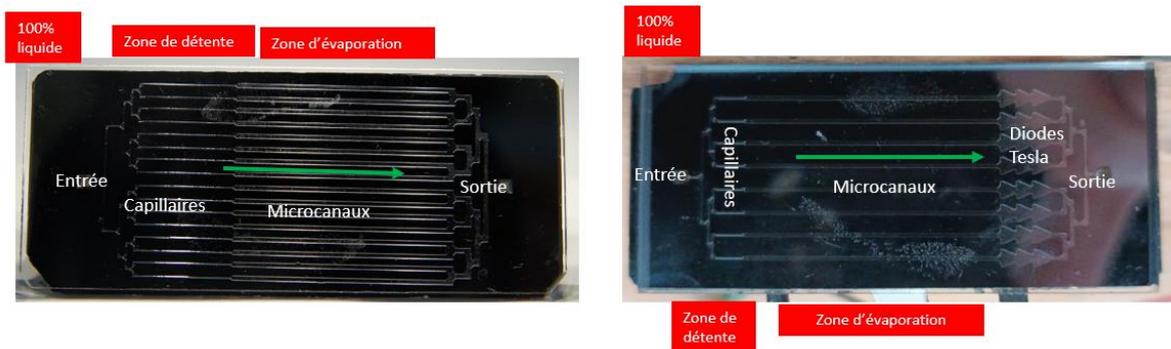


Figure 2 : Echantillons à 8 et 16 microcanaux caractérisés sur banc d'essai CO2

	Échantillon à 8 canaux	Échantillon à 16 canaux
Largeur capillaires	228µm	166µm
Largeur microcanaux	470µm	570µm
Longueur microcanaux	2,8cm	2,4cm
Profondeur de gravure	123µm	121µm
Diamètre hydraulique	175µm	183µm

Tableau 1 : dimensions caractéristiques des échantillons à microcanaux

Le diamètre hydraulique s'exprime en fonction de la section de passage des microcanaux  $S$  et de leur périmètre mouillé  $p$  :

$$D_h = \frac{4S}{p}$$

### 3. Fonctionnement du banc d'essai et principe des mesures

Le banc d'essai utilisé pour caractériser les échantillons est présenté sur la Figure 3. Il se compose de deux parties : la station de refroidissement et la section de mesure.



Figure 3 : Vue générale du banc d'essai CO2 utilisé pour les mesures

La station de refroidissement permet la circulation contrôlée du CO2 à des débits massiques prédéfinis, garantissant un état liquide sous-refroidi en entrée des échantillons. La section de mesure située dans une enceinte sous vide, fournit un environnement adéquat aux échantillons, les plaçant dans des conditions de fonctionnement appropriées et les isolant des sources de chaleur parasites. Deux lignes de circulation sont utilisées, les deux fonctionnant en boucle ouverte :

La ligne primaire est dédiée à l'acheminement du CO2 vers l'échantillon en silicium-pyrex. La ligne secondaire a pour rôle de refroidir le CO2 de la ligne primaire à une température suffisamment basse pour pouvoir caractériser les échantillons sur la gamme  $[-50^{\circ}\text{C} ; +10^{\circ}\text{C}]$ , et pour des pressions allant de 6 bars jusqu'à 50 bars. L'avantage d'utiliser deux lignes distinctes est de pouvoir maintenir des débits faibles dans le circuit primaire : avec les microcanaux caractérisés, entre  $0,20\text{g/s} < q_m < 0,55\text{g/s}$ , contre  $1\text{g/s} < q_m < 3\text{g/s}$  avec des tubes de diamètre 2,5mm [2]. Malgré ces faibles débits, un refroidissement efficace est garanti jusqu'à l'entrée de la section de mesure, grâce à des débits plus importants sur la ligne secondaire.

Dans la section de mesure sous vide, le CO2 arrive à l'état liquide sous-refroidi à l'entrée de l'échantillon, puis subit un abaissement de pression dans les capillaires qui provoque l'apparition des bulles. Le long des microcanaux, l'application d'une puissance thermique variable (entre 3W et 12W) via une chaufferette collée sur le Silicium permet d'évaporer le liquide et de faire croître les bulles. Des prises de températures collées sur la paroi externe du Silicium au niveau de l'entrée et la sortie des microcanaux permettent de mesurer l'élévation de température du silicium (Figure 4).

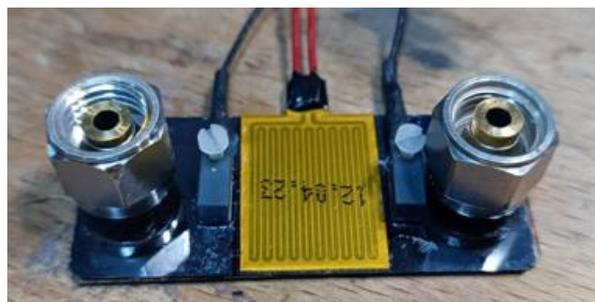


Figure 4 : Vue de la face arrière d'un échantillon équipé de prises de température et chaufferette, entre les connectiques d'alimentation fluidique.

Un fil résistif enroulé autour du tube d'alimentation permet de chauffer le tube situé en amont de l'échantillon par effet Joule et d'apporter de l'énergie au CO2 liquide. Ainsi, il est possible de faire varier la valeur du sous-refroidissement en entrée de l'échantillon, ce qui modifie la valeur du titre en vapeur.

Les PT100 utilisées pour mesurer la température du Silicium sont de classe A. Leur précision varie suivant la température. Pour une température de paroi (côté PT100)  $T_p = -40^\circ\text{C}$ , on a  $U(T_p) = +/ - 0,23^\circ$ . Pour  $T_p > -40^\circ\text{C}$ ,  $U(T_p) < 0,23^\circ$ . Les températures mesurées sur les deux échantillons sans appliquer de flux de chaleur dépassant systématiquement les  $-40^\circ\text{C}$ , nous avons choisi cette valeur d'incertitude (correspondant à la situation la plus défavorable) pour l'ensemble des points de fonctionnement.

Afin de pouvoir considérer que la température interne en paroi était très proche de la température externe, nous avons estimé l'écart de température  $\Delta T_{paroi}$  entre la surface en silicium sur laquelle les PT100 sont collées et la paroi interne des microcanaux, en contact avec le CO2. La surface couverte par la chauffelette étant  $S_{ch} = 1,9\text{cm} * 2,2\text{cm}$ , l'épaisseur maximale de paroi en silicium  $e_{Si} = 400\mu\text{m}$ , et la conductivité thermique du silicium  $\lambda_{Si} = 150\text{W/mK}$  on a pour une puissance de  $\phi_{th} = 12\text{W}$  (puissance maximale appliquée) :

$$\Delta T_{paroi} = \phi_{th} * \left( \frac{e_{Si}}{\lambda_{Si} S_{ch}} \right) = 0.0765^\circ$$

Ainsi même avec l'application de flux de chaleur importants, du fait de la faible épaisseur et de la conductivité élevée du silicium, la température à l'intérieur du canal est très proche de celle mesurée sur la paroi extérieure.

Pour l'échantillon à 8 microcanaux : l'élévation de température de paroi  $T_p - T_{sat}$  est comprise entre  $1,07^\circ\text{C}$  (valeur minimale au flux de chaleur le plus bas  $Q_{th} = 41\text{ kW/m}^2$ ) et  $6,96^\circ\text{C}$  (valeur maximale au flux de chaleur le plus élevé  $Q_{th} = 143\text{ kW/m}^2$ ). Pour l'échantillon à 16 microcanaux : l'élévation de température  $T_p - T_{sat}$  est comprise entre  $0,63^\circ\text{C}$  (valeur minimale au flux de chaleur le plus bas  $Q_{th} = 17,1\text{ kW/m}^2$ ) et  $3,90^\circ\text{C}$  (valeur maximale au flux de chaleur le plus élevé ( $Q_{th} = 59,4\text{ kW/m}^2$ )).

#### 4. Etude paramétrique du coefficient de transfert de chaleur

Les coefficients de transfert de chaleur locaux  $\alpha_i$  associés aux mesures de température en entrée / sortie des microcanaux sont calculés comme suit (Equation 1) :

$$\alpha_i = \frac{P_{tot}}{S_{ech} \Delta T} = \frac{P_{th} + P_{res}}{S_{ech} (T_{p_i} - T_{sat})} \quad (1)$$

$S_{ech}$  est la surface d'échange de chaleur, et correspond à la surface de contact entre le silicium et le CO2. Elle couvre 3 des 4 côtés des canaux trapézoïdaux.

$P_{res}$  est la puissance résiduelle : elle correspond à la somme des apports résiduels par conduction le long du silicium, et par le rayonnement de la paroi de l'enceinte. Du fait du vide dans l'enceinte, les apports convectifs sont négligés. La mesure de la puissance résiduelle a été effectuée en écoulement monophasique liquide suffisamment sous-refroidi et est de  $0,65\text{W}$ .

$T_{p_i}$  est la température de paroi du silicium au dos des microcanaux mesurée par une des deux PT100 en entrée ou en sortie des microcanaux,  $T_{sat}$  la température de saturation du CO2 dans les microcanaux, approximée à partir de la moyenne des températures mesurées par les PT100 en entrée et sortie, à puissance thermique nulle (Equation 2) :

$$T_{sat} = \frac{T_{p_1}(P_{th}=0) + T_{p_2}(P_{th}=0)}{2} \quad (2)$$

On déduit un coefficient de transfert de chaleur global calculé comme la moyenne des coefficients de transfert de chaleur locaux (Equation 3) :

$$\alpha = \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2} \quad (3)$$

L'incertitude sur la température de saturation est prise égale à 1°, soit  $U(\Delta T_p) = \pm 1,23^\circ$ . L'incertitude relative sur l'élévation de température de paroi  $\frac{U(\Delta T_p)}{\Delta T_p}$  dépend donc de la puissance appliquée, de même que celle sur le coefficient de transfert de chaleur. Les incertitudes sur le coefficient de transfert de chaleur de l'échantillon à 16 microcanaux sont rassemblées dans le tableau 2.

$Q_{th}(\text{kW/m}^2)$	$\frac{U(\alpha)}{\alpha}$ (%) — 0.24g/s	$\frac{U(\alpha)}{\alpha}$ (%) — 0.35 g/s	$\frac{U(\alpha)}{\alpha}$ (%) — 0.50 g/s
17.1	210	185	158
31.2	95	83	68
45.3	63	55	47
59.4	45	41	35

Tableau 2. Incertitudes relatives sur le coefficient de transfert de chaleur pour l'échantillon à 16 microcanaux

Sur le banc d'essai, les paramètres étudiés influençant le transfert de chaleur sont les suivants :

- Vitesse massique  $G$  [ $\text{kg/m}^2\text{s}$ ]
- Flux de chaleur  $Q_{th}$  [ $\text{kW/m}^2$ ]
- Titre en vapeur  $x_{vap}$  (%)

Le titre en vapeur à l'entrée des microcanaux est estimé à l'aide des données de mesure des capteurs présents sur l'échantillon (température) et avant l'échantillon (pression et température), en faisant l'hypothèse que la détente dans les capillaires est isenthalpique.

Sur la gamme de conditions opératoires étudiée, l'intervalle de variation de la température de saturation dans les microcanaux étant de quelques degrés autour d'une température moyenne  $T_{sat} = -35^\circ\text{C}$ , ce paramètre n'est pas considéré comme influençant significativement l'efficacité du refroidissement. Pour chaque point de fonctionnement ( $x_{vap}$ ,  $G$ ) on mesure la température de paroi en fonction de la puissance appliquée sur le silicium, par rapport au cas où aucune puissance thermique n'est appliquée. La Figure 5 présente l'évolution du HTC sur l'échantillon à 16 canaux en fonction du flux de chaleur appliqué pour différentes valeurs de titre en vapeur, et vitesses massiques.

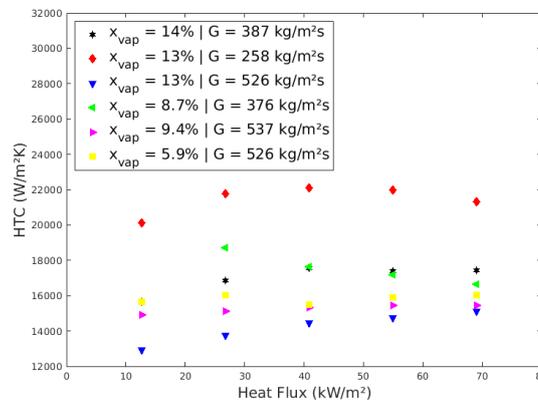


Figure 5 : Échantillon à 16 canaux - Evolution du HTC en fonction du flux de chaleur pour différentes valeurs de titre en vapeur et vitesse massique.

A vitesse massique fixe ( $G \approx 530 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ), l'augmentation du titre en vapeur fait légèrement diminuer le HTC, mais l'écart se réduit à mesure que le flux de chaleur augmente. Dans la littérature, les auteurs ayant travaillé sur l'ébullition du CO<sub>2</sub> en microcanal avec des canaux de diamètres hydrauliques supérieurs à 0,4mm constatent soit une augmentation du HTC avec le titre en vapeur [3], soit que le HTC est indépendant de ce paramètre [4,5]. L'absence de visualisations d'écoulement dans ces études ne permet cependant pas d'établir de lien avec les caractéristiques hydrodynamiques des écoulements.

A titre en vapeur fixe (voisin de 13%) l'augmentation de la vitesse massique de  $G = 258 \text{ kg/m}^2\text{s}$  à  $G = 526 \text{ kg/m}^2\text{s}$  entraîne la diminution du HTC de  $22.000 \text{ W/m}^2\text{K}$  à  $14.000 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Cet effet est très rarement reporté dans la littérature [6], et n'a jamais été observé avec du CO<sub>2</sub>. L'analyse des images de l'écoulement devrait permettre d'interpréter cette tendance.

La comparaison aux mesures de Petagna et Hellenschmidt [5] sur tube Inox de diamètre 0.5mm, à température de saturation plus élevée ( $T_{sat} = -25^\circ\text{C}$ ) montre que les performances thermiques sont plus élevées sur cet échantillon en silicium. La réduction du diamètre hydraulique a un effet positif sur le transfert de chaleur, comme constaté expérimentalement et numériquement dans la littérature [5].

## 5. Visualisations des écoulements

Afin d'identifier et de capturer les régimes d'écoulement observés, l'utilisation d'un matériel de visualisation et d'éclairage adapté respectant les contraintes suivantes s'impose :

- Disposer d'un matériel optique permettant de zoomer suffisamment sur l'écoulement.
- Disposer d'une caméra rapide dont la fréquence d'acquisition est suffisamment élevée pour réaliser le suivi d'une bulle entre l'entrée et la sortie d'un canal, sachant que la vitesse d'écoulement des bulles est de 1m/s à 2m/s
- Disposer d'un éclairage suffisamment puissant : car les temps d'exposition permettant d'avoir des images nettes sont très courts : de l'ordre de  $20\mu\text{s}$

Une caméra rapide de modèle PHANTOM VEO-L permettant d'enregistrer 1100 images /s à pleine résolution (4MP) a été utilisée. Montée sur un châssis en acier, elle a été couplée à une loupe binoculaire OLYMPUS SZX12 de grossissement entre x7 et x90, sur laquelle un objectif OLYMPUS de grossissement x0.45 a été fixé. Un éclairage KOMI Cyclop 1 de puissance maximale 120W comportant 3 LEDS focalisées a été employé pour éclairer par l'extérieur l'échantillon, à travers un hublot.

Nous avons alors constaté que les régimes d'écoulement n'étaient pas homogènes entre les différents canaux dans l'échantillon à 8 canaux, et l'épaisseur importante du Pyrex utilisé pour cet échantillon (3mm contre 1mm sur l'échantillon à 16 canaux) a donné des images trop sombres. A l'inverse, sur l'échantillon à 16 canaux fonctionnant majoritairement en régime laminaire (Reynolds compris entre 1300 et 2800), des régimes identiques ont été observés dans tous les canaux, et le Pyrex utilisé était suffisamment fin pour que les images soient exploitables. La Figure 6 illustre 3 régimes d'écoulements obtenus pour une vitesse massique de  $G \approx 530 \text{ kg/m}^2\text{s}$  pour trois valeurs du titre en vapeur.



Figure 6. Ecoulements observés sur l'échantillon à 16 canaux pour  $G \approx 530 \text{ kg/m}^2\text{s}$ .  
De gauche à droite, titre en vapeur à l'entrée des canaux :  $x_{vap} = 5,9\%$ ,  $x_{vap} = 9,4\%$ ,  $x_{vap} = 13\%$

On constate que les trois écoulements présentés sont de type poche-bouchons. L'augmentation du titre de  $x_{vap}=5,9\%$  à  $x_{vap}=13\%$  provoque l'allongement des bulles de vapeur, si bien que pour la valeur de titre la plus élevée, l'écoulement est quasiment slug-annulaire. En écoulement poches-bouchons, deux mécanismes contribuent au transfert de chaleur :

- i) La conduction à travers le film liquide : phénomène d'autant plus efficace que l'épaisseur de film est faible
- ii) Les recirculations de liquide entre les bulles de vapeur : le liquide froid au cœur de l'écoulement vient périodiquement refroidir la paroi chauffée

Les simulations numériques d'écoulements de Taylor réalisées par Magnini et al. et Lee et al. indiquent que le HTC évolue de manière cyclique le long de l'écoulement [7,8]. La position des extremums semble fortement dépendre du nombre de Reynolds. A faibles nombres de Reynolds ( $Re < 500$ ), le transfert de chaleur est piloté par l'épaisseur de film liquide. A Reynolds plus élevés, les maxima sont décalés vers la zone de slug liquide, et le film liquide ne permet plus d'améliorer le transfert de chaleur. Dans les écoulements observés, l'augmentation du titre a pour effet d'augmenter la vitesse de l'écoulement (conservation du débit), ce qui augmente l'épaisseur de film [10]. Un film liquide plus épais réduit le gradient de température entre la paroi et l'interface gaz/liquide, et réduit donc l'efficacité du transfert de chaleur. D'autre part, la fréquence des zones de recirculation dans l'écoulement diminue, ce qui réduit l'efficacité du refroidissement par les recirculations. La Figure 7 illustre 3 régimes d'écoulements obtenus pour un titre en vapeur de 13% pour trois vitesses massiques.

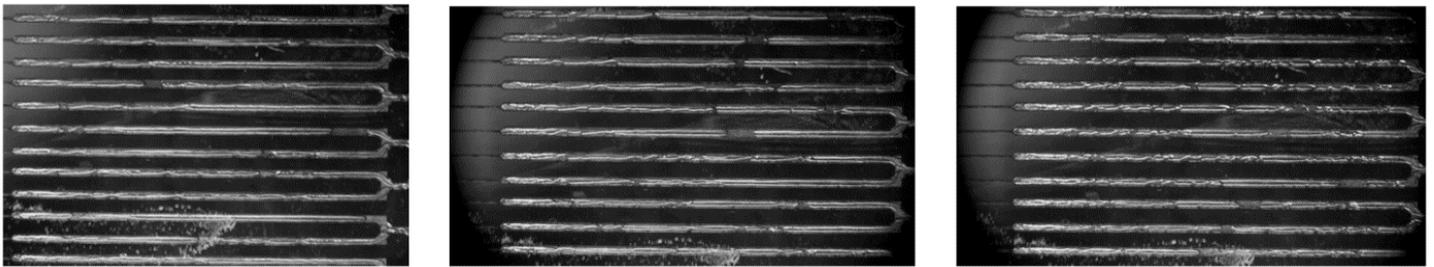


Figure 7. Ecoulements observés sur la échantillon à 16 canaux pour  $x_{vap} = 13\%$ . De gauche à droite :  $G = 258 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ,  $G = 387 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ,  $G = 526 \text{ kg/m}^2\text{s}$

L'augmentation de la vitesse massique ne modifie pas le régime d'écoulement qui reste de type poches-bouchons à la limite du slug-annulaire. Dans ce régime, les recirculations de liquide sont moins fréquentes et le film liquide peut être considéré comme le mode de transfert de chaleur prédominant. Dans les écoulements observés ici, on peut donc penser que l'augmentation de la vitesse massique de  $G = 258 \text{ kg/m}^2\text{s}$  à  $G=526 \text{ kg/m}^2\text{s}$  est responsable d'une augmentation de l'épaisseur de film, expliquant la diminution du coefficient de transfert de chaleur. Plusieurs programmes de traitement d'images ont été développés avec Matlab pour déterminer les moyennes temporelles des paramètres suivants : longueur de bulle, longueur de slug liquide vitesse de bulle, taux de croissance de bulle. Chaque série de 1000 images est enregistrée à une fréquence de 1230 Hz, soit une durée d'écoulement de 0,81s. Un premier programme effectue une binarisation des images : comme la lumière se reflète sur l'interface, il est possible, à partir du gradient de niveau de gris, de détecter les bulles (Figure 8). Au-delà d'une valeur seuil du gradient, une séparation entre le liquide et le gaz est opérée. A partir des images binarisées, d'autres programmes permettent d'estimer les paramètres restants.



Figure 8 : binarisation d'une image d'écoulement observé sur la puce à 16 microcanaux.

## 6. Perspectives : simulations numériques

Ces données seront utiles à la mise en place de simulations numériques d'écoulements diphasiques. On cherche à reproduire sur une géométrie de canal 2D avec le logiciel Fluent et l'approche de capture d'interface VOF les écoulements de type 'poches-bouchons' qui sont observés sur l'échantillon à 16 canaux. L'emploi d'une géométrie 2D axisymétrique plutôt que 3D empêche de reproduire la géométrie exacte des microcanaux en silicium, mais permet un gain de temps de calcul important. Les caractéristiques des écoulements en conditions adiabatiques ont été reproduites : longueurs de bulle et de slug liquide, vitesses de bulles, chute de pression le long du canal, et épaisseur de film liquide. Une étude du transfert de chaleur est en cours, avec pour objectif de déterminer l'évolution spatiale du HTC et du nombre de Nusselt dans l'écoulement. Enfin, un terme source d'évaporation sera rajouté pour générer la croissance des bulles. Le cas test de référence utilisé pour ces simulations est celui de Horgue et al.[10]

## Conclusion

Ce travail apporte des éléments inédits sur les régimes d'écoulements observés dans des microcanaux de faible diamètre hydraulique. Jusqu'à des nombres de Reynolds de 2800, seul le régime poches-bouchons est observé. L'augmentation du titre en vapeur entraîne l'allongement des bulles de vapeur mais a peu d'effet sur le transfert de chaleur. A l'inverse, l'augmentation de la vitesse massique ne modifie pas le type de régime observé, mais dégrade légèrement le transfert de chaleur, probablement en raison de l'augmentation de l'épaisseur de film liquide. Le développement d'un modèle numérique 2D capable de reproduire les tendances d'évolution du coefficient de transfert de chaleur constitue la suite de ce travail expérimental.

## Bibliographie

- [1] Guodong Wang, Ping Cheng, and AE Bergles. "Effects of inlet/outlet configurations on flow boiling instability in parallel microchannels". In: *International Journal of Heat and Mass Transfer* 51.9-10 (2008), pp. 2267–2281.
- [2] Pierre Barroca. "Modelling of CO<sub>2</sub> cooling of the ATLAS ITk Pixel Detector". PhD thesis. Université Grenoble Alpes, 2019.
- [3] Maxime Ducoulombier. "Ébullition convective du dioxyde de carbone: étude expérimentale en micro-canal". PhD thesis. Lyon, INSA, 2010.
- [4] Jostein Pettersen. "Flow vaporisation of CO<sub>2</sub> in microchannel tubes". PhD thesis. Norwegian University of Science and Technology, 2004.
- [5] D Hellenschmidt and P Petagna. "Effects of saturation temperature on the boiling properties of carbon dioxide in small diameter pipes at low vapour quality: Heat transfer coefficient". *International Journal of Heat and Mass Transfer* 172 (2021), p. 121094.
- [6] Agostini, Bruno, Thome, John Richard, Fabbri, Matteo, Michel, Bruno, Calmi, Daniele, & Kloter, Urs. 2008. High heat flux flow boiling in silicon multi-microchannels—Part I: Heat transfer characteristics of refrigerant R236fa. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 51(21-22), 5400–5414
- [7] Magnini, M, & Thome, JR. 2016. A CFD study of the parameters influencing heat transfer in microchannel slug flow boiling. *International Journal of Thermal Sciences*, 110, 119–136
- [8] Lee, Moon Soo, & Riaz, Amir. 2022. Direct numerical simulation of Taylor bubble with phase change. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 194, 123039
- [9] Pascale Aussillous and David Quere. "Quick deposition of a fluid on the wall of a tube". *Physics of fluids* 12.10 (2000), pp. 2367–2371.
- [10] Horgue, Pierre, Augier, Frederic, Quintard, Michel, & Prat, Marc. 2012. A suitable parametrization to simulate slug flows with the volume-of-fluid method. *Comptes Rendus Mécanique*, 340(6), 411–419.