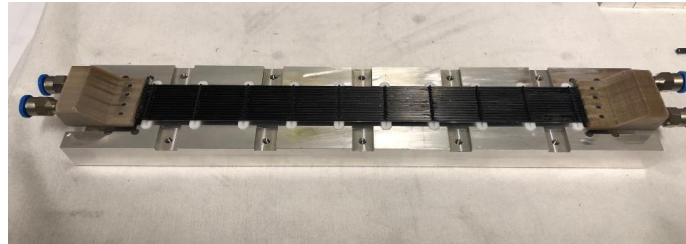
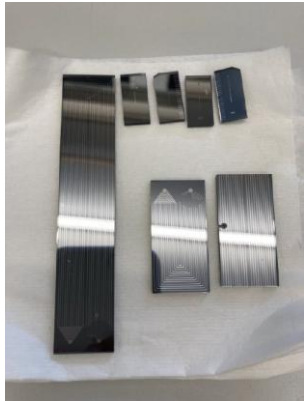
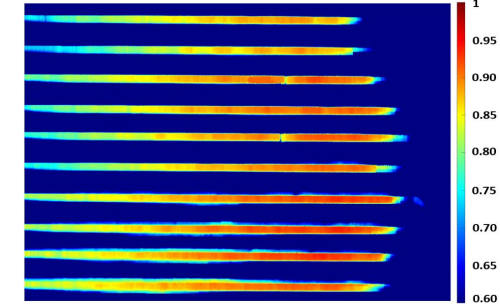
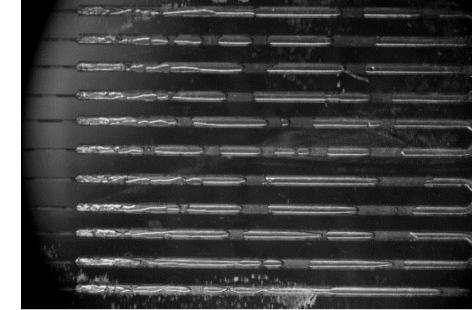
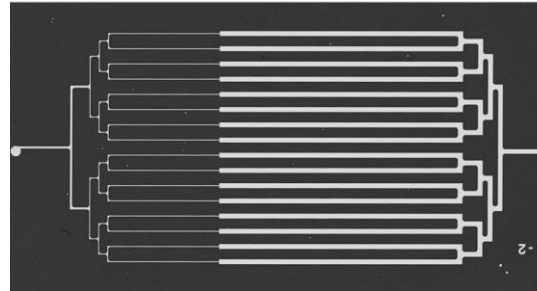
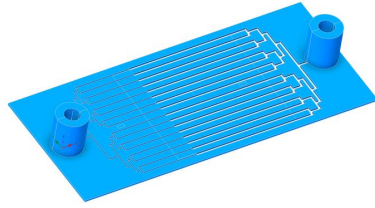
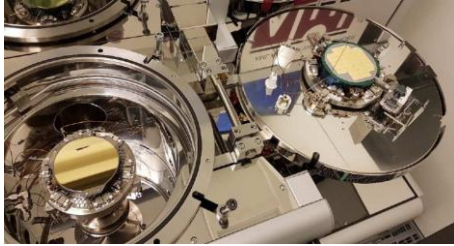


Refroidissement des détecteurs par ébullition de CO₂ en microcanaux



CPPM

Stéphan Beurthey
Julien Cogan
Mathieu Perrin-Terrin

LPNHE

Giovanni Calderini
Francesco Crescioli
Bianca Raciti

LEGI

Damien Colombet
Frédéric Ayela
Clément Lassagne

LPSC

Johann Collot
Pierre Delebecque
Julien Giraud

LAPP

Roman Kossakowski
Stéphane Jezequel
Jessica Levêque

Motivation

Le refroidissement des capteurs pixel de nouvelle génération s'impose comme une problématique majeure
Avec une électronique de plus en plus performante → puissance dissipée très importante

→ Maîtriser la température des capteurs & diminuer le budget matière des échangeurs pour obtenir X/X0 faibles

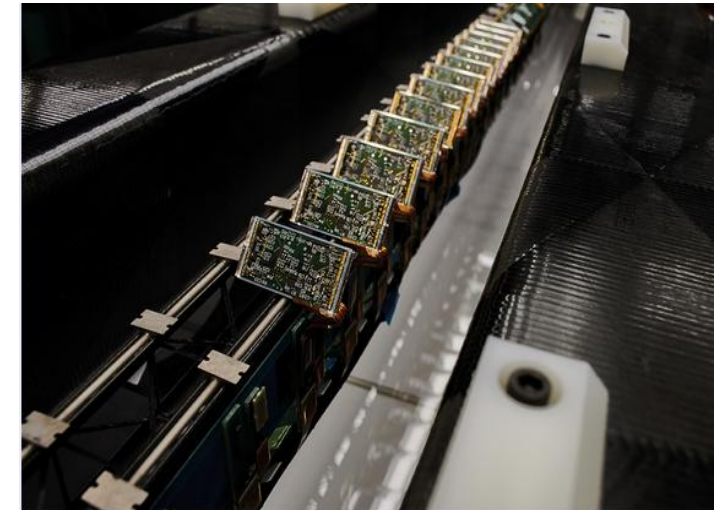
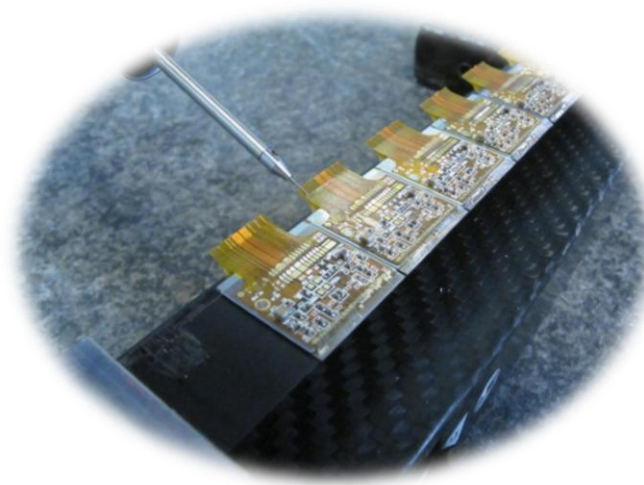
↳ Nécessité de développer des solutions innovantes → Echangeurs à microcanaux



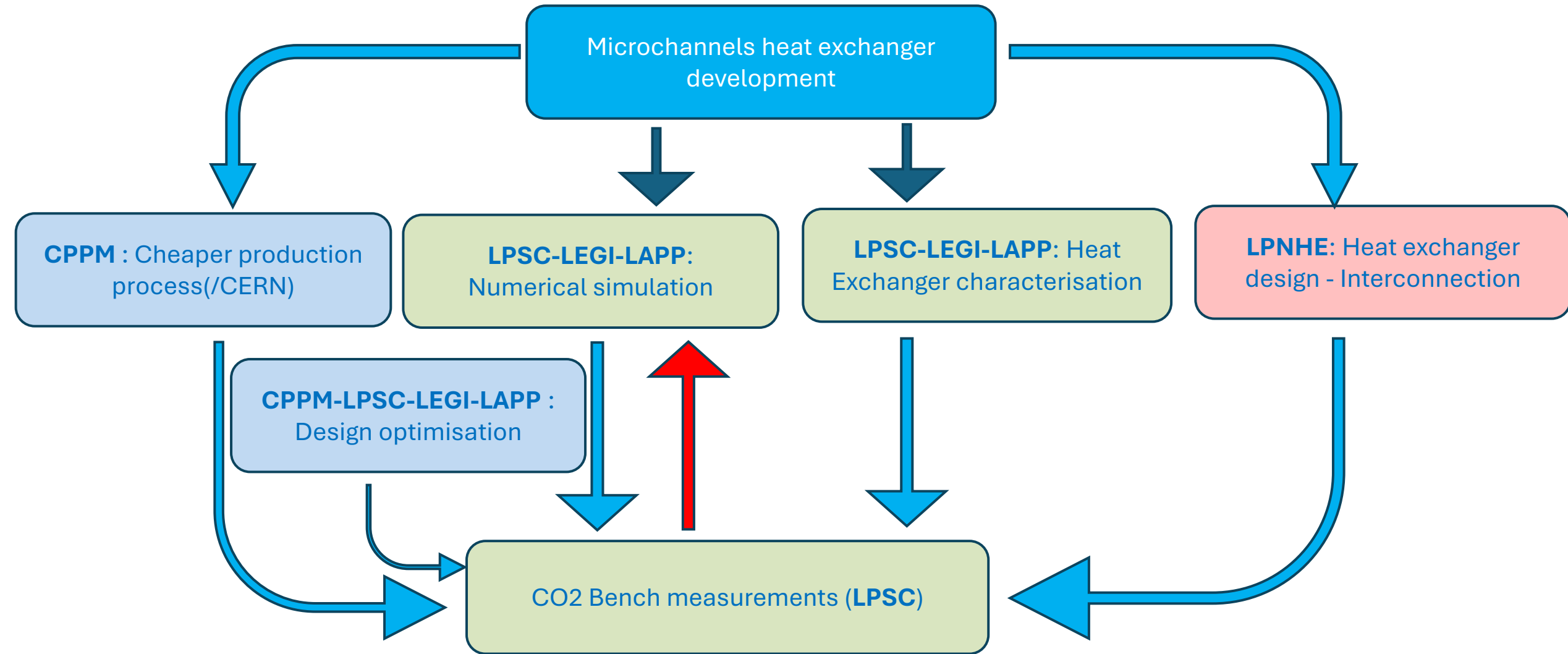
R&T Fédération de différents laboratoires de l'IN2P3

Evolution des densités de puissances :

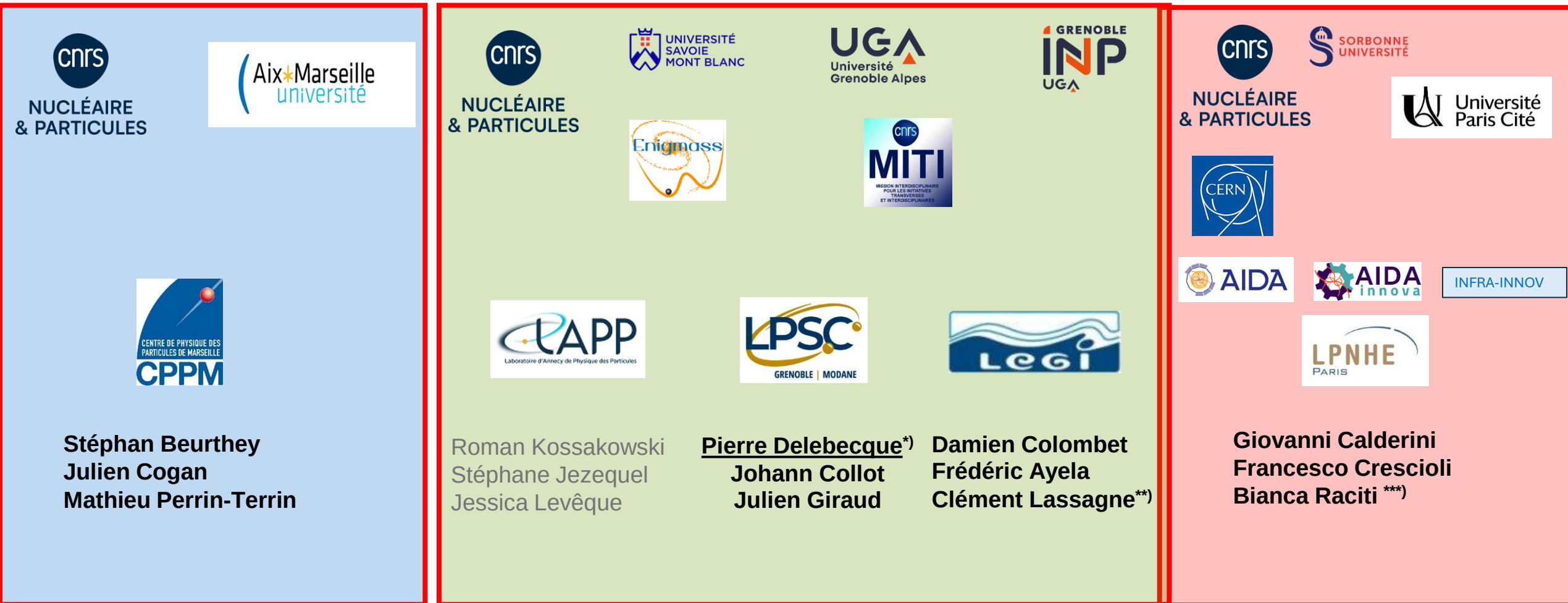
- ATLAS IBL : 0.7 W/ cm²
- ATLAS ITK outer barrel: 0.7 W/ cm²
- LHCb upgrade 1: ~1 W/ cm²
- LHCb High luminosity : 1 à 2 W/ cm²
- FCC e⁺ e⁻ : 0.2 W/cm²
- FCC hh : 2 W/cm² → 20 kW/m²



Objectifs scientifiques et techniques du projet



R&T IN2P3 - Implication des unités et organismes associés



^{*)} Project leader

^{**)} PhD student LEGI-LPSC

^{***)} Post. Doc. LPNHE

Collaboration DRD8 WP3 “Detector cooling”



Axes de développement

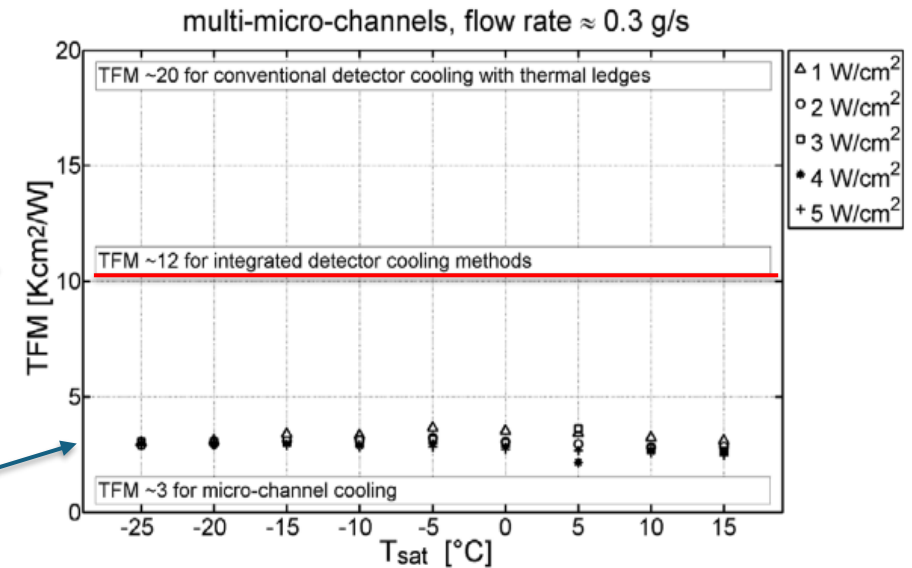
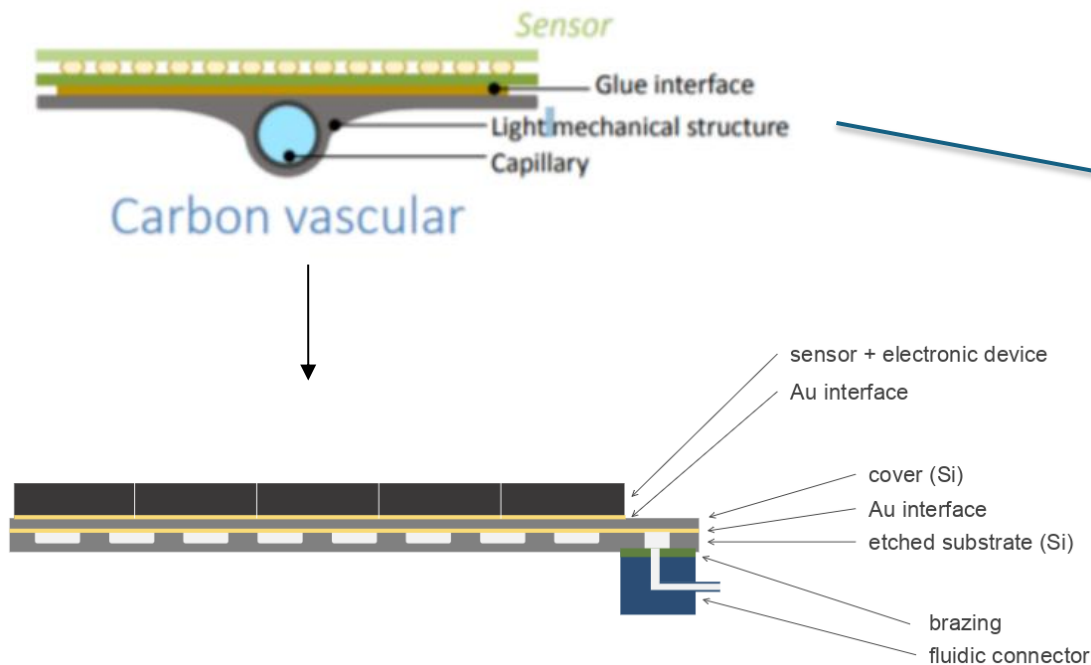
Améliorer les performances TFM (Thermal Figure of Merit) des échangeurs

Développer de nouvelles méthodes de production des échangeurs en Si moins coûteuses

Développer des techniques de connexion

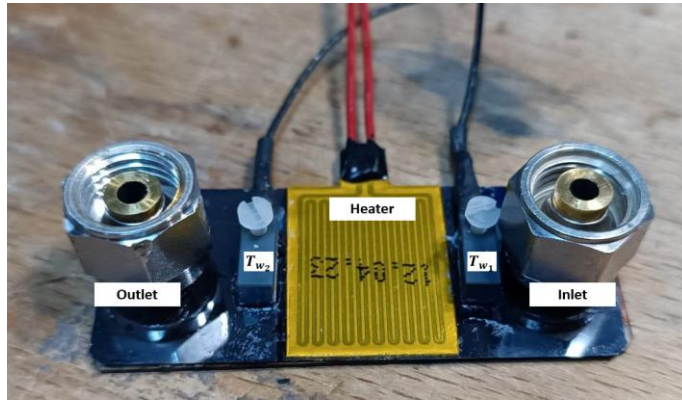
Disposer d'un banc de mesures pour caractériser les performances hydrauliques et thermiques

Mettre au point des modèles de simulation numérique des échangeurs → aider au dimensionnement des échangeurs

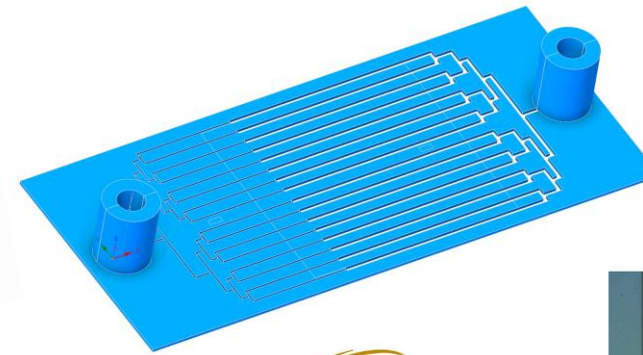
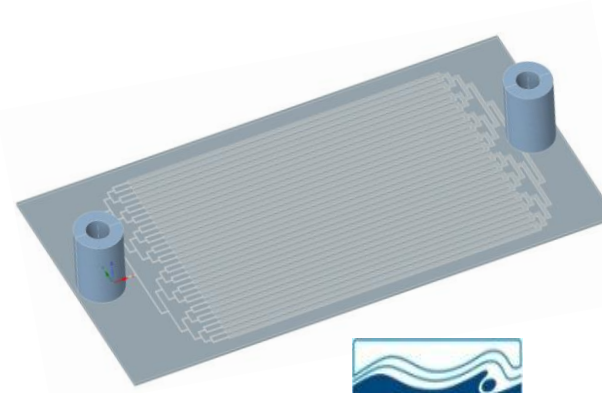


D.Hellenschmidt et al,
Nucl. Instrum. Meth. A 958 (2020) 162535

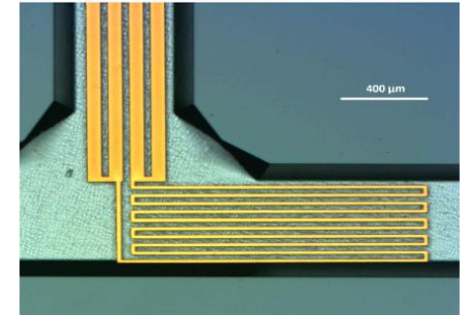
Développement échangeurs à microcanaux



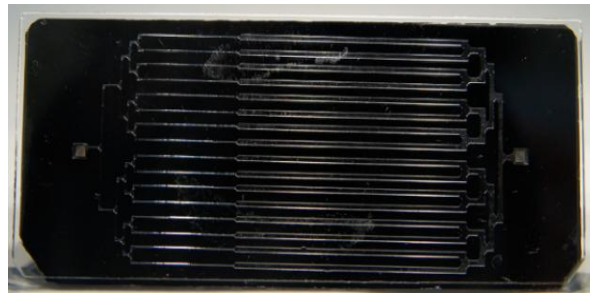
6 cm



Echangeur – design LPSC-LEGI

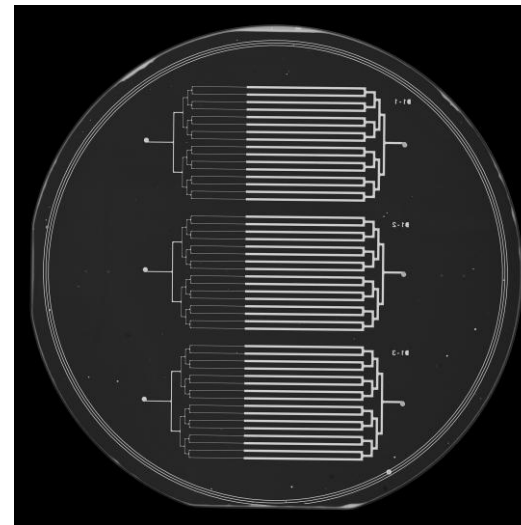


Capteur de température en or

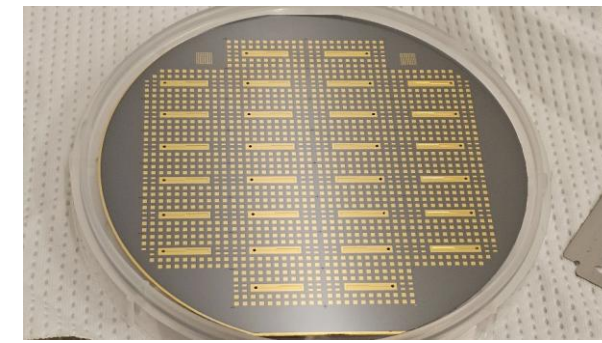
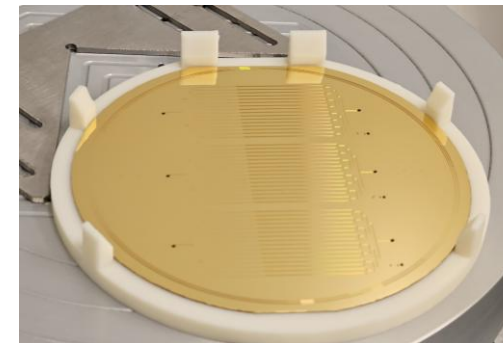


2,5cm

LEGI/LPSC échangeur à microcanaux et connexions
Fabrication LEGI – Plateforme Nanofab Grenoble
Thèse Maxime Vacher 2022-2024

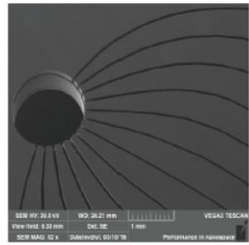


Fabrication CPPM

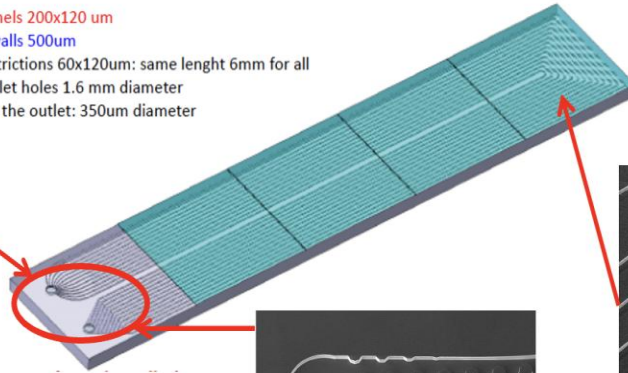


Wafers pour échantillon test de collage et tenue mécanique

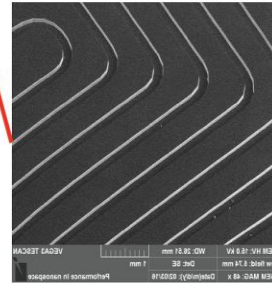
Développement échangeurs à microcanaux



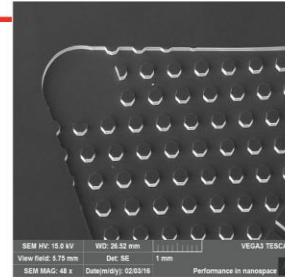
13 channels 200x120 μm
Silicon walls 500 μm
Inlet restrictions 60x120 μm : same length 6mm for all
Inlet outlet holes 1.6 mm diameter
Pillars in the outlet: 350 μm diameter



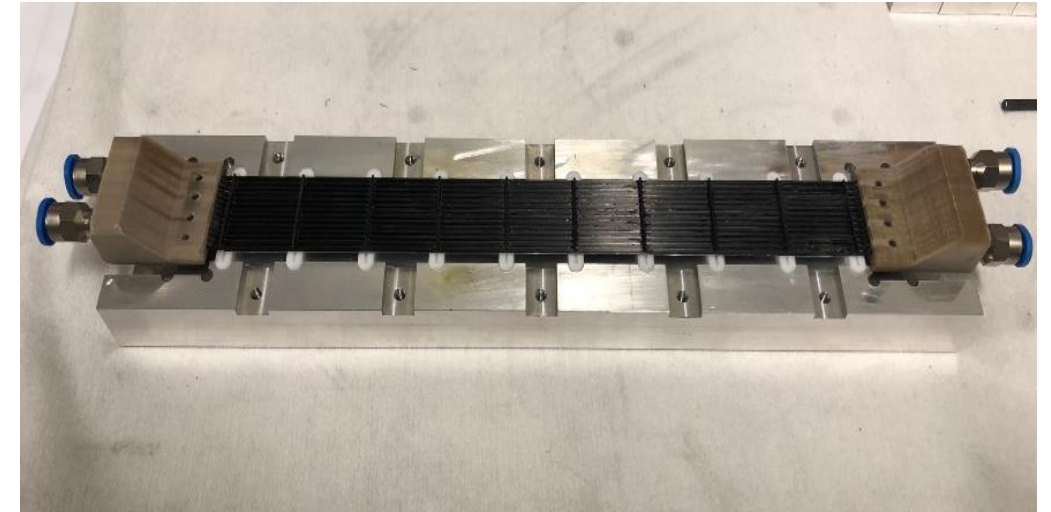
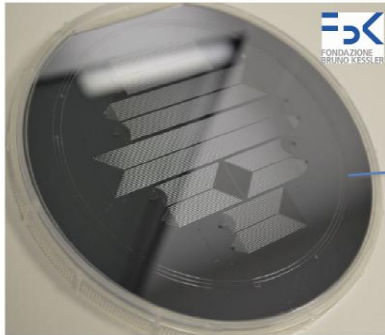
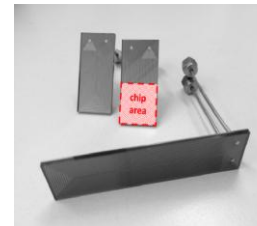
D Hellenschmidt et al,
Nucl. Instrum. Meth. A 958 (2020) 162535



Details of the channel design



Long channels running around the border for
better evaporation studies



Echangeurs de type assemblage de micro-tubes en carbone
(démonstrateur, collaboration avec INFN Pisa)

Développement échangeurs LPNHE

Développement de système de connectique

→ Interconnexion nécessaire des échangeurs pour le “scale up”

Connectique étanche et résistante aux pressions et températures opératoires
($P \rightarrow 75$ bar et $-50^\circ\text{C} < T < 10^\circ\text{C}$)

Eviter bouchage des microcanaux à la fabrication

Echangeurs Si → brasure ou scellement anodique Si/BF33

Echangeurs tubes en carbone → utilisation de connecteurs en céramique ou en peek

CPPM: Interconnexions par collage anodique (NEW)

Collage anodique (350°C , 800 V)

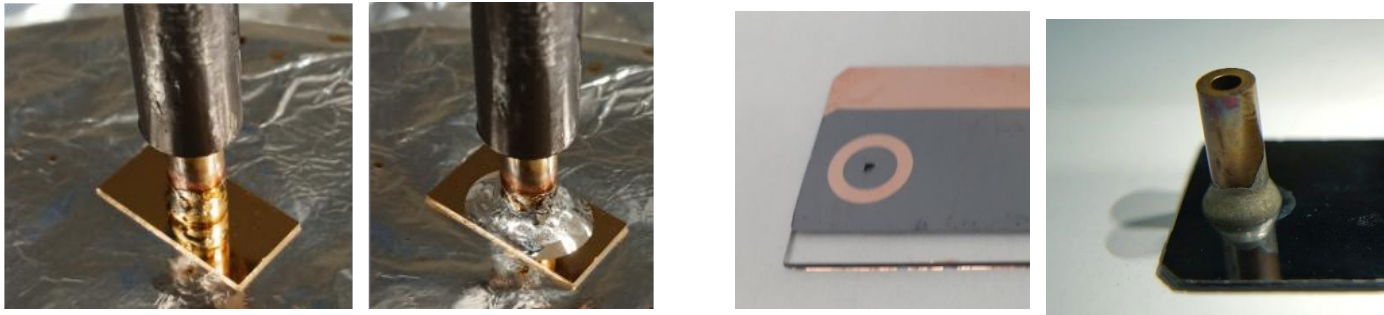
BF33(connecteur)/Si(plaque)

Dispositif de scellement « maison »

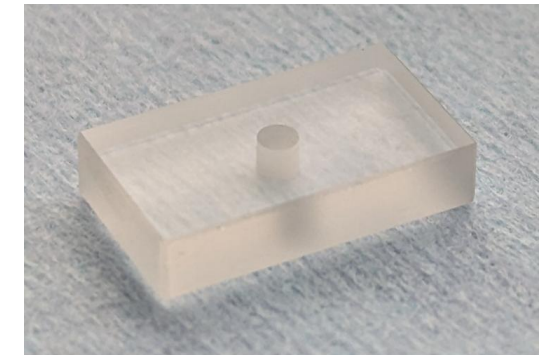
1ers résultats très encourageants

Permettrait aussi interconnexions (Si/BF33/Si)

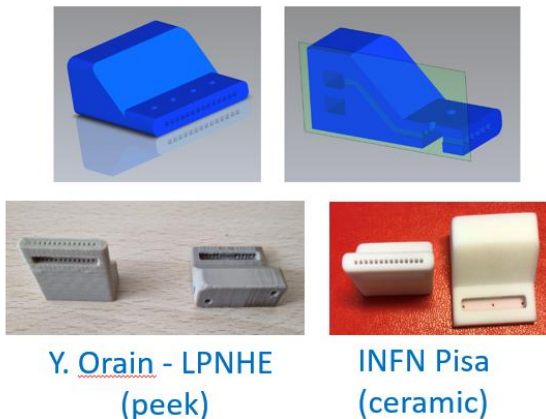
LEGI/LPSC: Brasure laiton / silicium



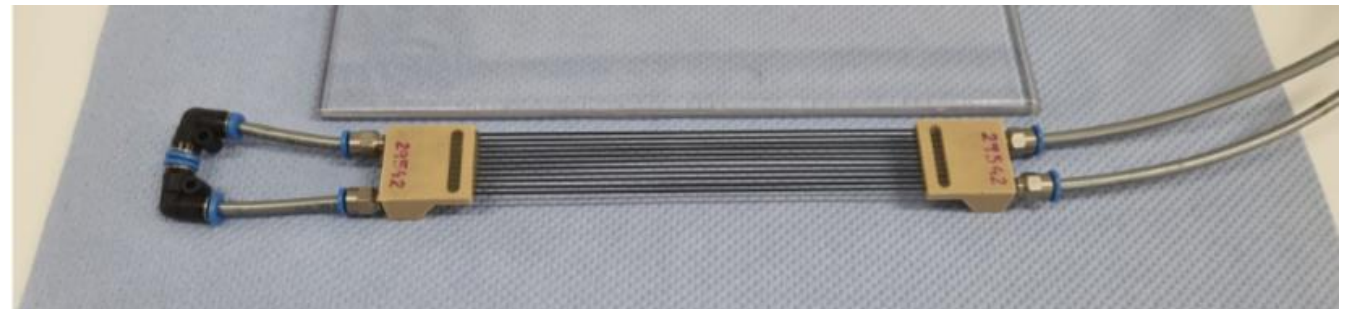
Connecteur test en BF33



LPNHE: Interconnexions par des connecteurs fabriqués par impression 3D

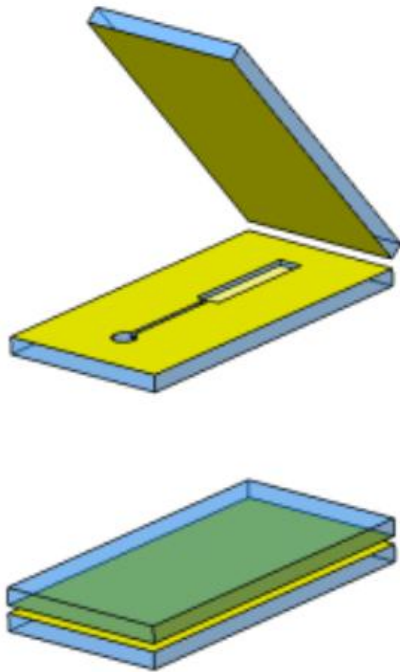


Démonstrateur échangeur « micro tubes en carbone » + connecteurs en peek
(collaboration avec INFN Pisa)

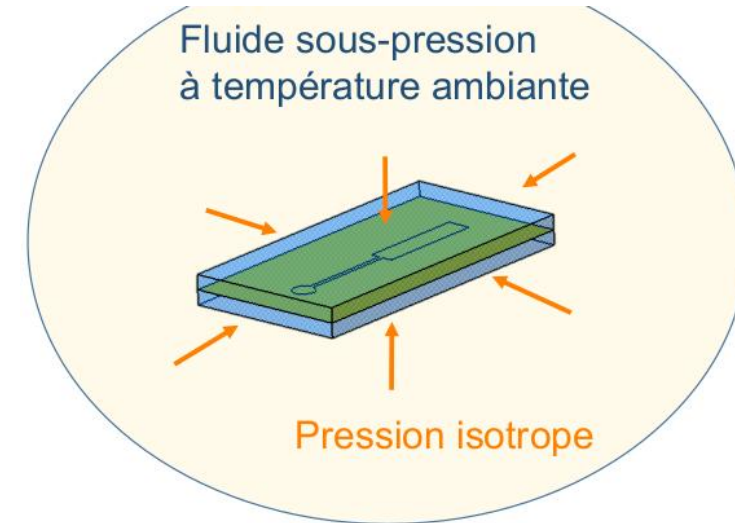


Développement d'un procédé de collage hyperbare Si/Si

CPPM : structure pour tests sous pression
= microcanal + réservoir



1/ Préparation des surfaces :
= dépôt Ti/Au 20 nm 350 nm
+ mise en contact



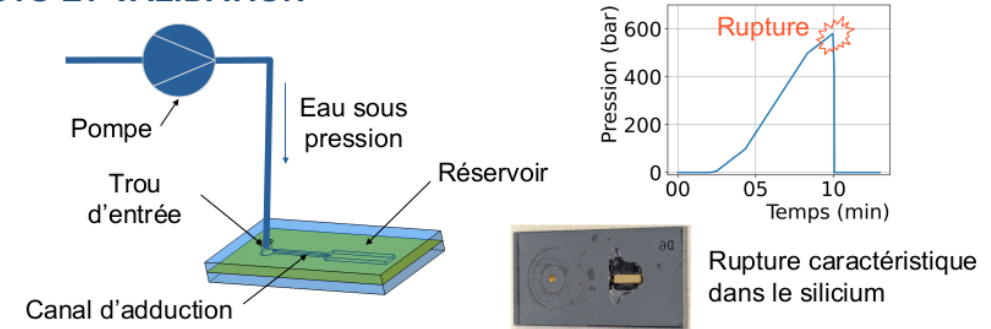
2/ Mise sous pression en caisson hyperbare
= collage par diffusion Au-Au @ 250 bar pendant 12h

Avantages:

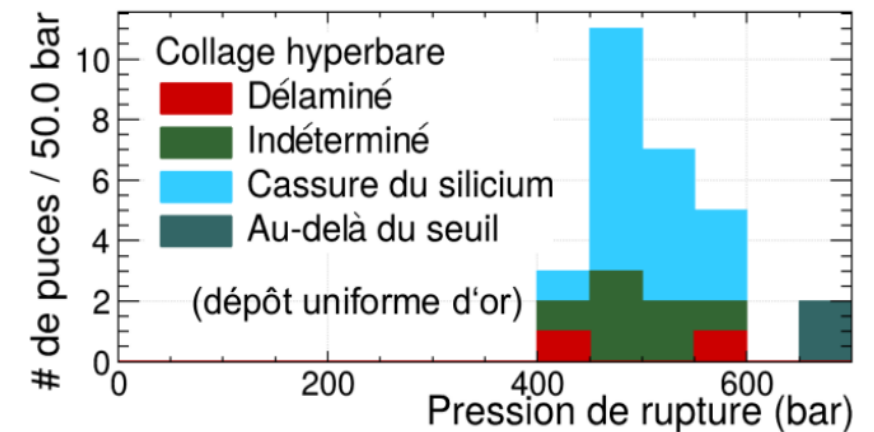
- collage à pression élevée
 - peu d'influence d'un défaut de planéité
 - collage possible de plusieurs puces
 - faible coût de l'opération
- = procédé simple adapté à la production en série

3/ Tests de rupture sous pression

TESTS ET VALIDATION



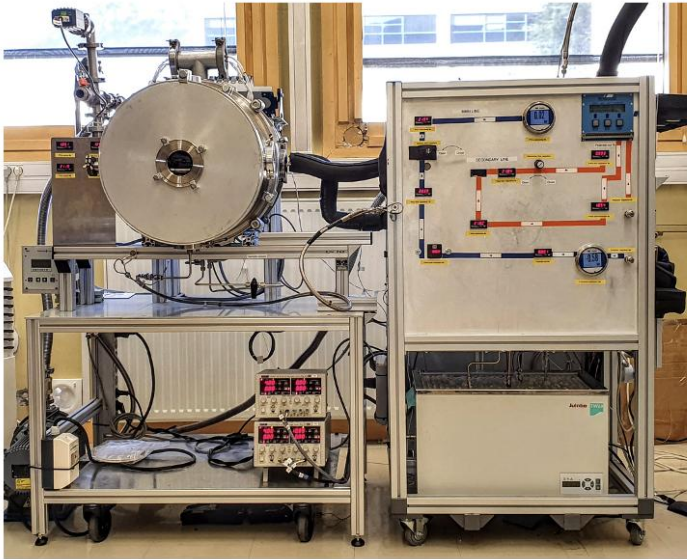
Résultat des tests en pression



Résiste à des pressions très élevées (>400 bar)
→ Travail en cours de valorisation

Caractérisation hydraulique et thermique des échangeurs sur banc d'essais

LPSC-LAPP-LEGI Banc CO2 au LPSC



Face arrière : instrumentation et connectiques

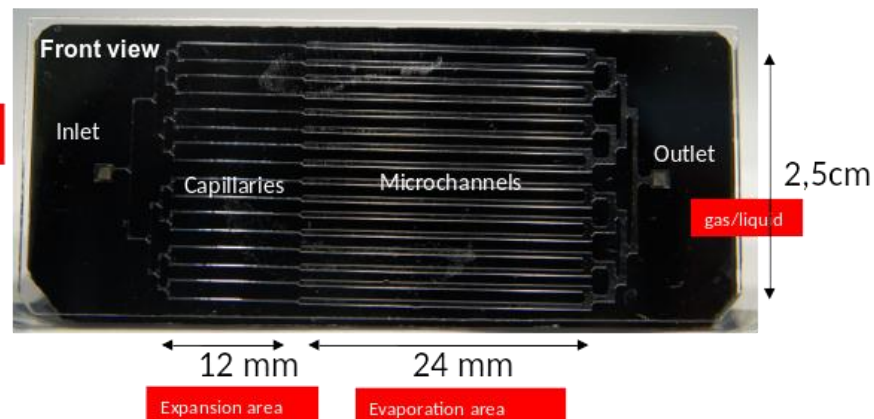
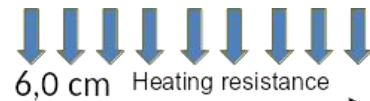


Fluide frigorigène: CO2 → faible PRG
Température de test échantillon -35°C
Débits typiques : 0.2 g/s à 1 g/s
Fraction volumique de gaz: 68 – 85%
Densité de puissance dissipée: 0.5 - 2 W/cm²

Défis : Limiter les apports de chaleur parasites

Evolutions : Régulation et automatisation (en cours)

Face avant : visualisation



Strong pressure decrease
= bubble nucleation

Heat exchange between flow and silicon
= bubble growth

Image brute de l'écoulement – caméra haute vitesse (1100 fps)



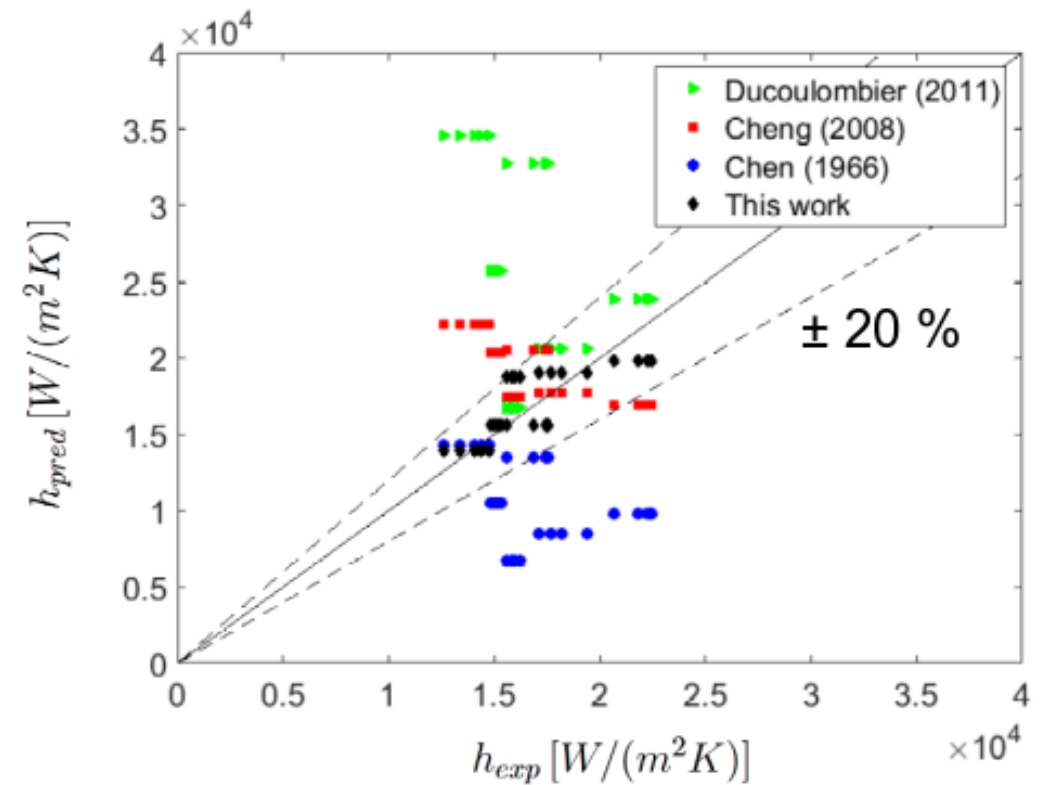
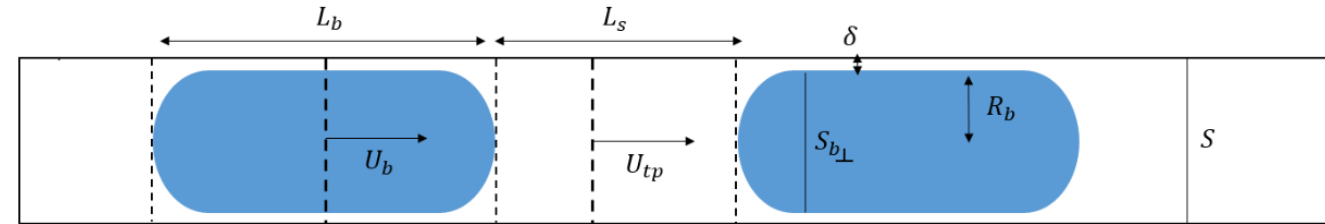
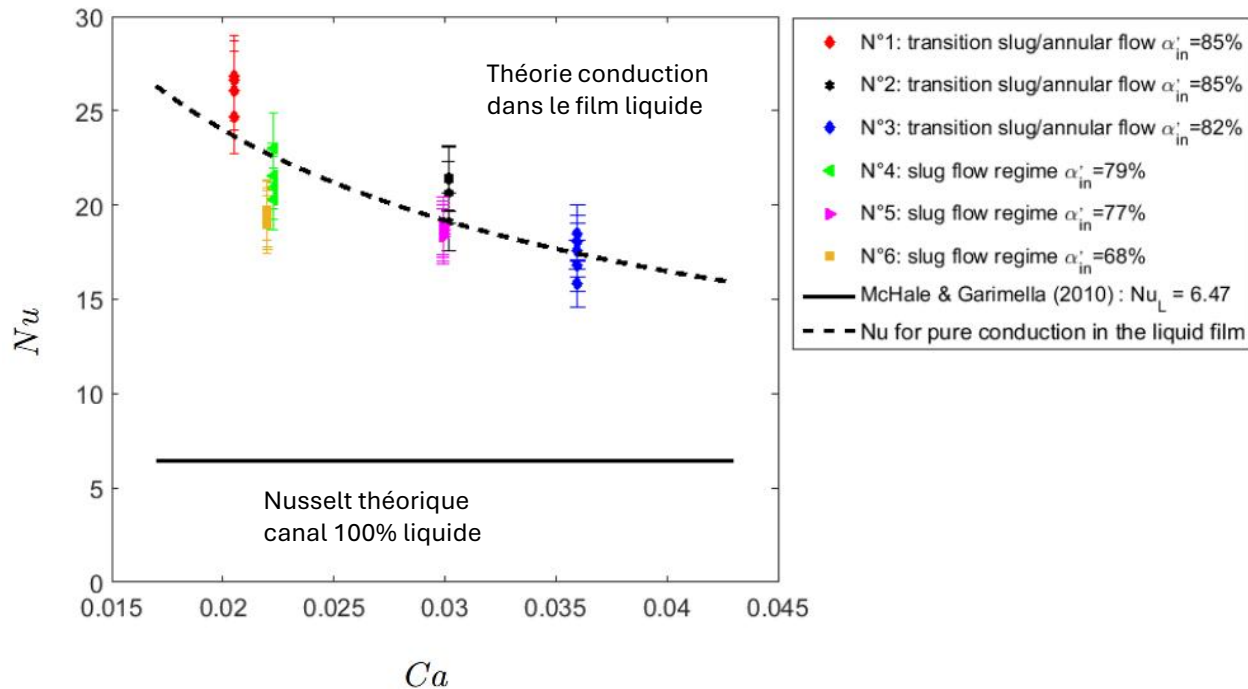
Exchangeur Si/Py: Performances thermiques à forte fraction de vapeur

$$Nu = \frac{Q}{\lambda_L(T_w - T_{sat})/D_h} = \frac{hD_h}{\lambda_L}$$

Conduction dans
le film liquide →

$$h = \lambda_L / \delta$$

$$Nu = \frac{hD_h}{\lambda_L} = \frac{D_h}{\delta} = 2 \left(\frac{1 + 2.5Ca^{2/3}}{1.34Ca^{2/3}} \right)$$



A forte fraction volumique de vapeur, le transfert de chaleur est piloté par la conduction dans le film liquide formé entre les bulles et les parois (Vacher et al. 2026, Int. Jour. Heat & Mass Trans.)

Conclusions - perspectives

Développement d'échangeurs micro-canaux en silicium et sous forme de tubes en carbone

Techniques de bonding hyperbare de plaques Si très prometteuses

→ Futurs tests échangeurs Si/Si sur banc CO2 pour confirmer le potentiel de cette technique de collage

Investigations à poursuivre sur les connexions (collage anodique, brasure, connecteurs en peek)

Banc d'essais CO2 performant permettant la caractérisation des échangeurs de type microcanaux

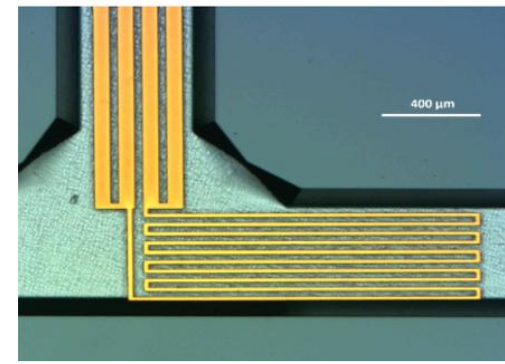
→ Future automatisé des séquences de mesures

Mesures sur prototypes Si/Py LEGI → corrélation pour calculer le HTC à forte fraction volumique de vapeur

→ Investigations à poursuivre avec des fractions volumiques de vapeur plus faibles et à différentes températures d'évaporation

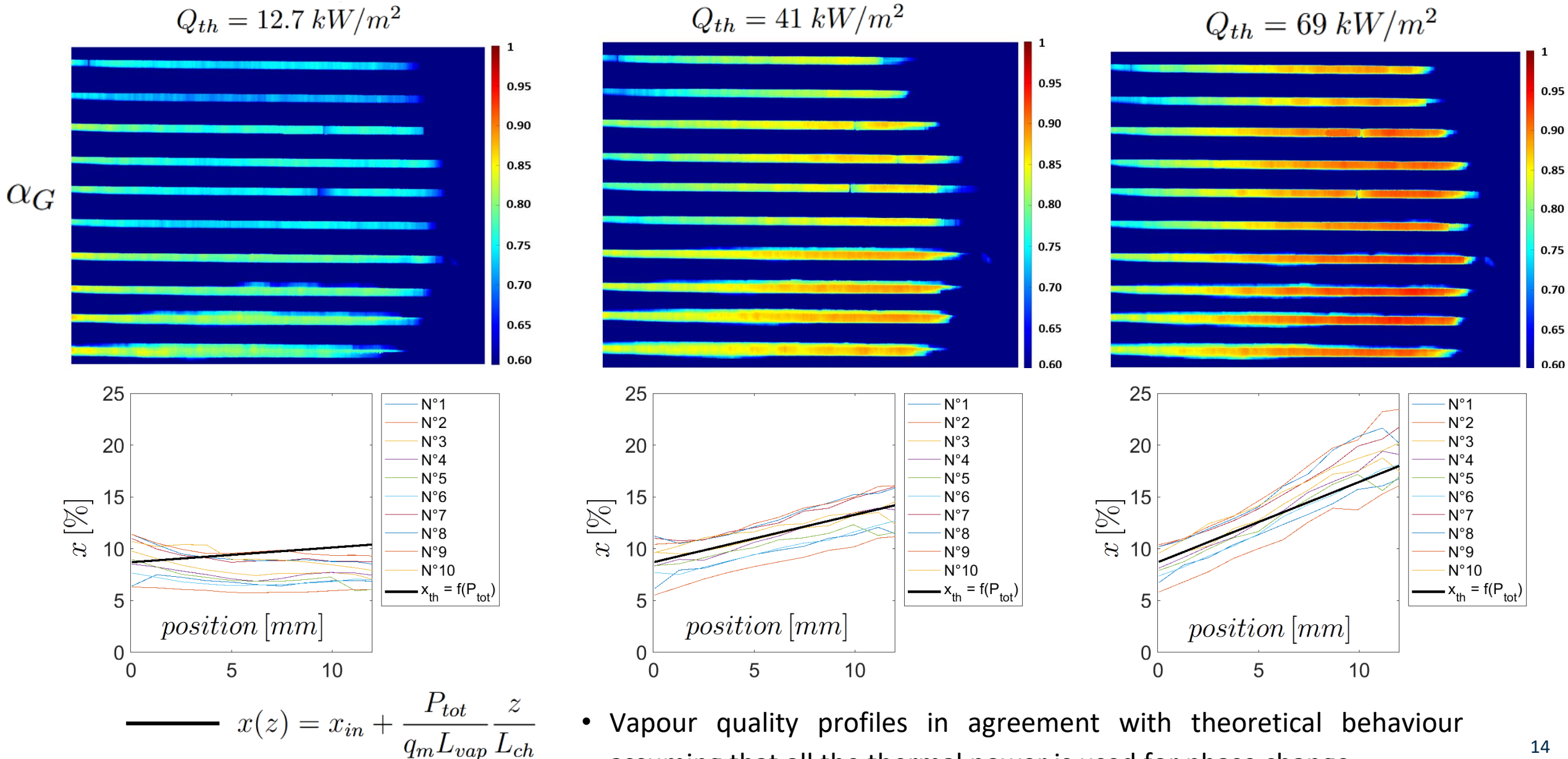
→ Amélioration de la précision de mesure avec dépôt de capteurs de température à l'intérieur des échangeurs

Travail de simulation numérique à poursuivre

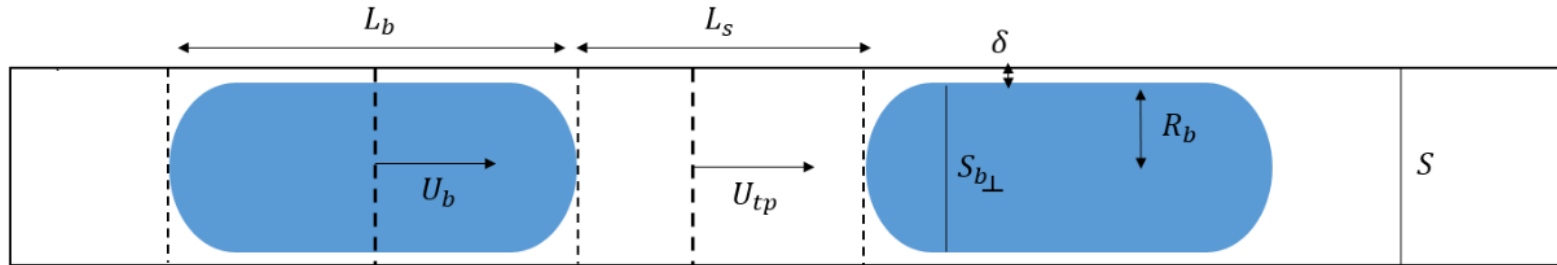


Merci pour votre attention

Link with bubble dynamics : gas volume fraction and vapour quality



Link with bubble dynamics : bubble growth



Enthalpy balance at the bubble scale
(Magnini & Matar 2020)

$$L_{vap} \frac{\partial m_G}{\partial t} = L_{vap} \rho_G \frac{\partial V_b}{\partial t} = Q_b S_b$$

$$L_b/D_h \gg 1 \quad V_b \approx \underbrace{S L_b}_{\text{Cross section}} \quad S_b \approx \underbrace{P_b L_b}_{\text{Perimeter}}$$

Present experiments = short channels = short bubble life time (20ms)
= 1st order Taylor development

$$L_b(t) = L_{b-ini} (1 + \gamma t)$$

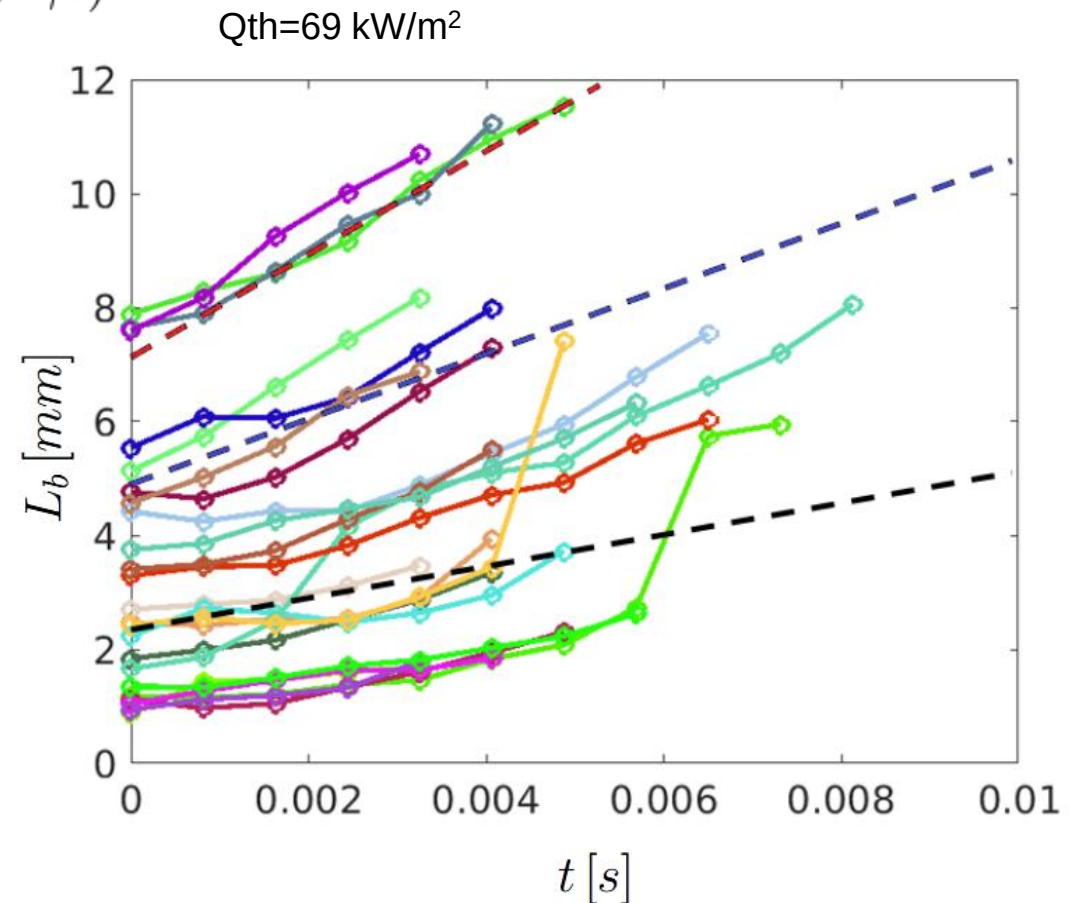
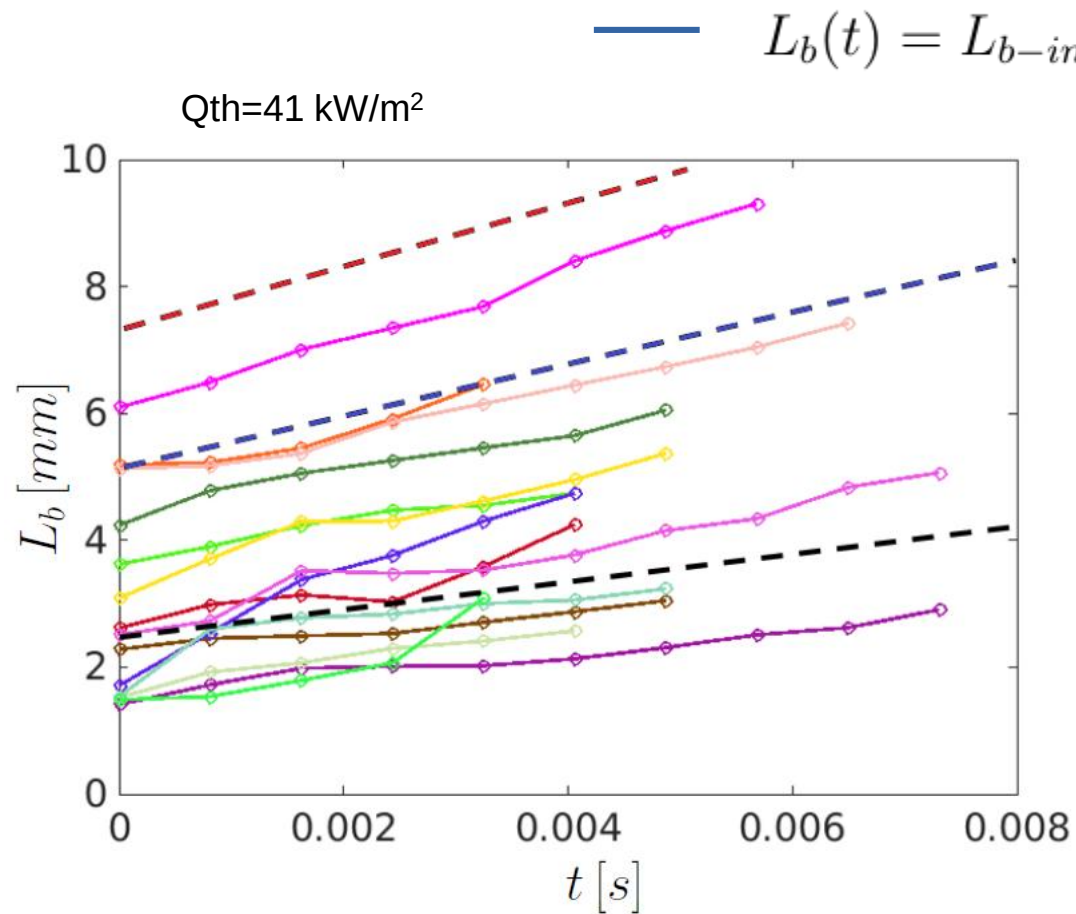
$$L_{vap} \rho_G S \frac{\partial L_b}{\partial t} = Q_b P_b L_b$$

$$L_b(t) = L_{b-ini} \exp(\gamma t)$$

$$\gamma = \frac{Q_b P_b}{L_{vap} \rho_G S}$$

$$Q_b = \frac{P_{tot}}{\langle n_b \rangle \langle S_b \rangle N}$$

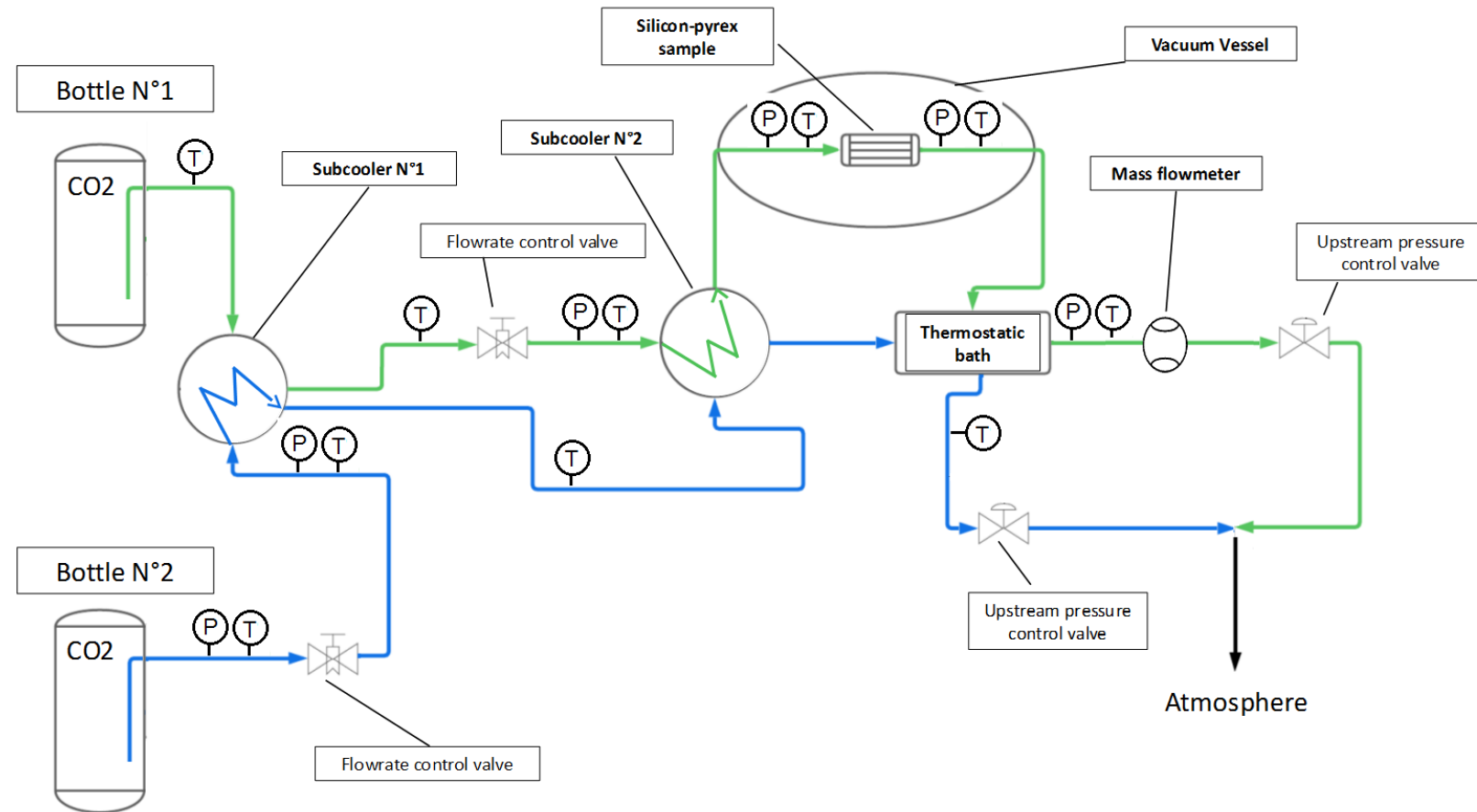
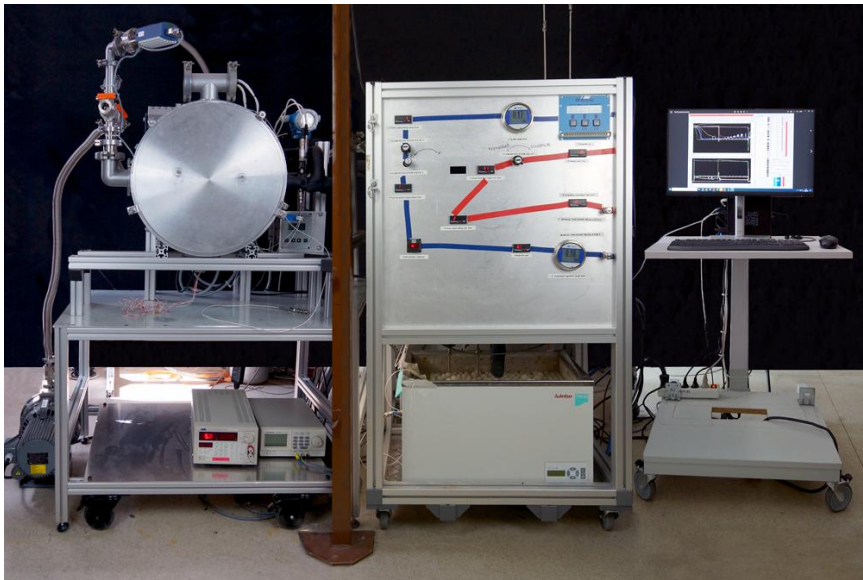
Link with bubble dynamics : bubble growth



- Bubble growth in agreement with the heat balance = the growth rate is sensitive to the initial bubble size
- → Possibility to deduce thermal power P_{tot} from the growth rate dL_b/dt

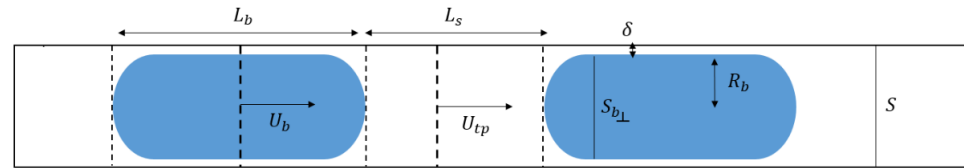


Modification and optimisation of P. Barroca's PhD experimental installation → M. Vacher PhD

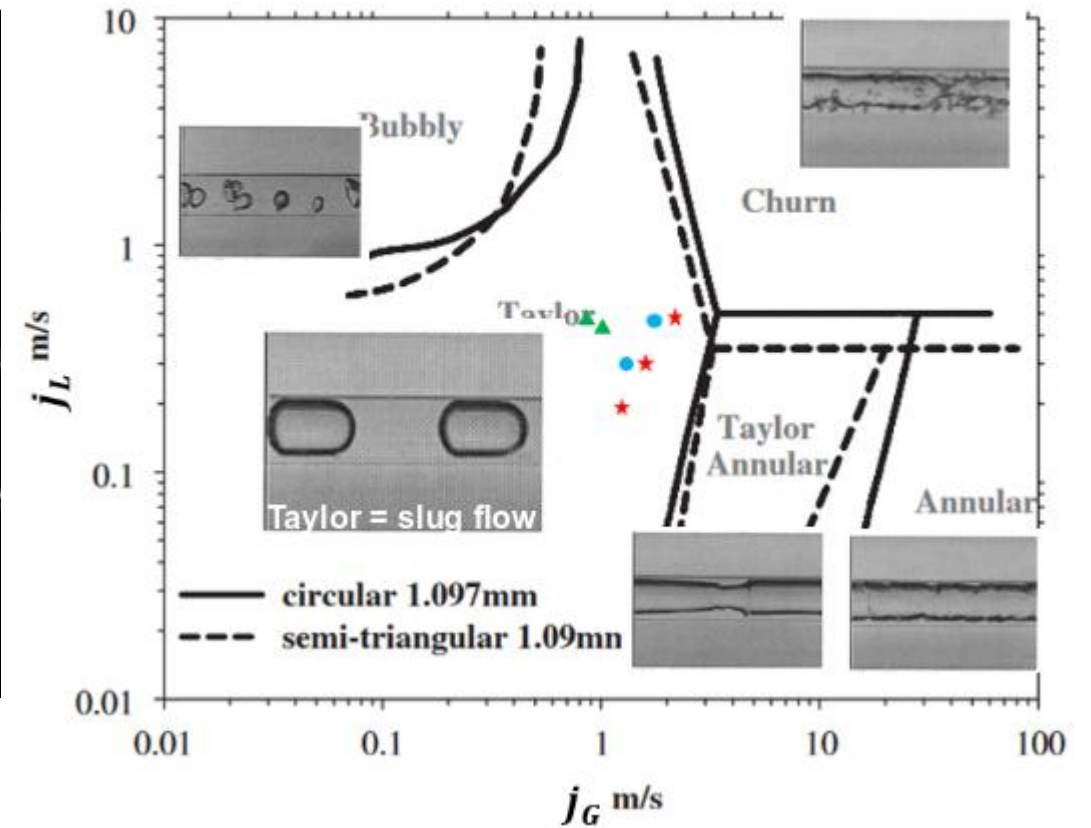
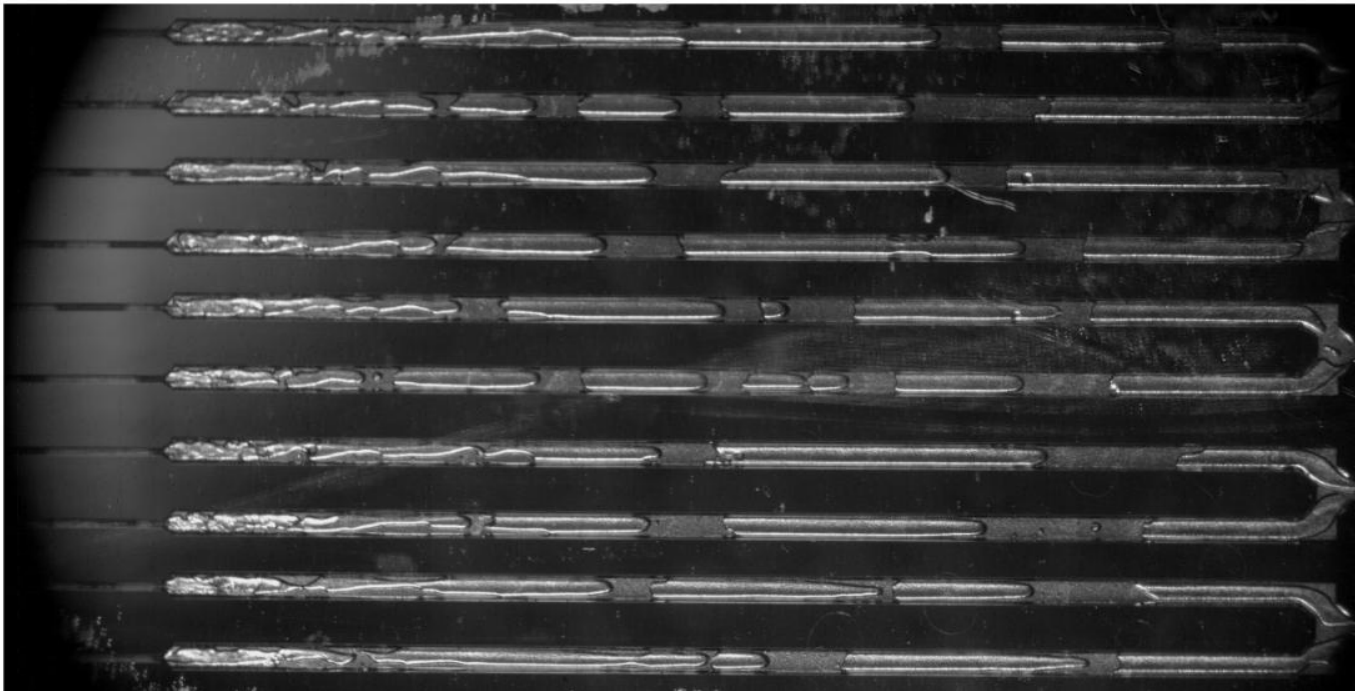


- Two open CO₂ lines → very flexible and oil free system
- Main line to manage small flow rates (<1g/s) through the sample at a given operating pressure (and saturation temp.)
- Secondary line working at higher flow rate with two subcoolers that enables to be 100 % liquid @ sample inlet (T° subcooling adjustable)

Exchangeur Si/Py transparent: Régime d'écoulement

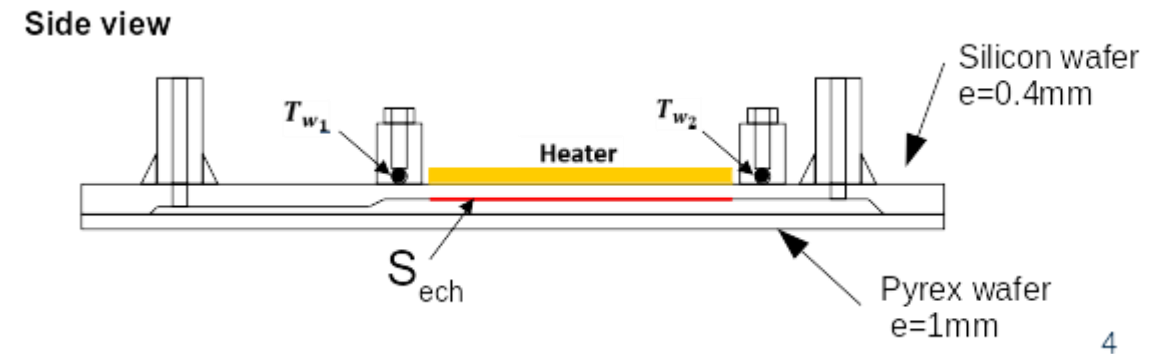
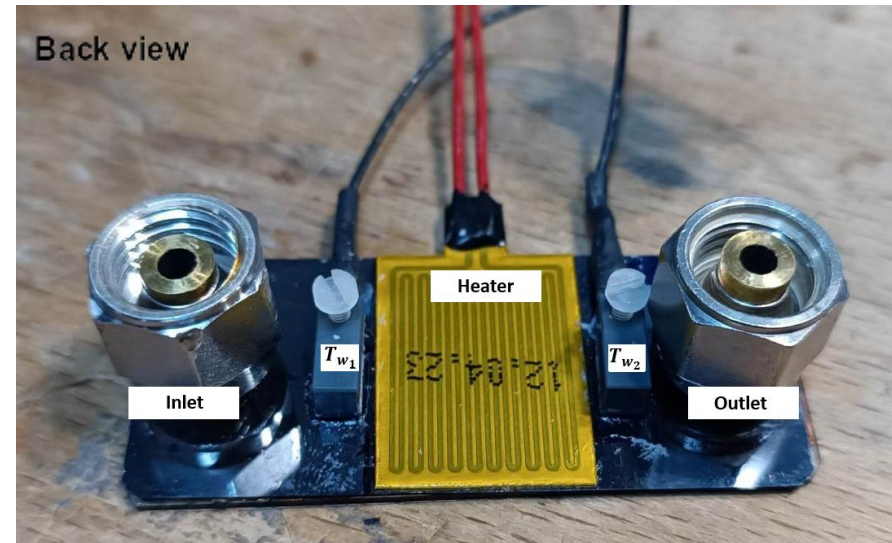
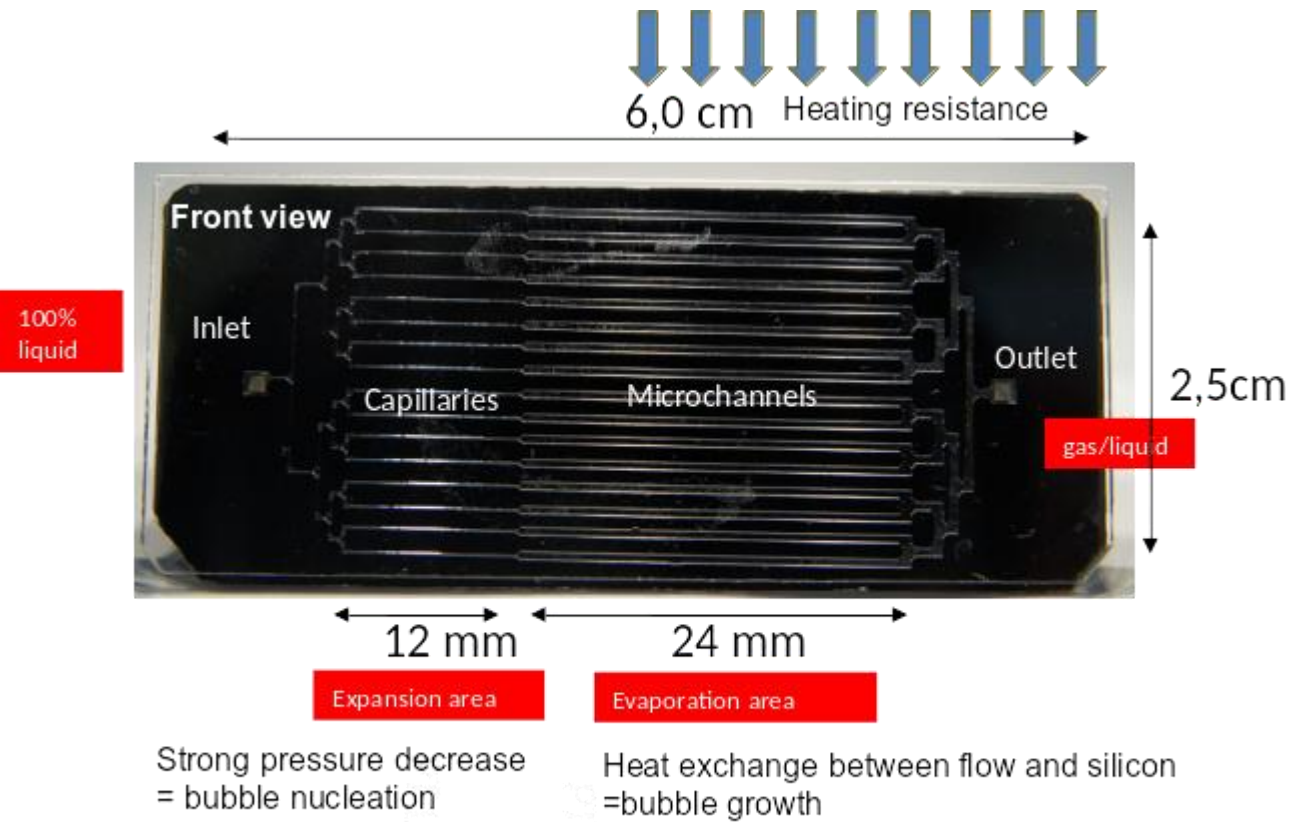


- ▲ slug flow with short bubbles.
- slug flow with long bubbles
- ★ transition to slug/annular regime



- Effets Capillaire importants : Prédominance du régime poche/bouchon en accord avec Triplett et al. 1999

Exchangeur Si/Py transparent: design et instrumentation



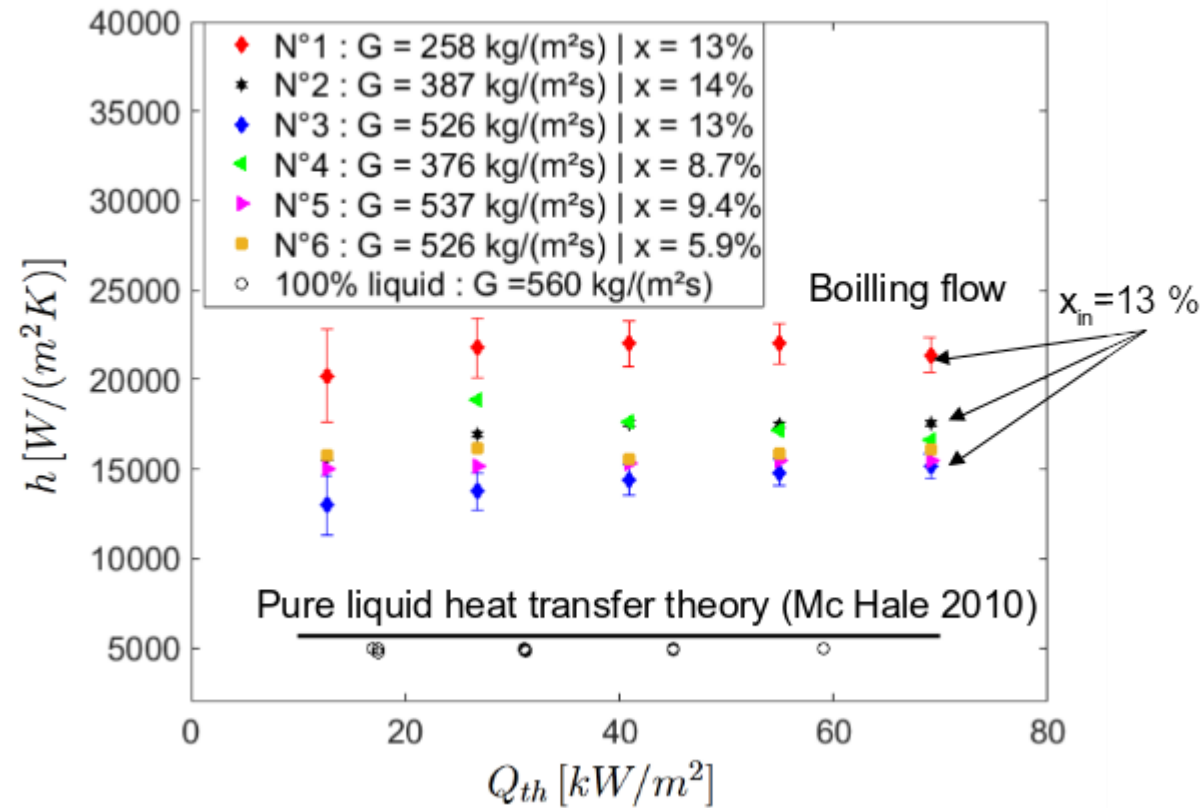
$$D_h = 183 \mu m$$

$$Co = l_c / D_h > 5000$$

~~gravity~~

$$Nu = \frac{Q}{\lambda_L(T_w - T_{sat})/D_h} = \frac{hD_h}{\lambda_L} \approx \frac{\langle |\partial T / \partial y|_w \rangle}{(T_w - T_{sat})/D_h}$$

Exchangeur Si/Py transparent: Coefficient de transfert de chaleur exp.



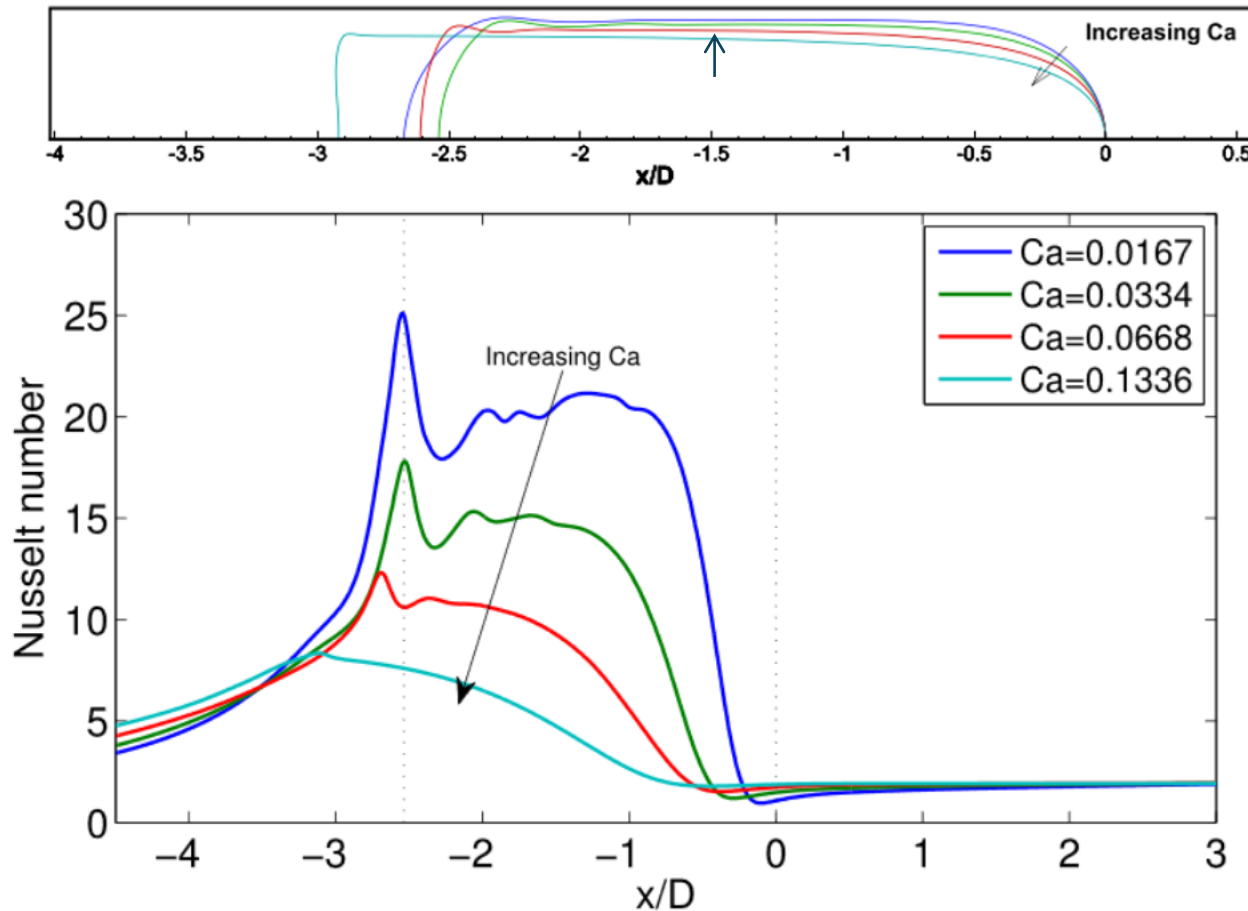
Validation préliminaire avec un écoulement monophasique (13% d'écart)

$$Ca_b = \mu_L < U_b > / \sigma$$

Coefficient de transfert de chaleur indépendant de Q_{th} : car ébullition convective (pas de nucléation)
+ diminution systématique avec l'augmentation de la vitesse massique ($G \sim U_b$) et du nombre Capillaire

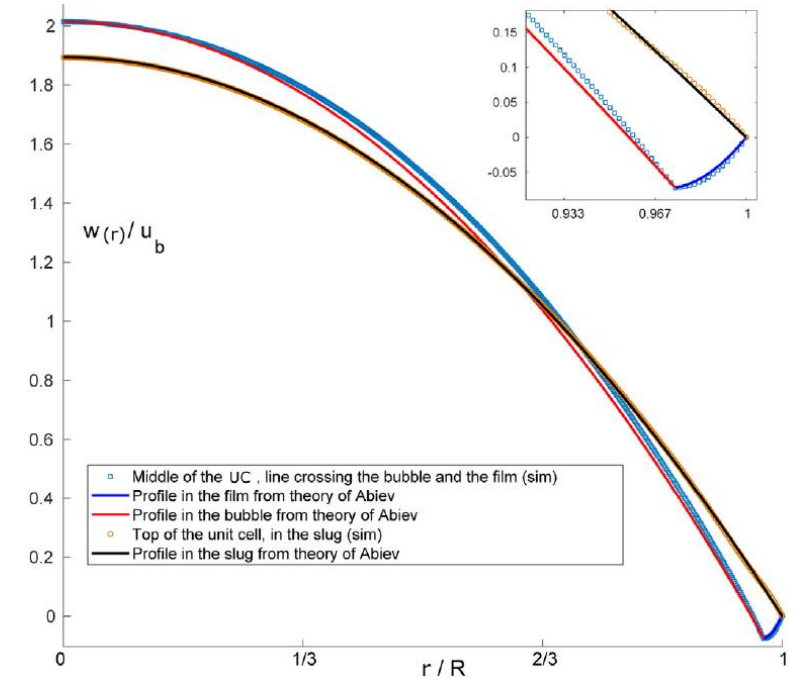
Exchangeur Si/Py transparent: Comparaison aux travaux de simulations

Magnini & Thome 2016 ou Lee & Riaz 2022 observent également une diminution de h et Nu avec l'augmentation de la vitesse et du nombre Capillaire



Butler et al. 2021

Profil de vitesse = annulation vitesse en paroi



68% < fraction volumique vapeur < 85%



Comparaison au problème de conduction pure dans le film liquide

Clean silicon breakages

D3 @ 485 bar

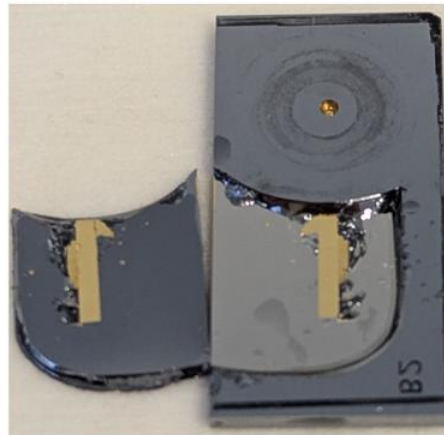


D4 @ 500 bar



Delamination

B2 @ 575 bar



Ambiguous breakages

B5 @ 650 bar



B7 @ 565 bar

