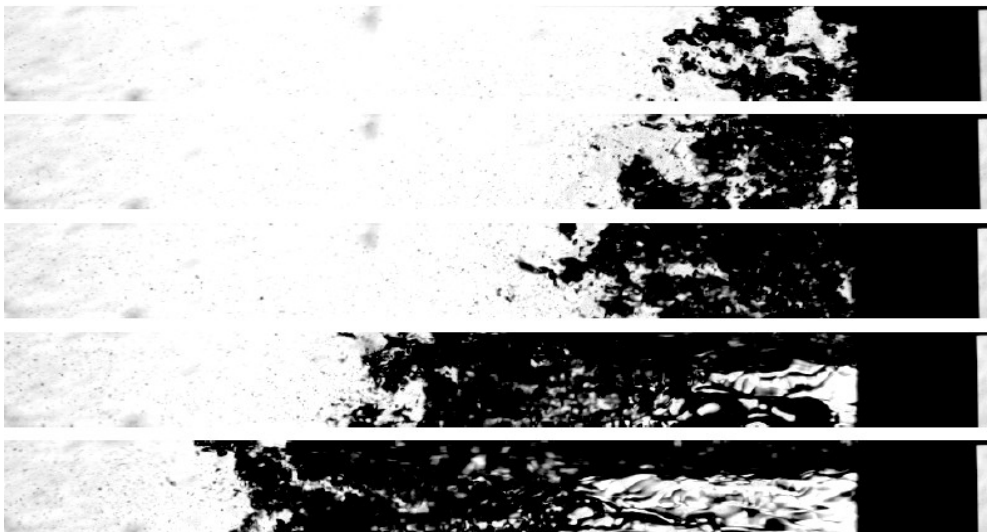
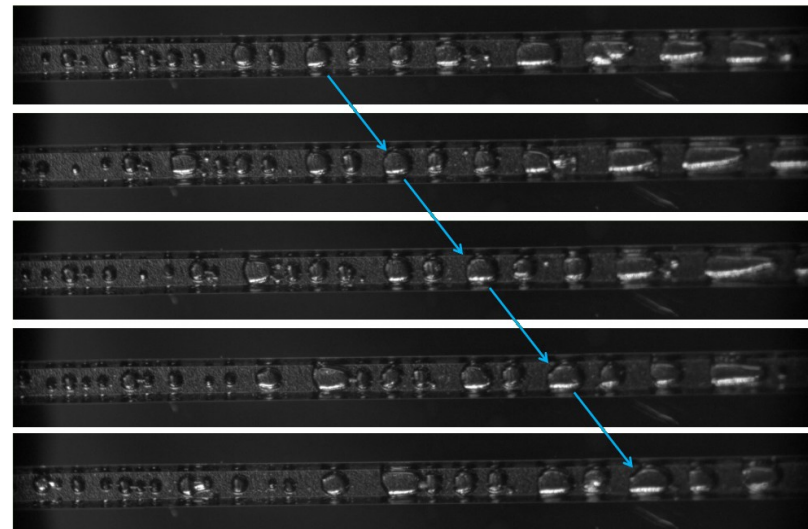


Ecoulements cavitants



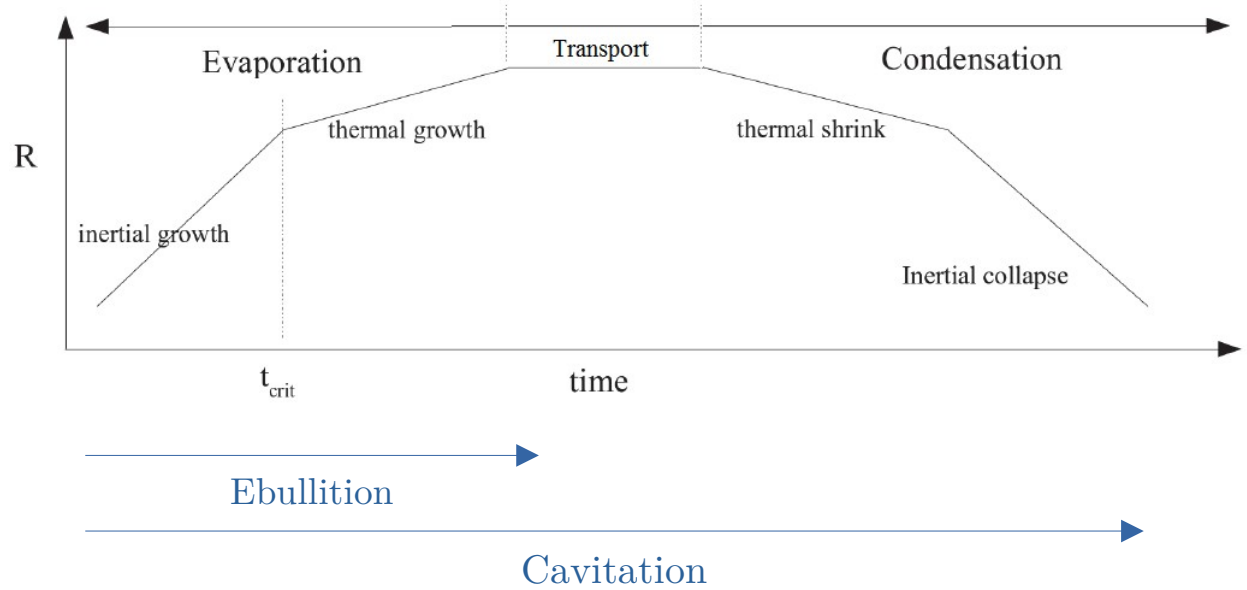
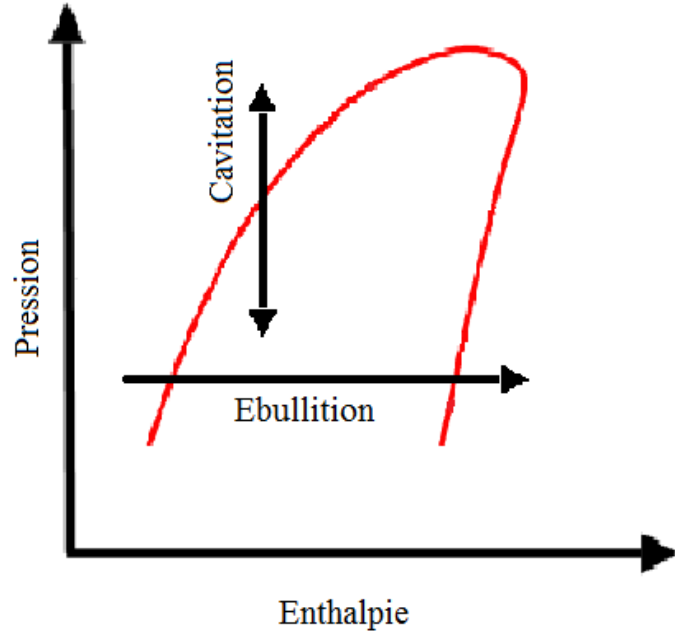
Ecoulements bouillants



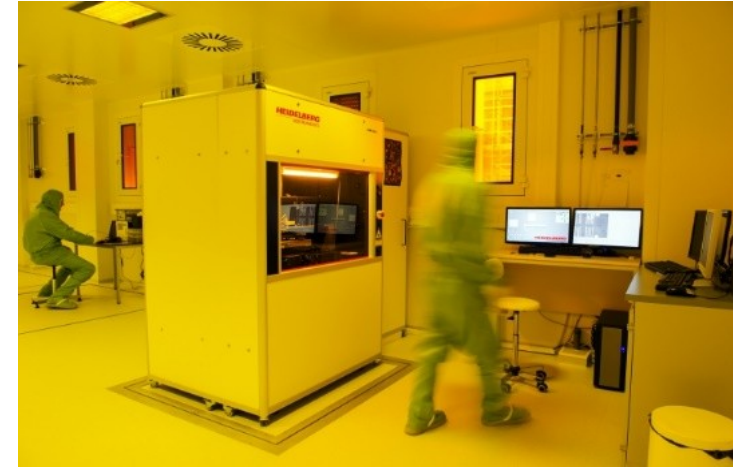
Cavitation et ébullition / Généralités

Ebullition : changement de phase $L \rightarrow V$ par élévation de température

Cavitation : changement de phase $L \rightarrow (V+L) \rightarrow L$ par abaissement de pression

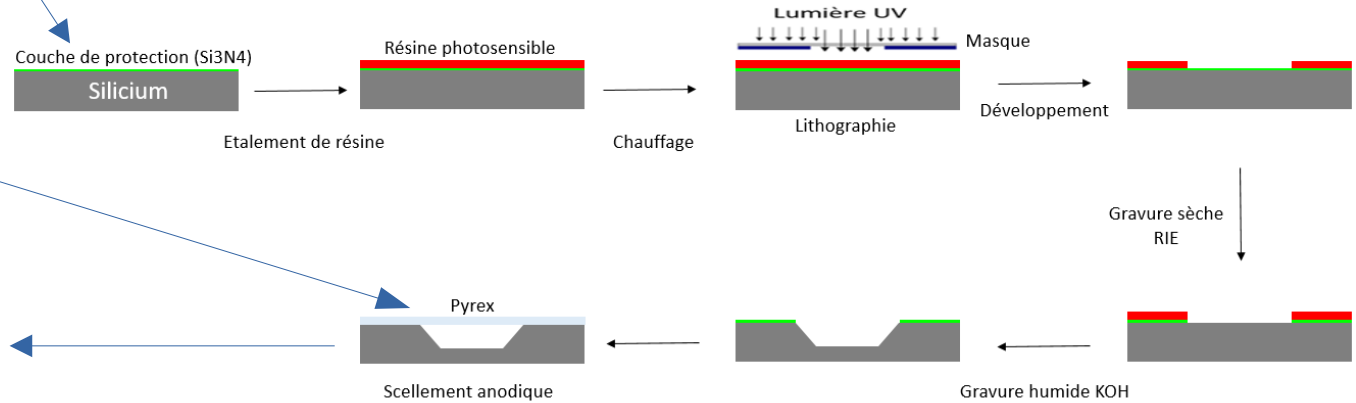


Besoin de visualisation → puces Silicium + Pyrex
Fabrication des puces par photolithographie ~ 20 à 40 étapes



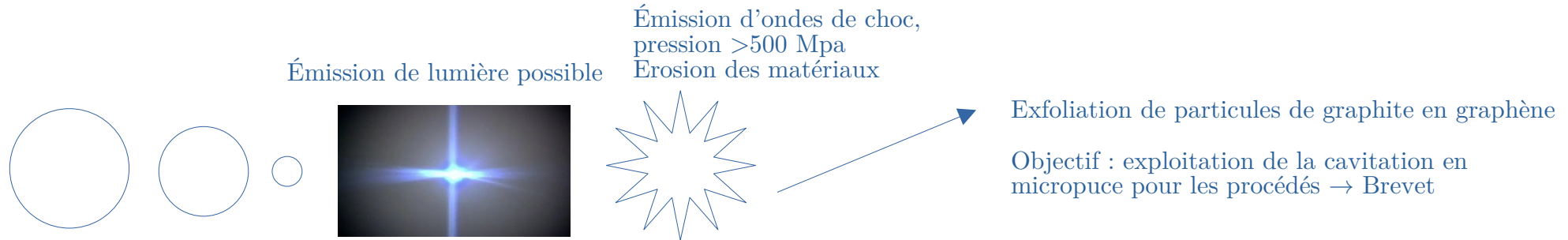
Micro-systèmes fluidiques
(semi) transparents

Méthodes de mesures optiques, visualisation des écoulements



Cavitation sur puce / Contexte : Collapse des bulles en cavitation

Exploitation de la violence du collapse (re-condensation rapide) des bulles en cavitation sur puce



Condensation rapide des bulles

→ voir film

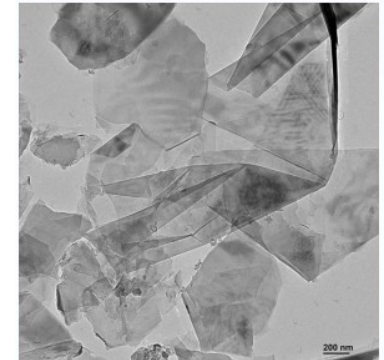
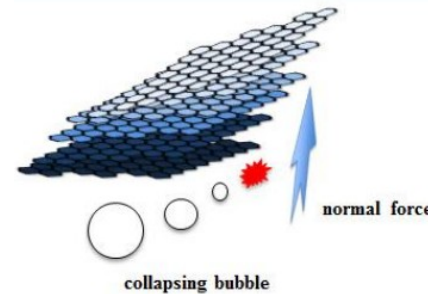
Luminescence et chimiluminescence induite par la cavitation en micro fluidique

Littérature : Emission de lumière observée en CA bulle isolée + CH à l'arrière d'hydrofoil taille macroscopique, pas étudiée en microfluidique

Cause : ionisation des gaz à l'intérieur de la bulle

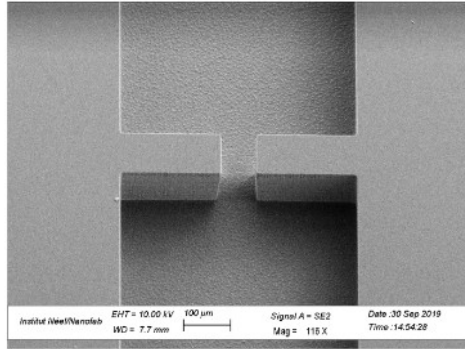
Ojectif : Meilleure compréhension des mécanismes en jeu dans un écoulement cavitant en micro-système

Particule de graphite d=1 µm → Graphène bi et mono couche : 200 x 200 x 0.3-0.7 nm

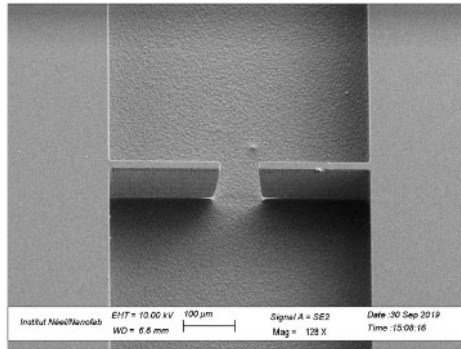


Cavitation sur puce / Géométrie et installation expérimentale

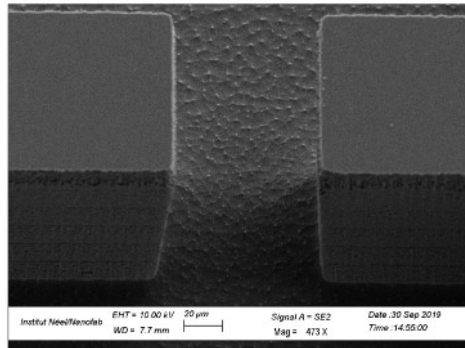
Micro-diaphragme



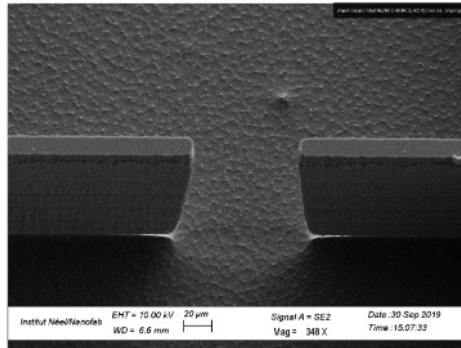
(a)



(b)

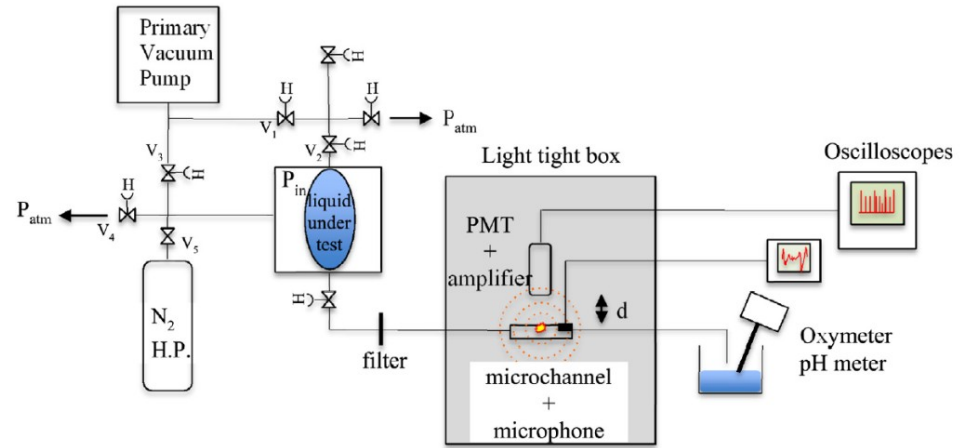


(c)



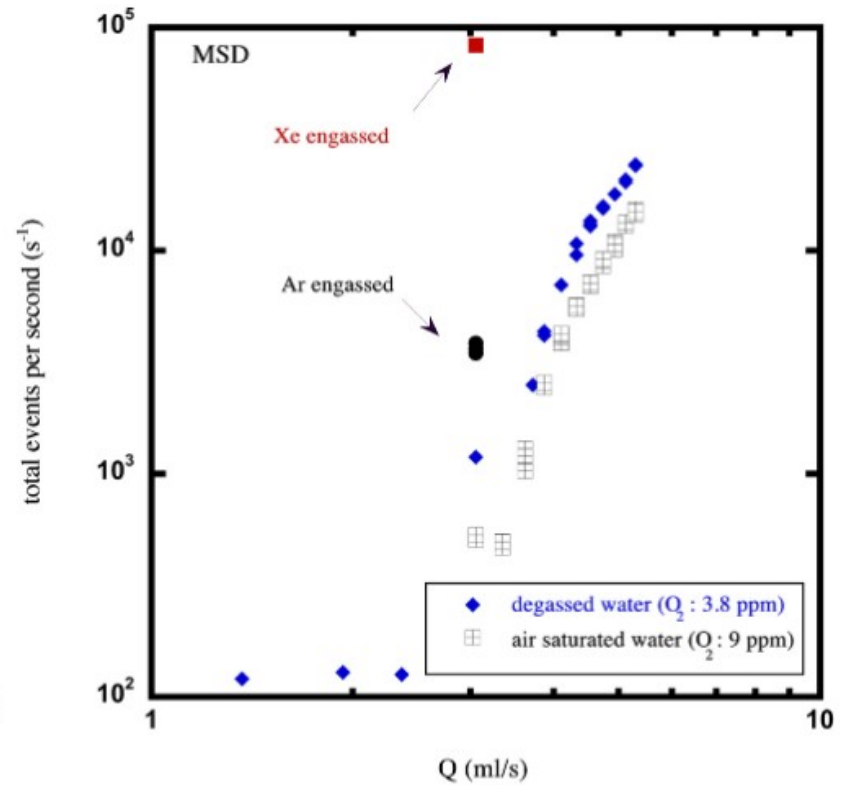
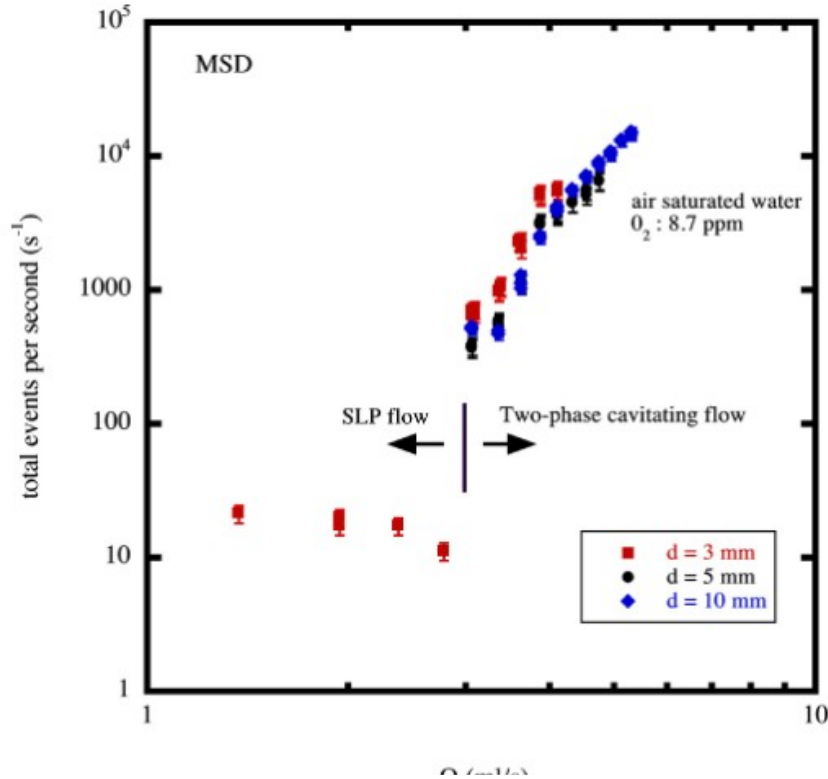
(d)

$W=500 \mu\text{m}$ $w=20-50 \mu\text{m}$ $h=100 \mu\text{m}$



→ voir film

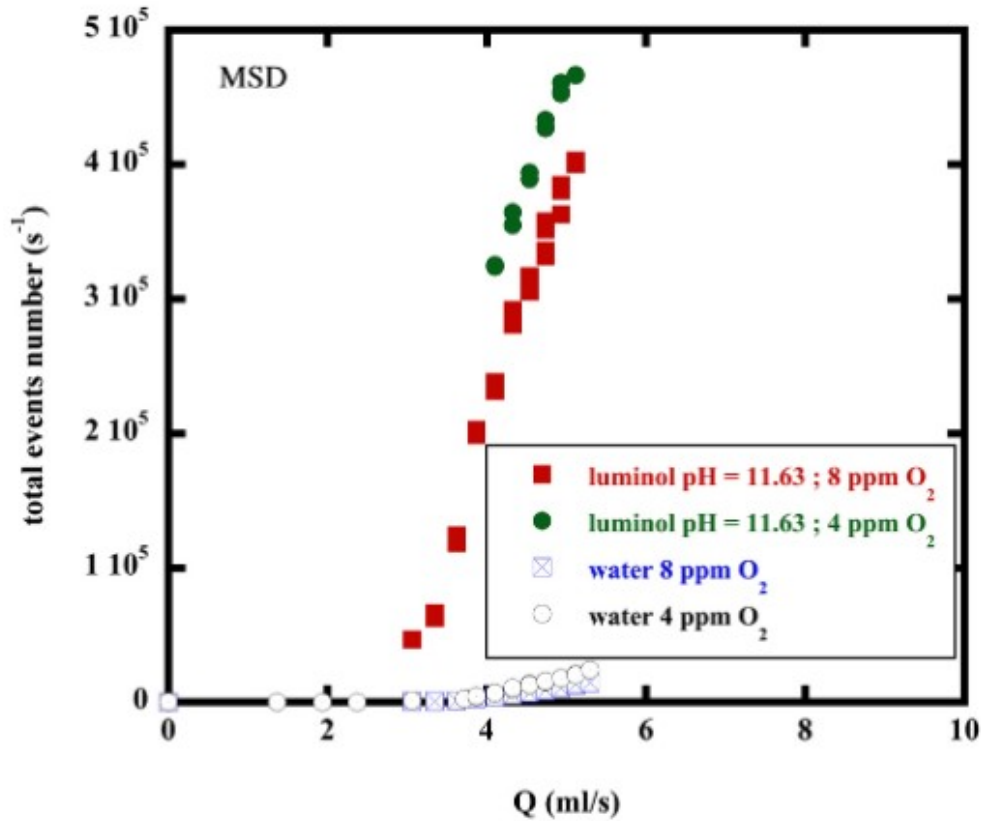
Cavitation sur puce / Luminescence et effet des gaz dissous



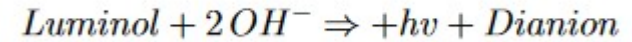
- Mesure de la fréquence d'émission de photon vs Qv avec de l'eau en conditions ambiantes
- Effet du régime d'écoulement : monophasique 10 Hz vs avec cavitation : loi puissance $>10^4$ hz

- En accord avec la littérature sur sonoluminescence → augmentation du taux d'émission de photons par
- Dégazage = car collapse plus violent
 - Dissolution de gaz rares = plasma plus lumineux

Cavitation sur puce / Chimiluminescence

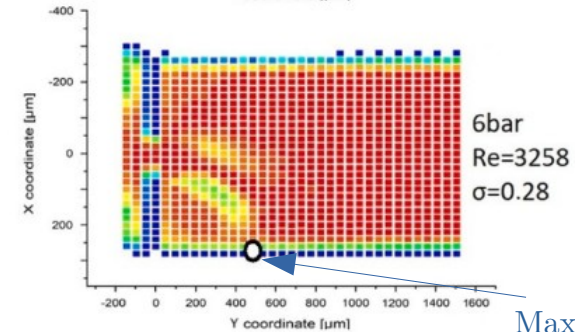
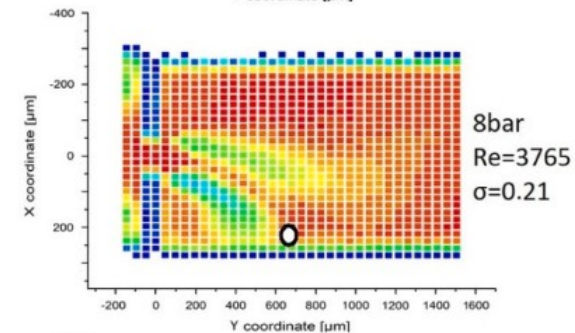
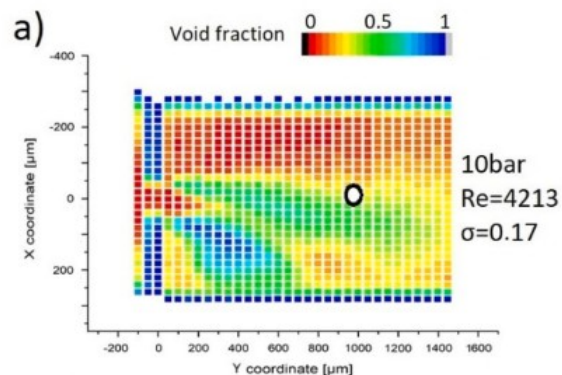


- Ajout de luminol en solution aqueuse

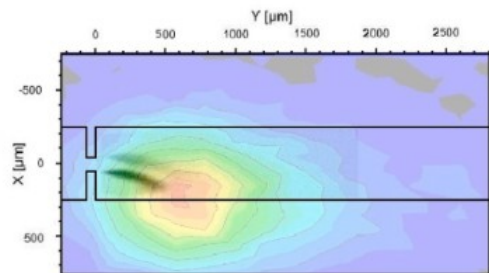
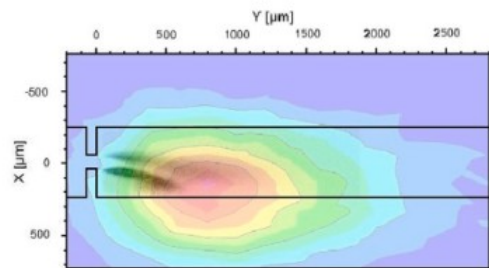
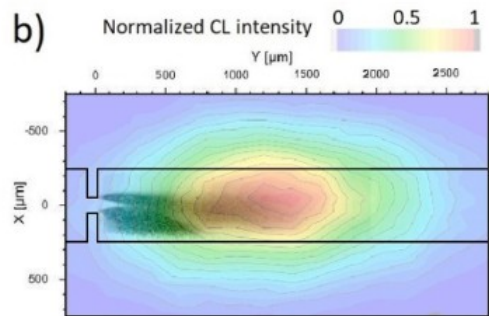


- Mise en évidence de la production d'ion hydroxyde OH^-
- Production de photon X20 $> 4 \cdot 10^5 \text{ Hz}$
- Encore un effet du dégazage du liquide
→ passage à une étude 2D

Cavitation sur puce / Chimiluminescence en 2D



Maximum de l'intensité de CL

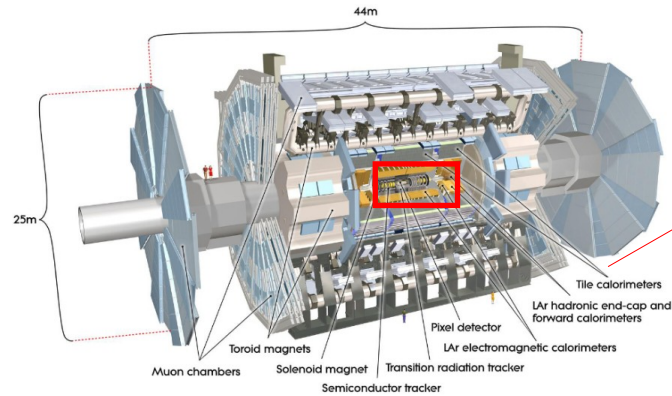


- Ajout d'une platine micrometrique 20 μm + PMT
- Méthode LIF au point \rightarrow \sim fraction de gaz
- Maximum de l'intensité de CL = extrémité des poches dans les zones de collapse des bulles
- Mise au point d'une méthode 2D de quantification de l'activité de formation des ions hydroxyde OH^-
- \rightarrow Utilisable pour le prototypage rapide des réacteurs chimiques où la production d'ion OH^- est importante (ex : traitement de l'eau)

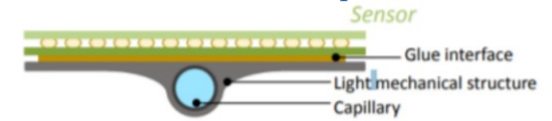
Podbevsek et al. 2018 Ultrasonics - Sonochemistry
 Podbevsek et al. 2021 Ultrasonics - Sonochemistry

Ebullition sur puce / Contexte : Le système de refroidissement des capteur PIXEL

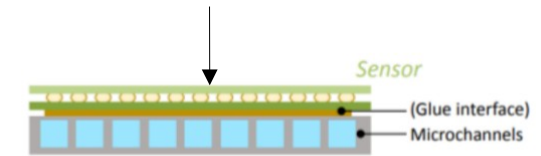
Structure interne de l'expérience ATLAS (LHC)



Système de refroidissement capteur PIXEL



LHC 2029 : Mini-canal unique $D_h=2.5\text{mm}$



Génération suivante : Multi micro-canaux $D_h=0.2\text{mm}$

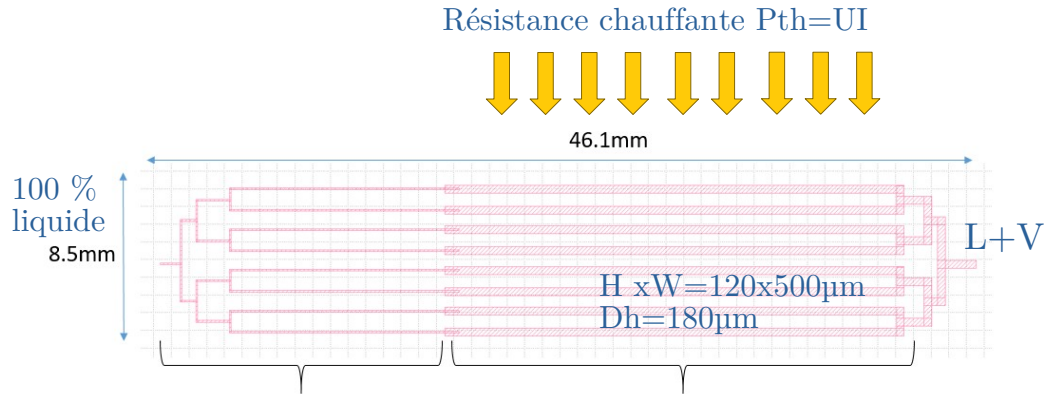
Principales contraintes pour le système de refroidissement des capteurs PIXEL du CERN

- Taille de capteur : $2 \times 2\text{cm}$
- Stratégie de refroidissement: ébullition du CO_2 à T constant en microcanaux directement matrice Si du capteur
- Faible différence de température entre le fluide et le silicium
- Refroidissement homogène sans assèchement de paroi = titre maximal vapeur $X_{\text{max}} < 40\%$
- Microcanaux = réduction de la masse et du volume du système de refroidissement

Travaux antérieurs : projet AIDA-2020 a identifié que cette solution était intéressante

Besoin d'études complémentaires, développement de la visualisation d'écoulement et d'outils de simulation → Thèse Maxime Vacher

Ebullition sur puce / Géométrie et instrumentation

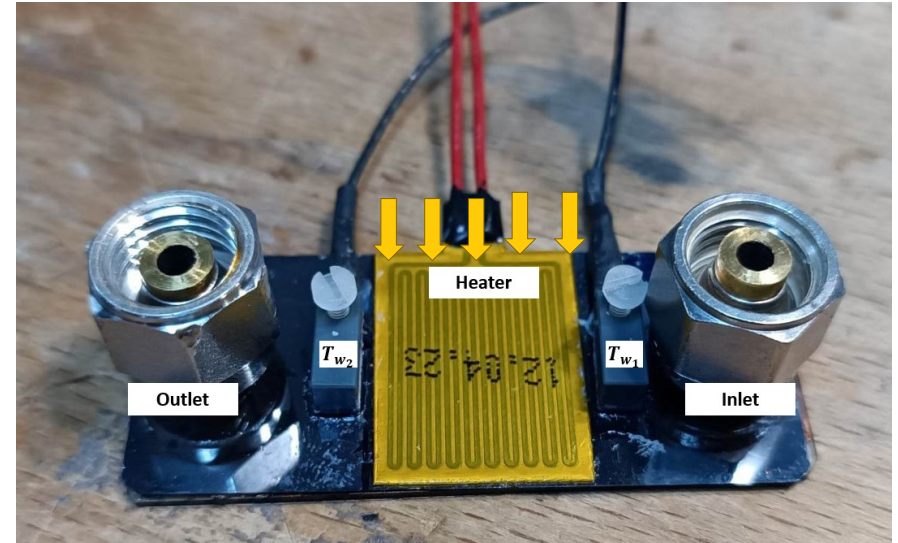


Détente = chute de pression
= nucléation/formation des bulles

Croissance des bulles
= refroidissement du Si



Face avant



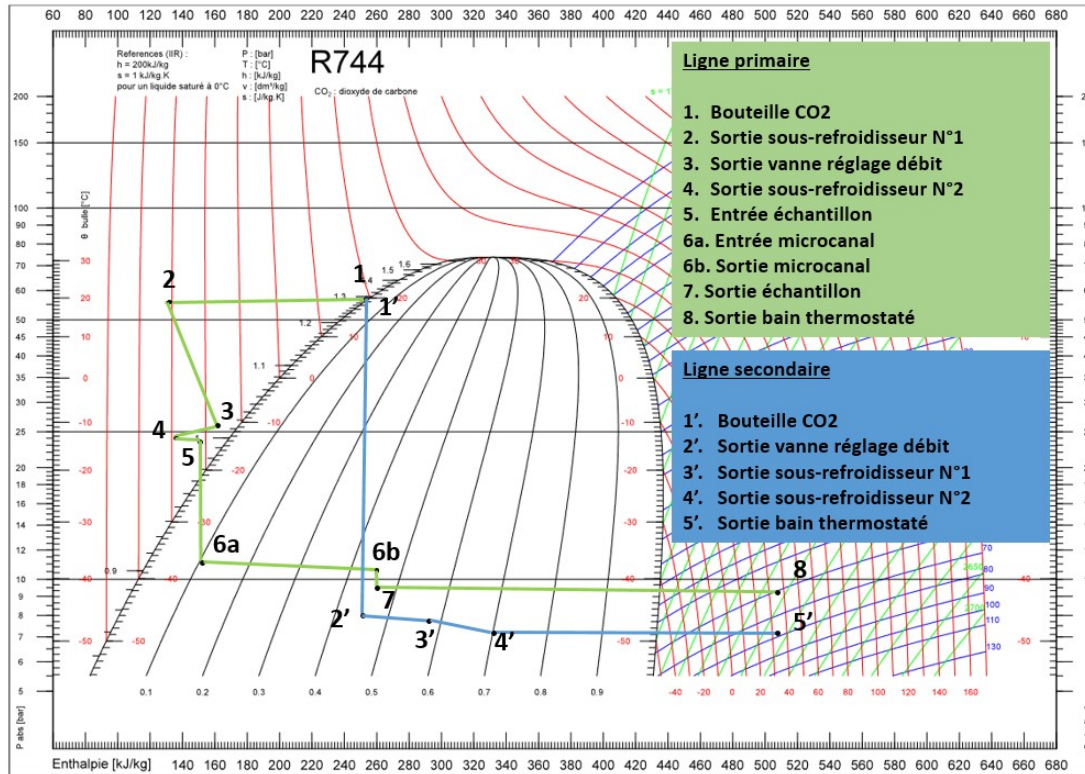
Face arrière

Coefficient de transfert de chaleur $h = P_{th} / S / (T_w - T_{sat})$

Nombre de Nusselt

$Nu = h D_h / l_L$

Ebullition sur puce / Installation expérimentale et visualisation



Visualisation avec éclairage incident à travers hublot

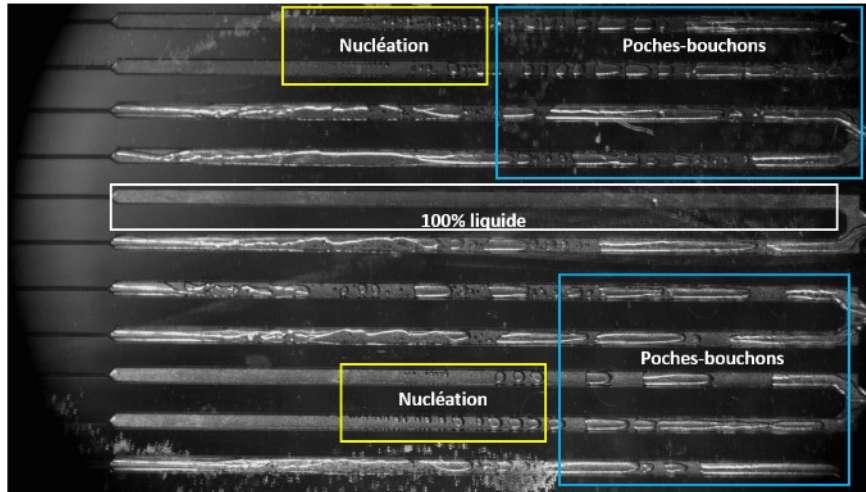
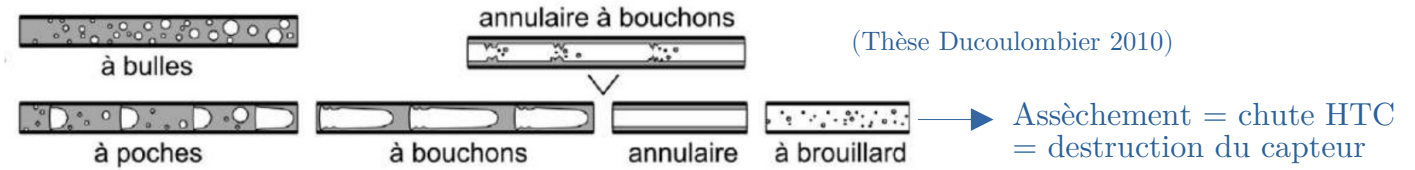
Camera rapide : Phantom Veo
1000 fps, temps exposition 20 μ s (U ~1-2 m/s)

Objectif : Binoculaire Olympus x7-x90 / WD~10 cm

Eclairage : Komi cyclop 1 / 120W / 3 LED

Boucle ouverte au CO₂ avec 2 lignes d'écoulement pour permettre de travailler à faible débit (<1g/s) avec contrainte 100 % liquide en entrée échantillon
Température opératoire: T_{sat} = -35°C
Echantillon placé dans une enceinte sous vide

Ebullition sur puce / Régime d'écoulement : homogénéité des régimes dans les canaux



$X_{in} = 5.9\%$ Régime poche/bouchon, nucléation, train de bulles non confinées, liquide

$X_{in} = 9.4\%$ Régime poche/bouchon dans tous les canaux

- Régime homogène dans les canaux si pas trop proche des conditions de saturation en entrée $\text{Min}(X_{in}) > 8\%$
= prédominance du régime poche/bouchon + homogène dans les canaux

Ebullition sur puce / Traitement d'images



Image brute en niveau de gris (I)

Ebullition sur puce / Traitement d'images



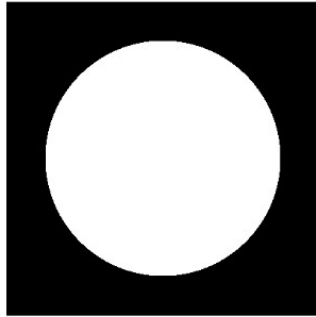
Gradient de l'image en niveaux de gris $\rightarrow |\text{grad}(I)|$

Ebullition sur puce / Traitement d'images

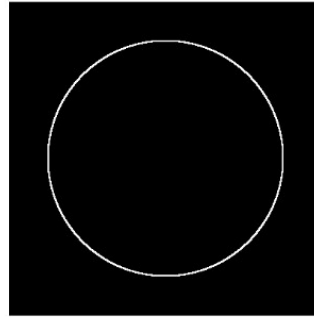


Seuillage sur gradient de l'image \rightarrow $\text{pixel}(|\text{grad}(I)| > \text{seuil}) = 1$ le reste 0

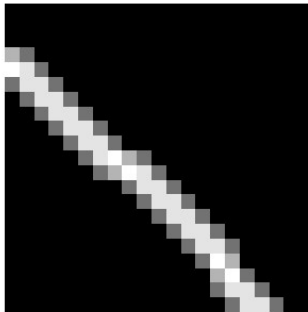
Ebullition sur puce / Traitement d'images – un mot sur le choix du filtre gradient



(a)

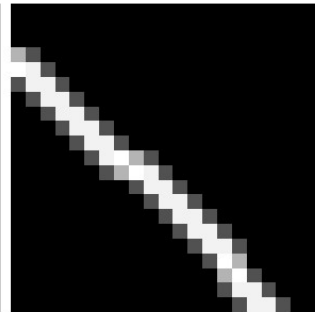


(b)



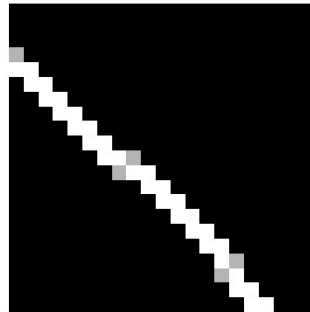
(c)

Filtre Prewit
(5 niveaux #)



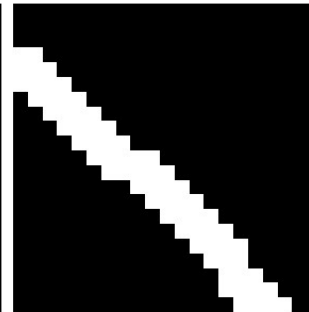
(d)

Filtre Sobel
(5 niveaux #)



(e)

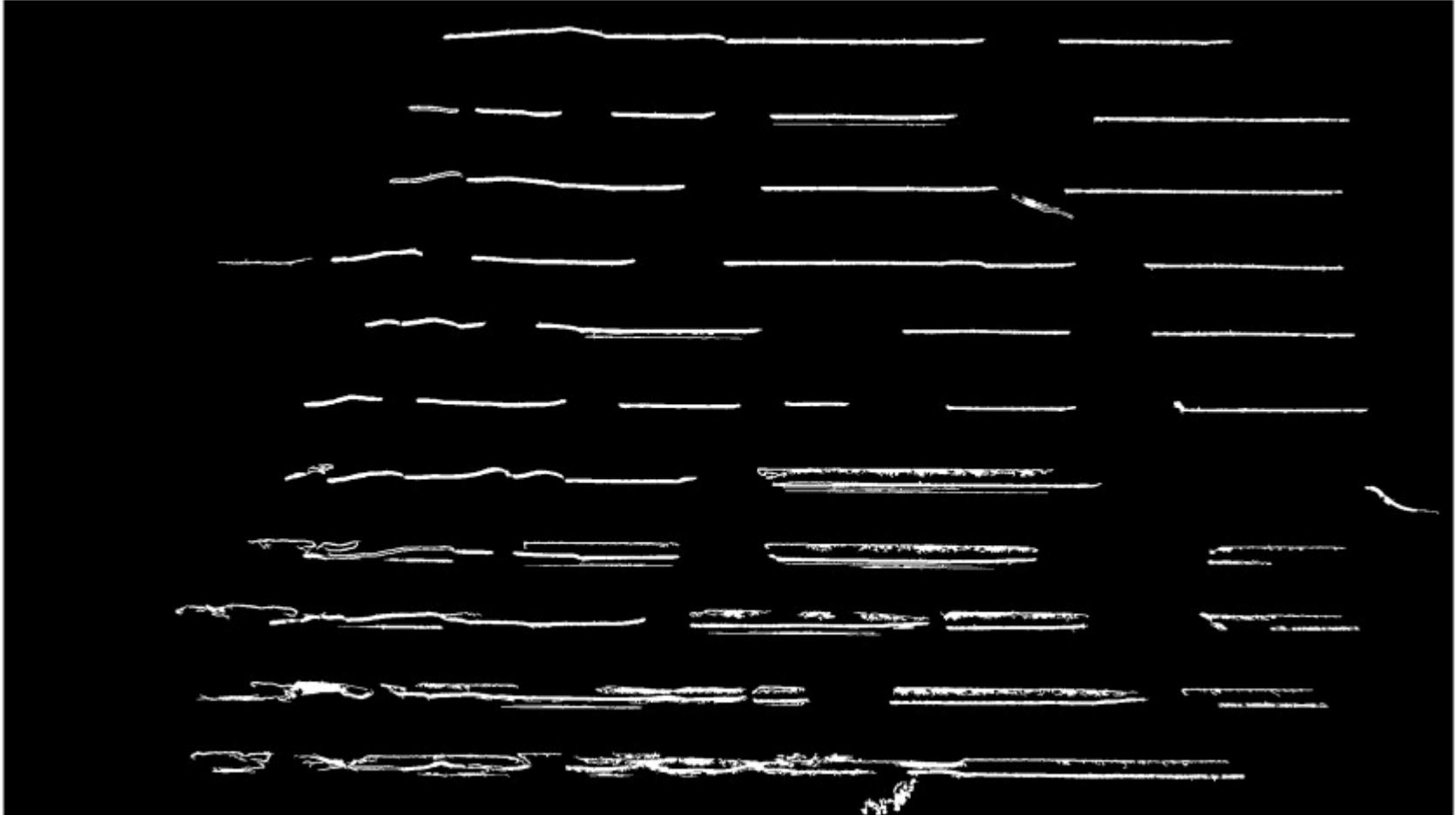
Schéma centré
(2 niveaux proches)



(f)

Filtre sigma (Marmottant & Villermaux 2004)
(1 niveau = isotrope mais+épais)

Ebullition sur puce / Traitement d'images



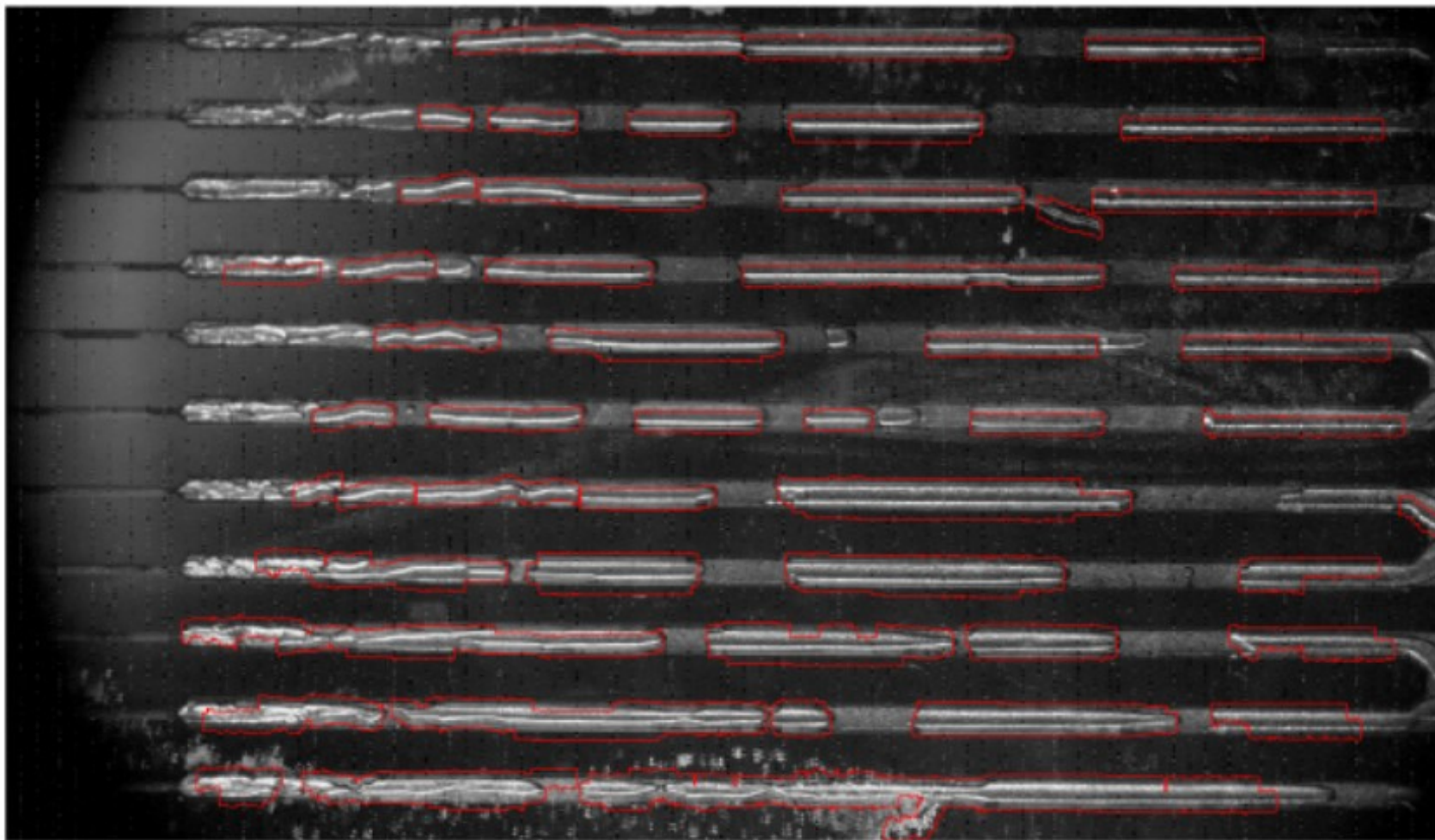
Elimination du bruit par définition d'une surface minimale \rightarrow $\text{pixel}(S < S_{\text{min}}) = 0 \rightarrow$ détection reflets

Ebullition sur puce / Traitement d'images



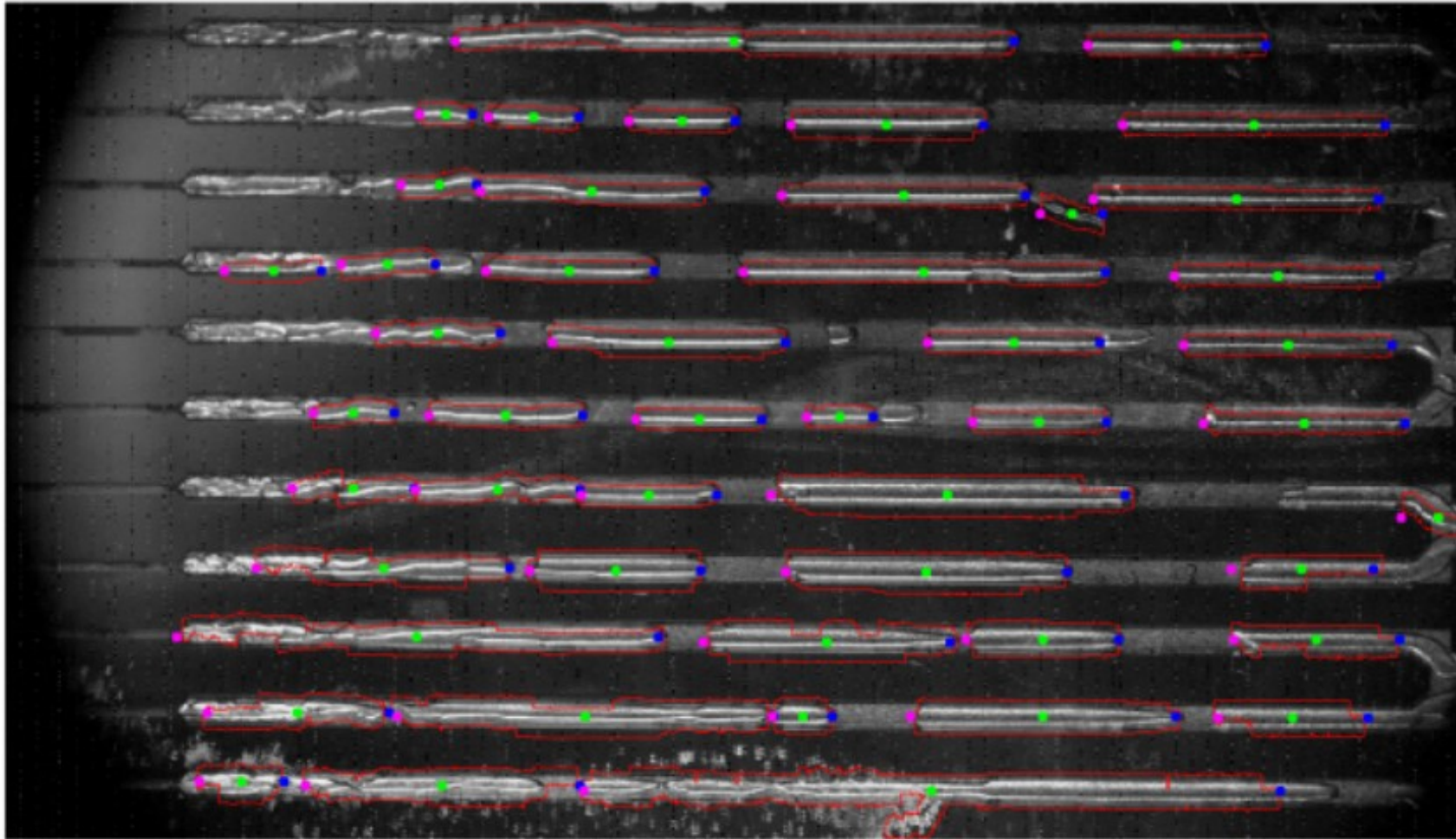
Translation des reflets sur largeur d'un canal = représentation approximative d'une bulle

Ebullition sur puce / Traitement d'images



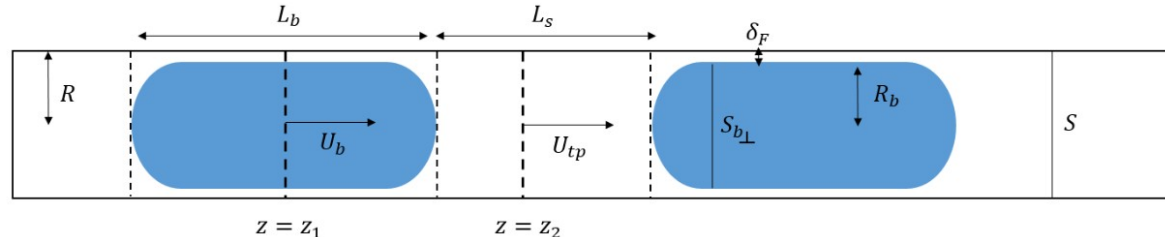
Résultat final avec détection approximative des contours

Ebullition sur puce / Traitement d'images

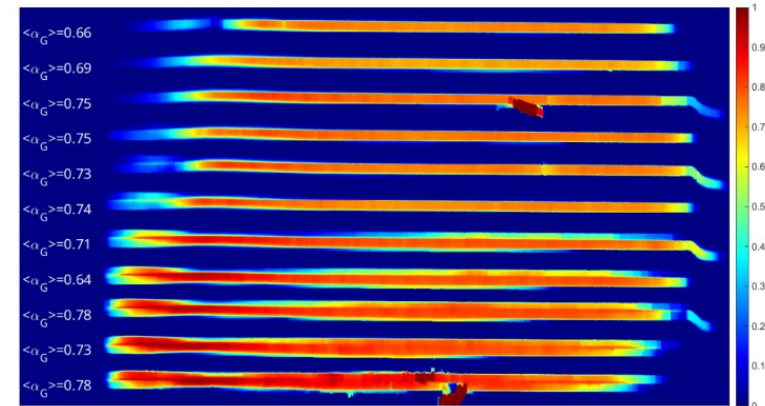


Résultat final avec détection CG, début et fin de bulle → voir film

Ebullition sur puce / Résultats issus du traitement d'images



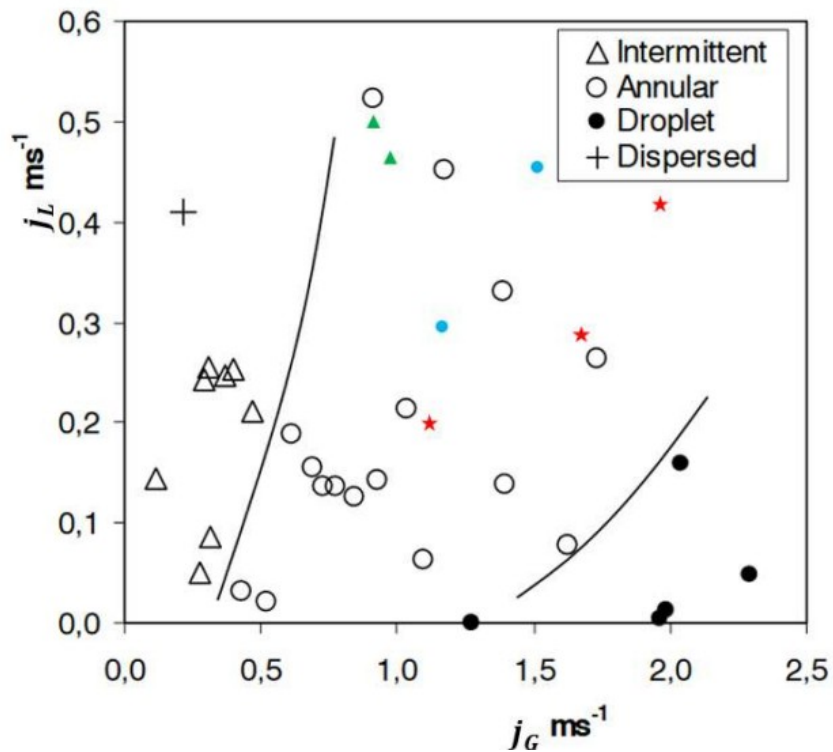
- Longueur de bulle L_b
- Longueur de bouchon liquide L_s
- Vitesse de bulle U_b
- Fréquence de bullage f_b
- Taux de croissance de bulle dL_b/dt
- Fraction volumique de gaz $\alpha = V_v / (V_v + V_l)$
- Titre en vapeur = fraction massique $X = m_v / (m_v + m_l)$



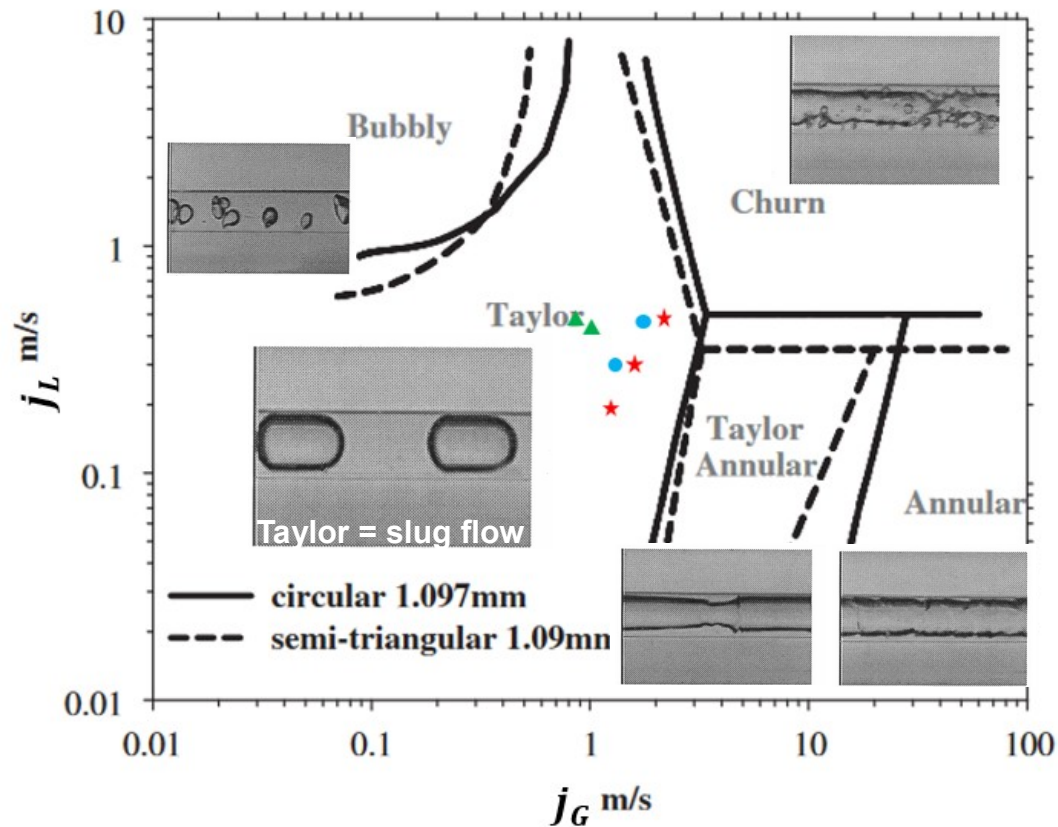
Géométrie 2D → Champ de fraction de gaz →
info. sur homogénéité α et U_b

Ebullition sur puce / Prédiction du régime d'écoulement : cartographie

$J_G = Q_G/S$ et $J_L = Q_L/S$

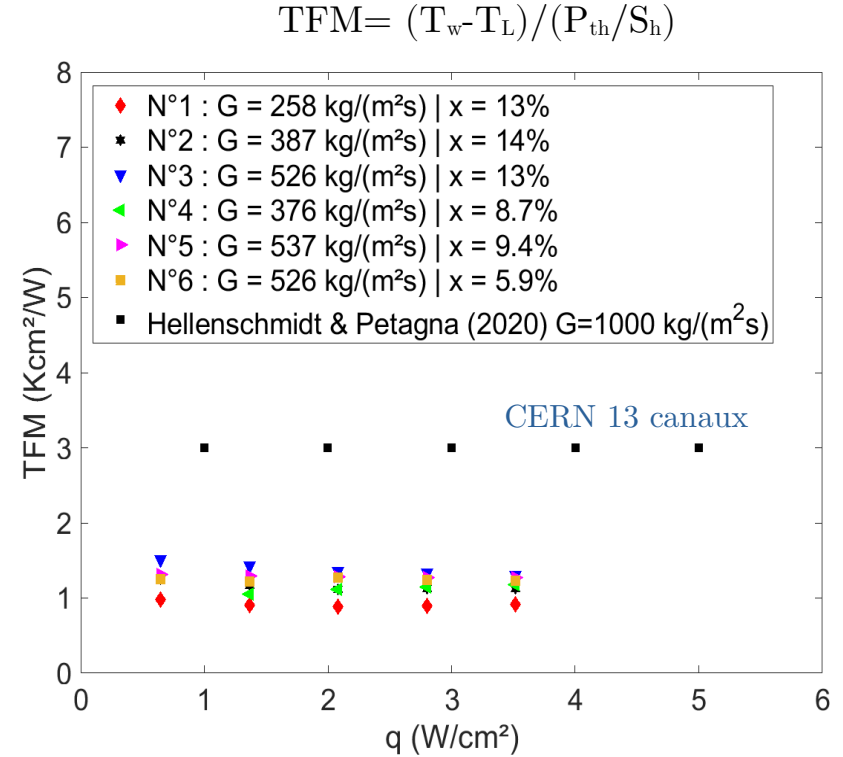
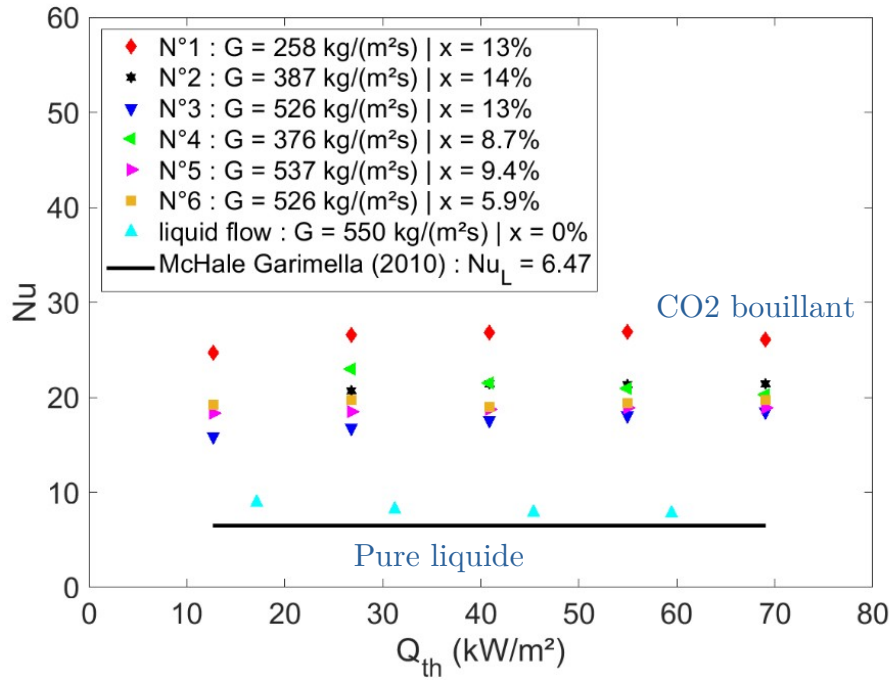


Pettersen 2004 avec
changement de phase CO₂

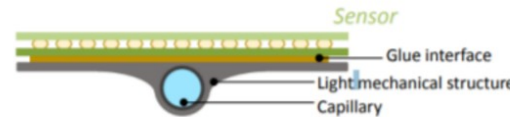


Tripplert et al. 1999 adiabatique air/water

Ebullition sur puce / Performances thermiques



- Indépendance du flux de chaleur sur Nu
- Nu diphasique 2 à 3 > Nu pure liquide
- Observation diminution de Nu avec vitesse liquide



Single mini-channel 2.5mm
→ TFM ~ 12 Kcm²/W



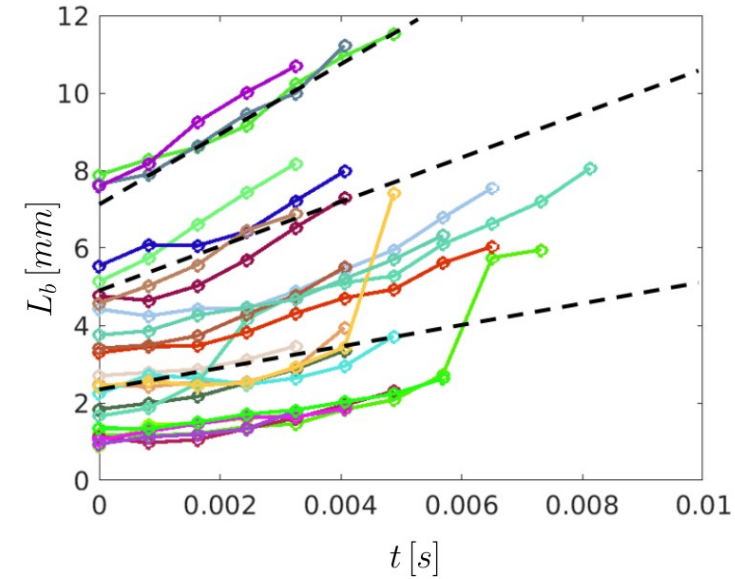
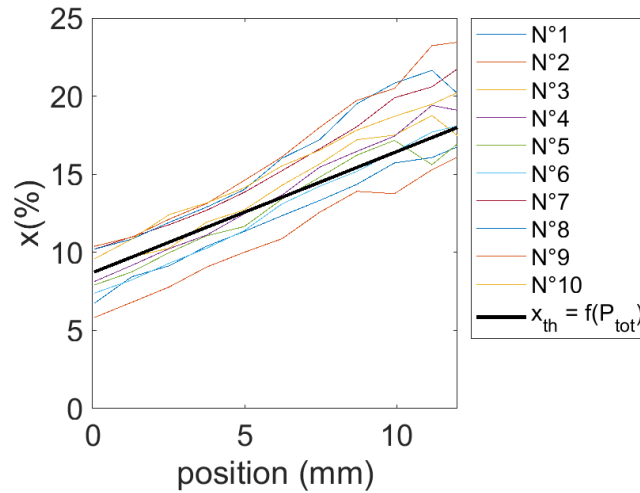
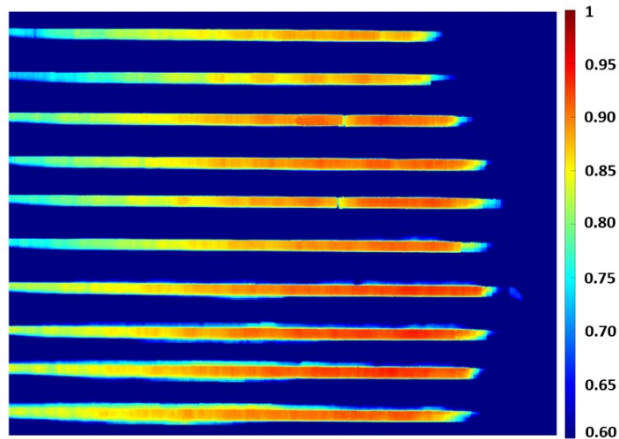
Multi micro-channels 0.2mm
→ TFM < 3 Kcm²/W

Ebullition sur puce / Croissance des bulles

Homogénéité en vitesse (débit) et fraction de gaz pour $X_{in} > 8\%$

Augmentation du titre vapeur = en accord avec le bilan thermique global
+ $X_{max} = 25\% < 40\%$ pas d'assèchement

Croissance théorique
= nouveau modèle faisant le lien entre flux thermique et dynamique des bulles



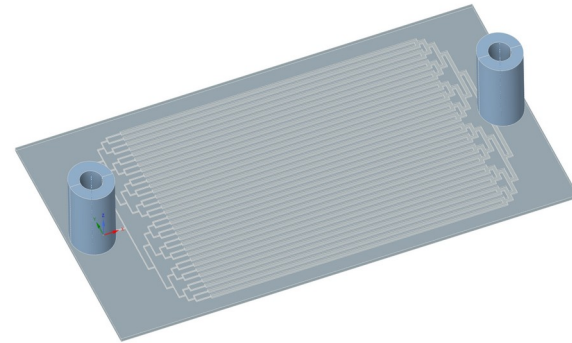
Conclusions et Perspectives

Cavitation sur puce

- Emission de lumière également présente en microsystème cavitant
- Localisée dans la zone de collapse des bulles
- Mise en évidence production radicaux OH^-
- Développement suivi lagrangien des bulles ?
- Développement en cours de mesures thermiques par LIF

Ebullition sur puce

- Ecoulement poche/bouchon prédominant
- Design proposé : compatible aux contraintes du CERN régime d'écoulement et refroidissement homogènes $X_{in} > 8\%$
- Visualisation permis lien dynamique de bulle et flux de chaleur
- Exploration d'autres géométries et T_{sat}
- Visualisation : système d'éclairage sur l'axe optique
- Microfabrication de sonde de température (+ de précision)
- Simulation des écoulements avec changement de phase



Merci pour votre attention !