



**INTENSIFICATION DES ÉCHANGES DE CHALEUR PAR
STRUCTURATION DE LA PAROI EN CHANGEMENT DE PHASE AVEC
UN FLUIDE MOUILLANT**

FRANCESC MADRID*

N. CANEY *

C. RIOFRIO *

A. GRUSS **

***LEGI UGA**

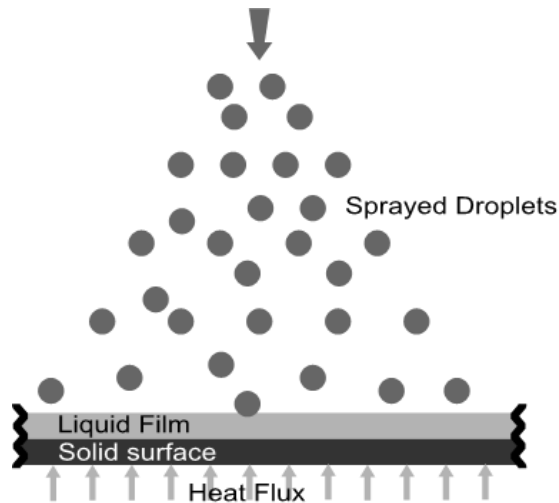
****CEA LITEN**

- Contexte – Sujet d'étude
- Transferts de chaleur en Spray Cooling
- Intensification des échanges thermiques par structuration de surface.
- Choix de la structuration
- Boucle expérimentale: Spray Cooling
- Boucle expérimentale: Pool Boiling

LEGI – CEA: Projet industriels et laboratoires de recherche

- Développer une technologie de **refroidissement diphasique** de composants dissipatifs embarqués. Boucles fluides à pompage mécanique
- Choix de **Spray cooling** comme la technologie la plus prometteuse pour évacuer des grands flux de chaleur.
- Thèse Cristina RIOFRIO
 - Modélisation hydraulique et thermique
 - Etude expérimentale des écoulements diphasiques. (mono buse, HFE7100, boucle fermé, distance variable, débits / diamètre goutte variable), puissance variable (jusqu'à 100W/cm²)
- Etude intensification du coefficient d'échange par structuration de la paroi
 - Optimisées pour SPRAY COOLING
 - Caracterisés en SPRAY COOLING et POOL BOILING afin de mieux comprendre les effets sur la nucleation en paroi.

TRANSFERTS DE CHALEUR EN SPRAY COOLING

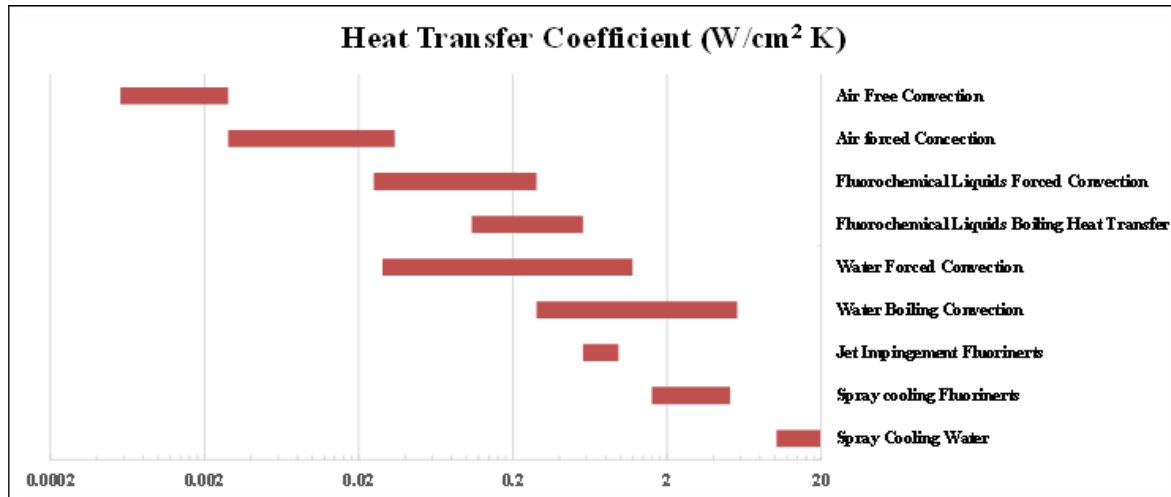


Un liquide est pulvérisé en fines gouttelettes projetées sur une surface à refroidir.

- Par pression
- Par gaz propulseur

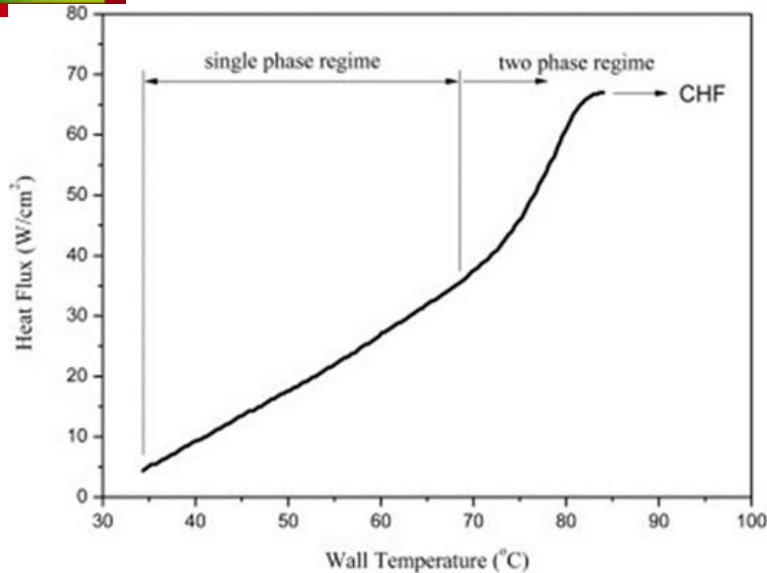
Avantages du Spray Cooling:

- Haut coefficient de transfert thermique
- Bas débit de réfrigérant
- Diminution du retard à la nucléation
- Refroidissement direct des composants
- Refroidissement uniforme de grandes surfaces et structures.
- Faible sensibilité à l'accélération (hypergravité).



Sienski K, Eden R, Schaefer D. 3-D electronic interconnect packaging. In: 1996 IEEE proceedings aerospace applications conference. IEEE; 1996. p. 363-73.

TRANSFERTS DE CHALEUR EN SPRAY COOLING



Courbe de transfert de chaleur (W/cm²) typique.

- Régime monophasique ou à transfert convectif
- Régime diphasique ou ébullition dans film liquide
- Assèchement partiel / (Droplets impingement cooling)
- Assèchement (Flux Critique, CHF)

INTENSIFICATIONS DU TRANSFERT

Facteurs pour améliorer le transfert thermique en Spray cooling.

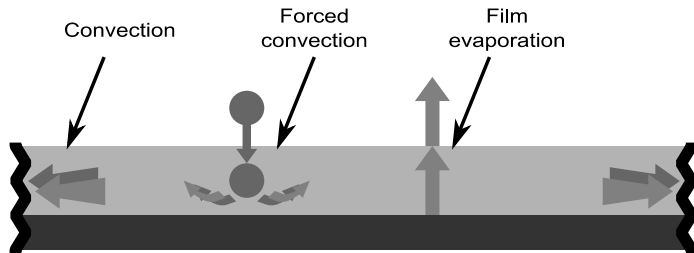
- Spray (vitesse des gouttes, Diamètre des gouttes, Flux des gouttes, Débit massique, Angle, etc..)
- Fluide (propriétés physiques, additifs ...)
- Environnement (présence d'incondensables, (hyper/micro) gravité, etc..)
- **Surface (matériau, rugosité, revêtements, nano / micro / macro structuration, structuration hybride)**



Intensification des échanges par structuration de surface pour spray cooling avec un fluide frigorigène (très faible angle de mouillage)

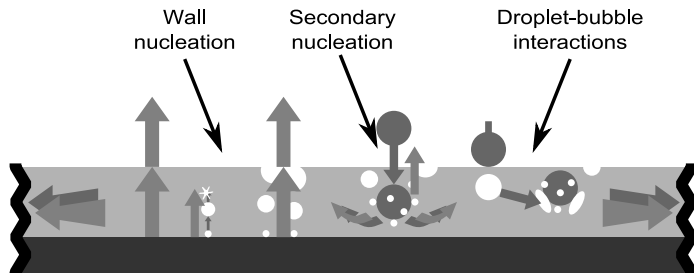
Régime monophasique

- Conduction dans le film liquide, évaporation en surface
- Convection forcée par l'irruption de nouvelles gouttes



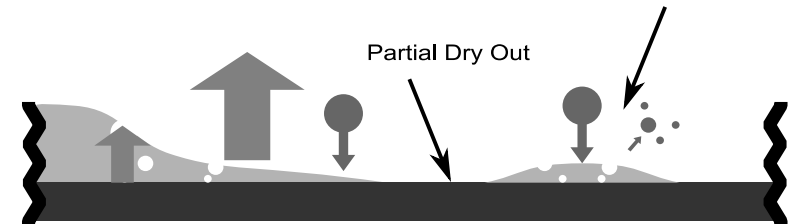
Régime diphasique (Ebullition, effet dominant)

- Nucléation en paroi
- Nucléation secondaire
- Interaction goutte-bulle
 - Division de bulles
 - Arrachement des bulles en paroi



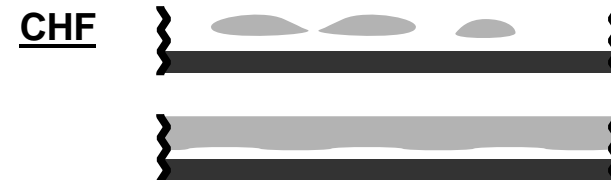
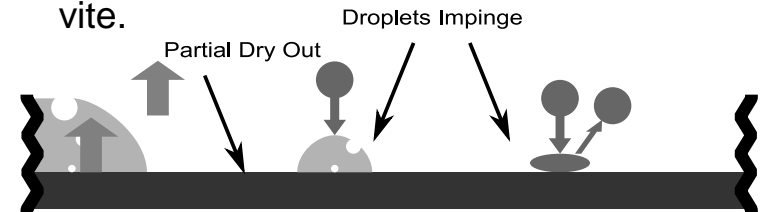
Assèchement partiel et 'droplet impingement'

- Apparition de zones sèches.
- Mécanismes dominants au max de son efficacité. (Conduction, Nucl. paroi, Nucl. secondaire)
- Evaporation goutte à goutte



si peu mouillant

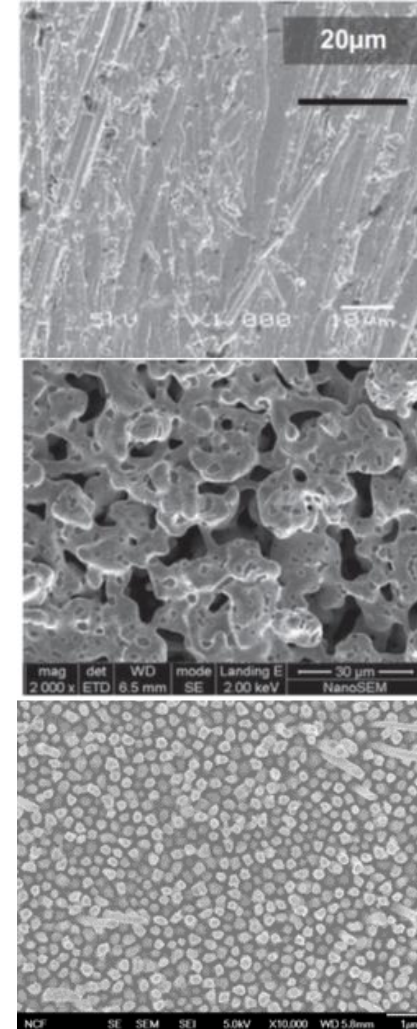
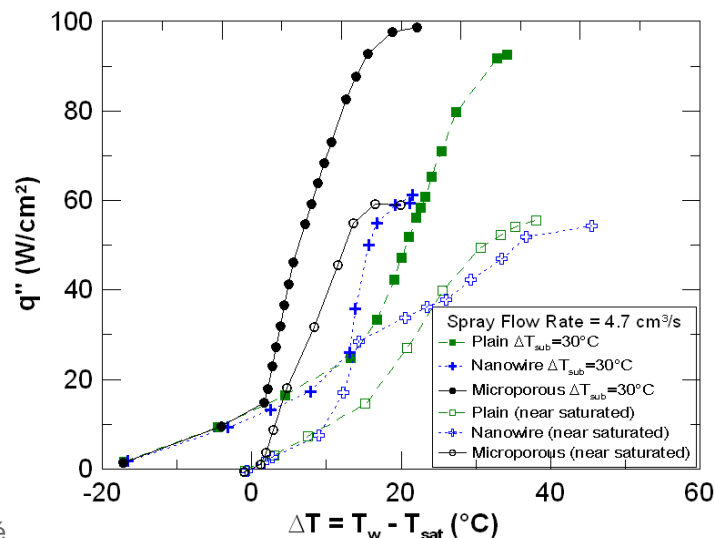
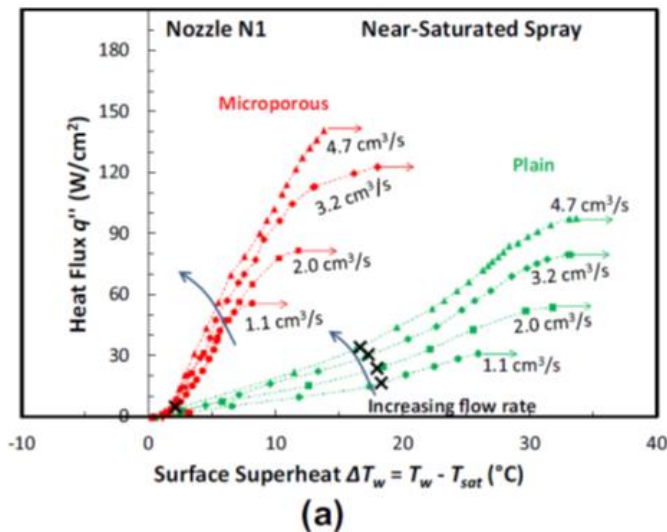
- Retrait plus rapide du liquide. CHF arrive vite.



INTENSIFICATION DES ÉCHANGES THERMIQUES PAR STRUCTURATION DE LA SURFACE

[Thiagarajan] Etude expérimentale HFE7100

- Micro structuration (haute porosité) et Nano structuration (nanowires)
- **Microstructure:** Amélioration importante du transfert thermique, diminution du retard de la nucléation et retard du CHF (Augmente nombre sites de nucléation, remouillage plus efficace des zones asséchées (Wickability)).
- Les nanowires n'améliorent pas significativement le transfert thermique ni le CHF (HFE7100 est déjà très mouillant, structures trop petite pour créer des sites de nucléation). Fragile.



té

ir - 13/10/2016





Page 7

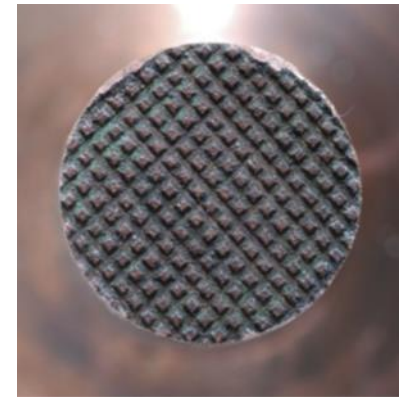
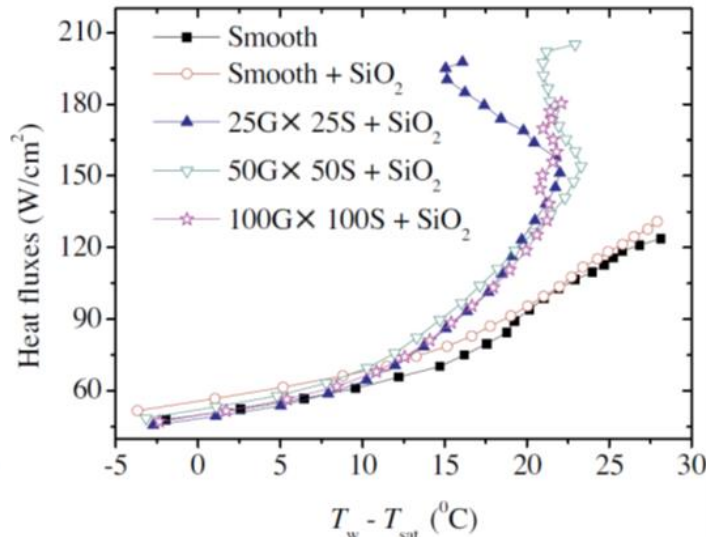
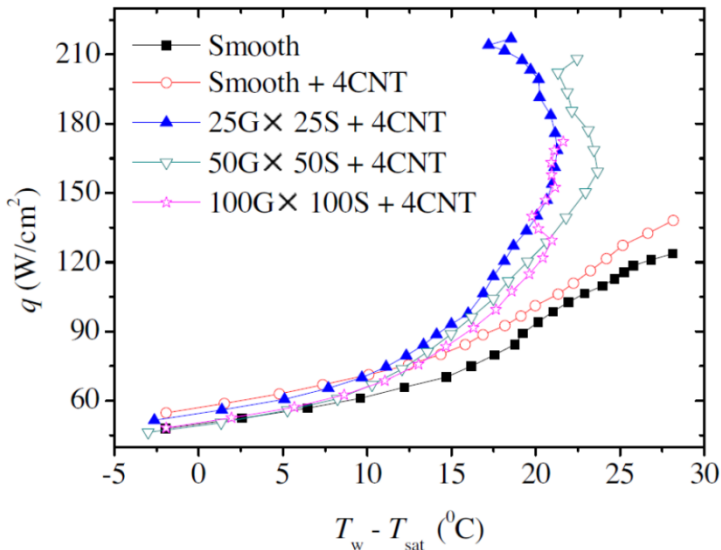
INTENSIFICATION DES ÉCHANGES THERMIQUES PAR STRUCTURATION DE LA SURFACE

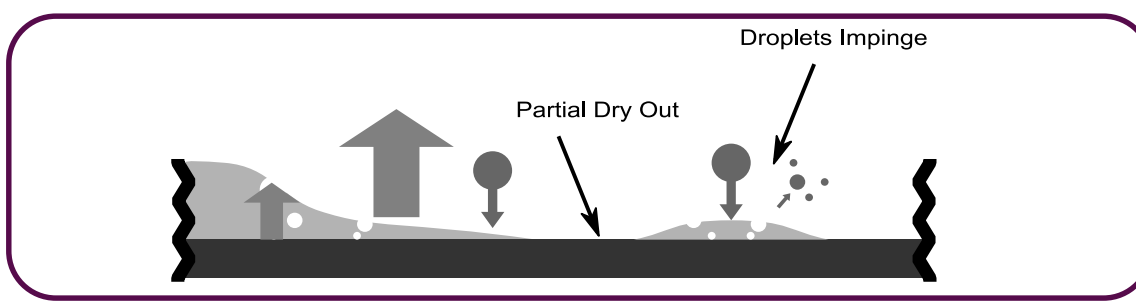
[Zhang] Série d'études en Spray cooling, divers polissages, nano, micro et macro structuration (DI EAU)

- CNT et dépôt SiO₂ => petit angle de contact
- Hyper mouillabilité + macrostructure (plots)
- **Assèchement partiel par structure dépassant le film liquide.**

Deionized water contact angles on various surfaces.

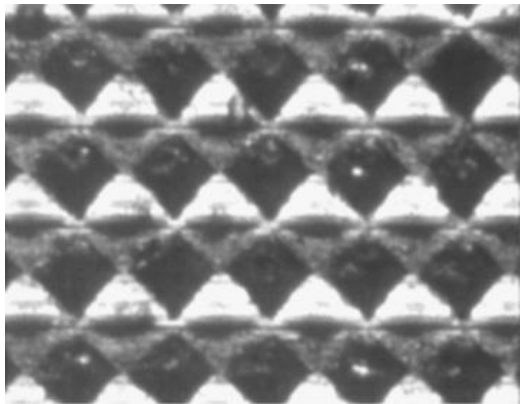
Surface	Droplet shape	Contact angle (°)
Si (smooth)		62.5
Si + SiO ₂		13.1
Si + 1CNT + SiO ₂		10.5
Si + 4CNT + SiO ₂		8.0





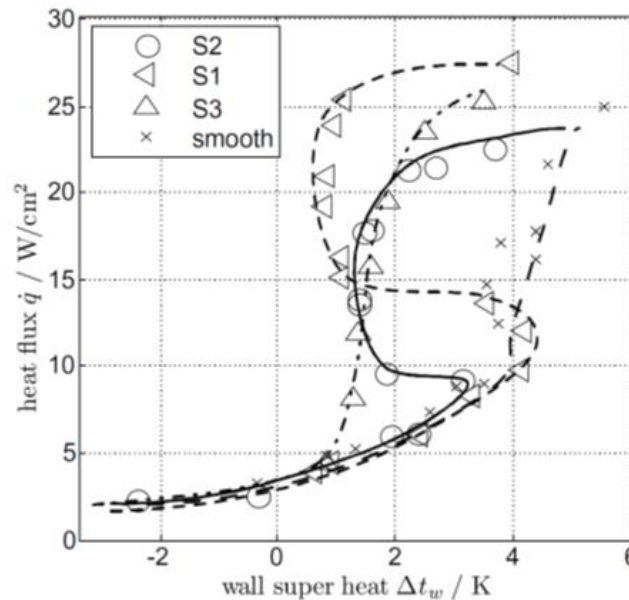
[Sodtke] Etude expérimentale avec visualisation IR (EAU)

- Démontre une relation directe entre la longueur de la ligne triple et le flux de chaleur.
- A cause d'une intensification des transferts dans des conditions de (quasi) assèchement partiel.
- Microstructures (pyramides).

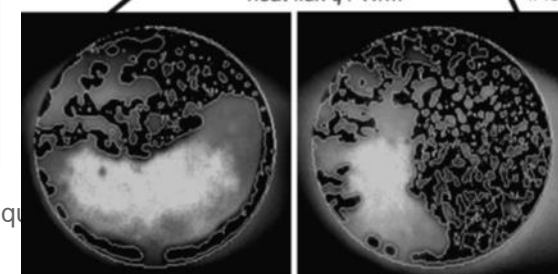
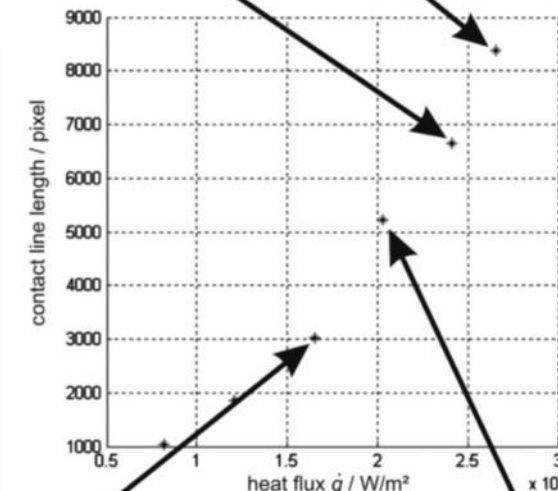
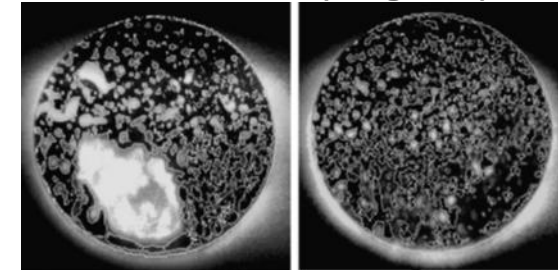


Dimensions of surface structures

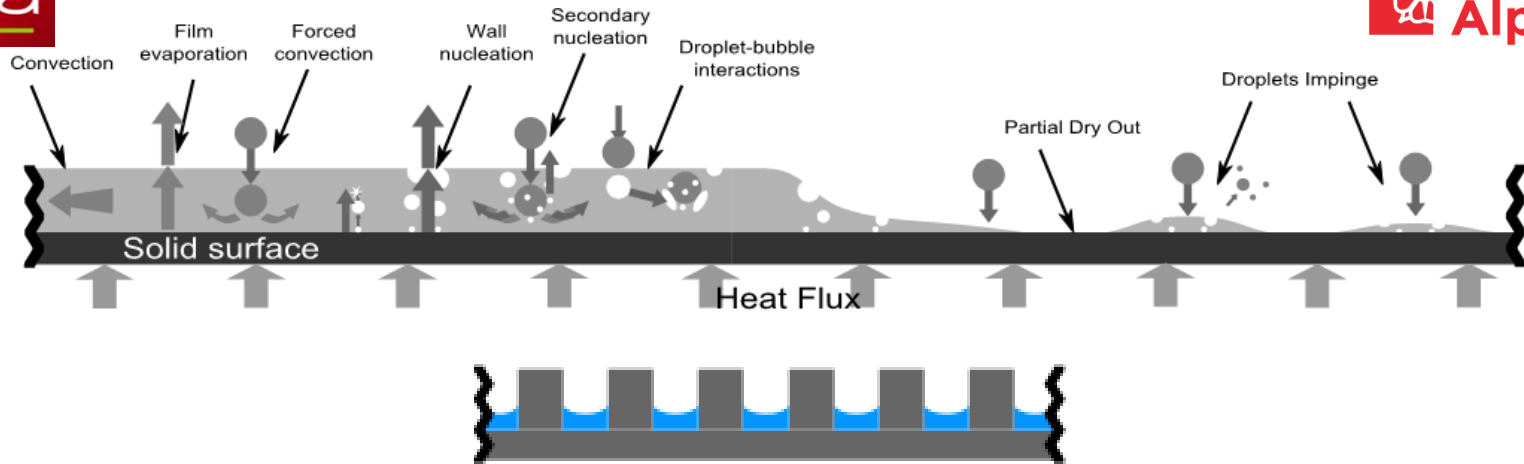
Structure	Height (in μm)	Width (in μm)
S1	75	150
S2	150	300
S3	225	450



Longueur de la ligne de contact vs. heat flux (images IR)



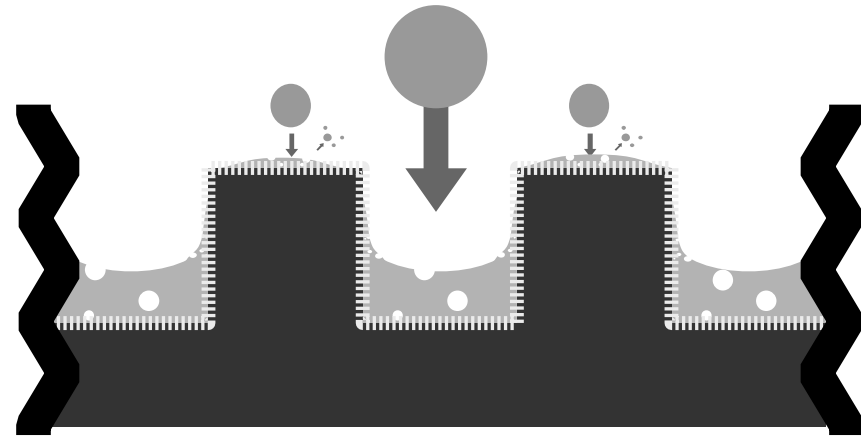
CHOIX DE LA STRUCTURATION



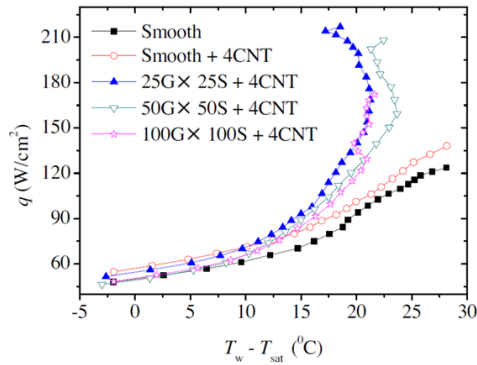
Enhancing effects	Macrostructure (puncturing liquid film)	Microstructure (capillarity transportation effects)	Nanostructure ($<0,1\mu\text{m}$)
Wettability	-	-	May modify the contact angle
Wickability. Dry zone replenishment and fluid entrapment	-	Maximum enhancement of fluid transport by capillarity	May contribute if structures are large enough.
Nucleation sites density	-	Clear increasing of nucleation site density in porous microstructure.	May contribute if structures are large enough.
Heat exchange surface augmentation	Increased contact surface.	Increased contact surface.	-
Partial dry-out advance	Advancement of fluid film rupture	May delay any dry-out in smooth surfaces	-
Delay in total dry-out	Fluid trapped on the structures groove	Fluid trapped on the structure	-

Structuration hybride

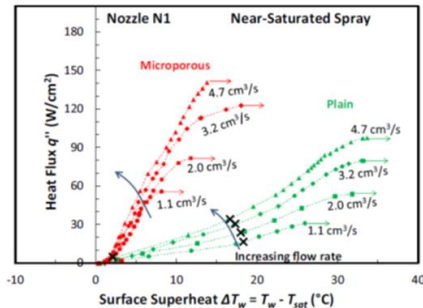
Microporeux / Macro structure



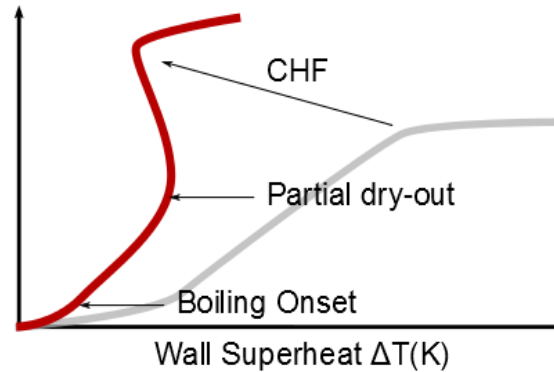
- Macro structure:



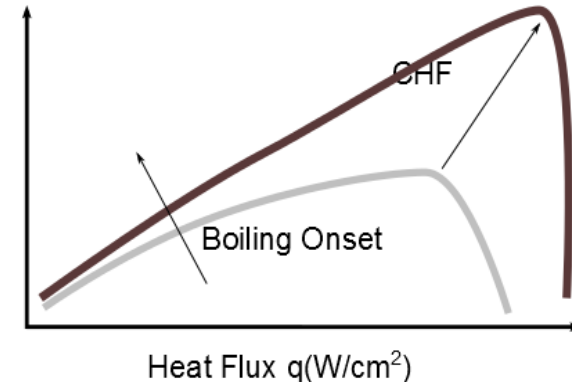
- Microporeux



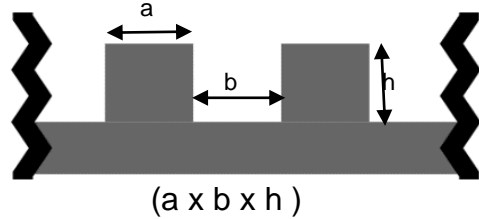
Heat Flux q (W/cm²)



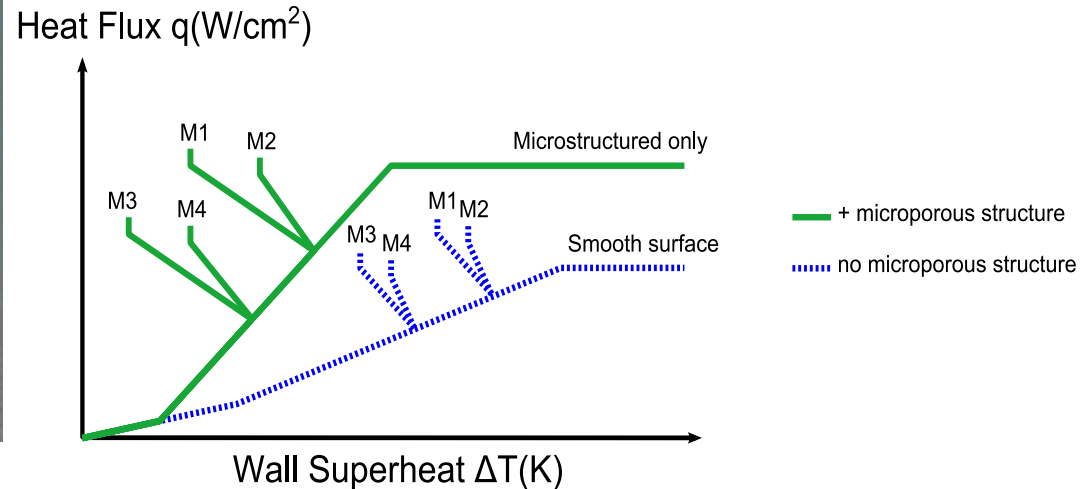
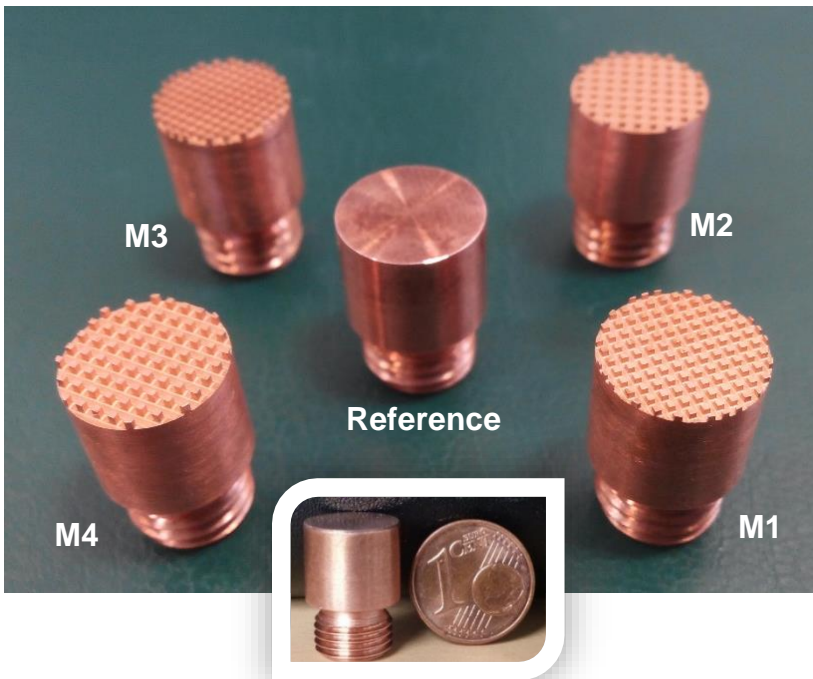
Heat transfer coefficient HTC (W/cm²K)



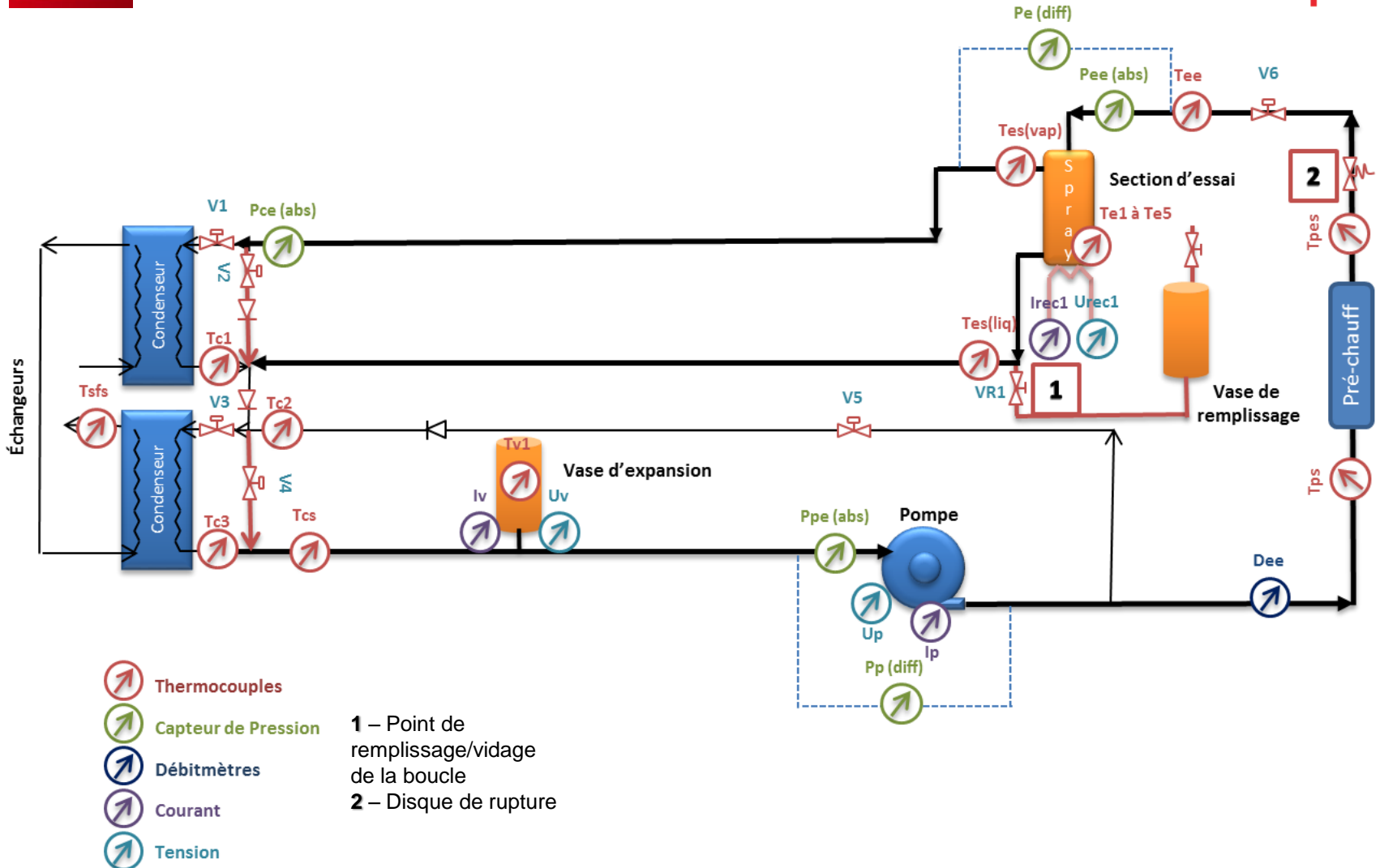
SET D'ÉCHANTILLONS : 10 surfaces à tester en Spray Cooling et en Pool Boiling



ref	a (μm)	b (μm)	h (μm)	Surface gain	Perimeter / Area
MACRO1	500	500	500	2.00	2.00
MACRO2	500	800	500	1.59	1.18
MACRO3	500	500	800	2.60	2.00
MACRO4	500	800	800	1.95	1.18

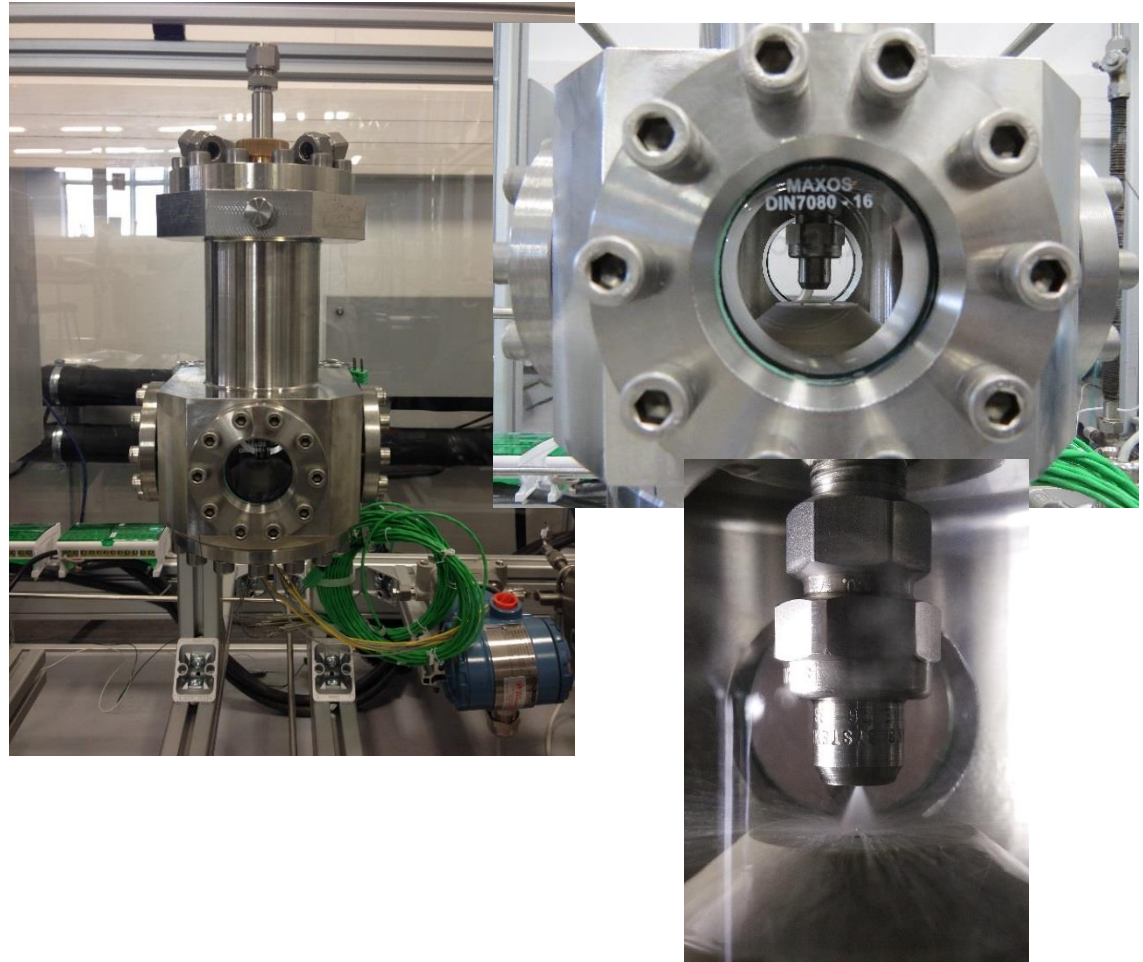
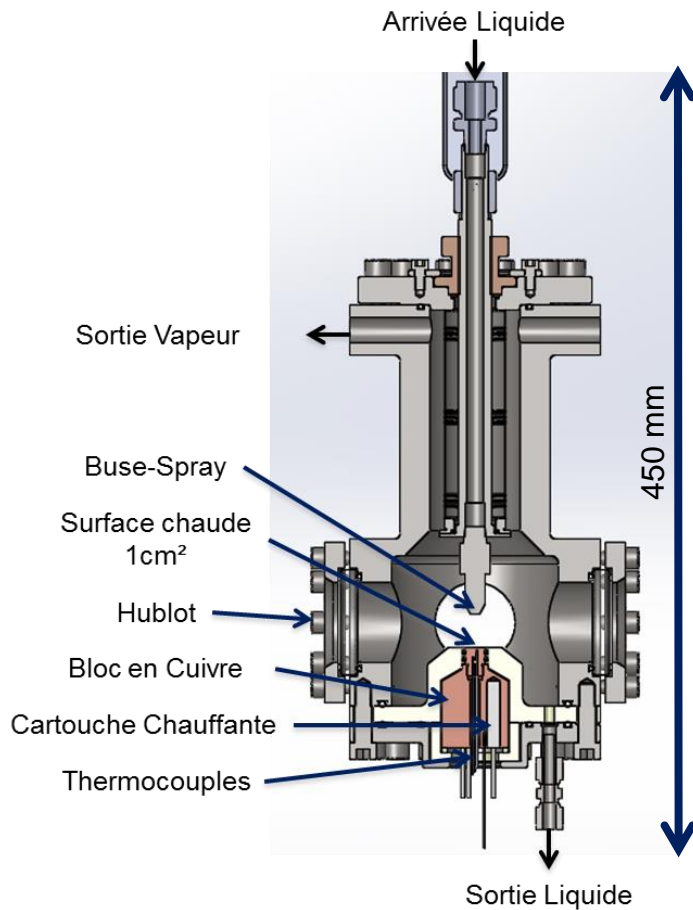


BOUCLE EXPERIMENTALE: SPRAY COOLING



BOUCLE EXPERIMENTALE: SPRAY COOLING

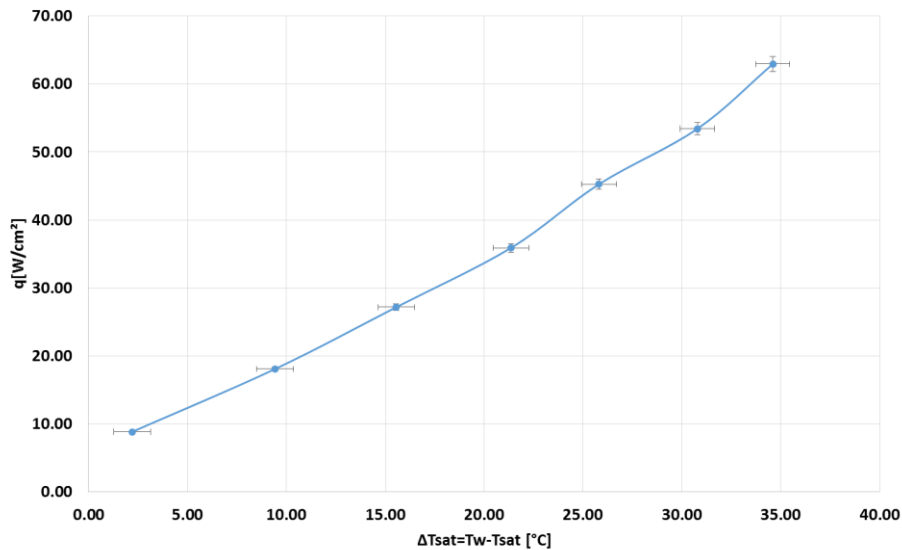
SECTION D'ESSAIS:



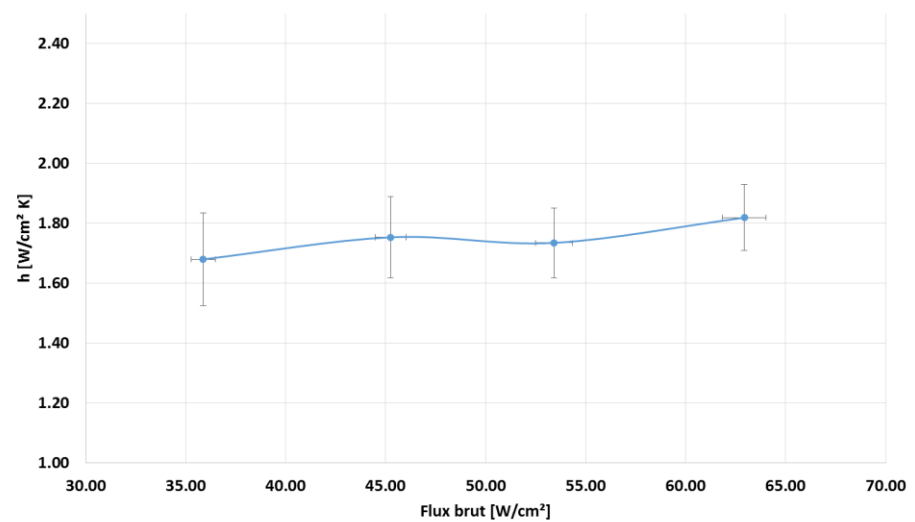
BOUCLE EXPERIMENTALE: SPRAY COOLING



15kg/h - 6mm - $\Delta T_{\text{sous}}=2,5\text{ }^{\circ}\text{C}$



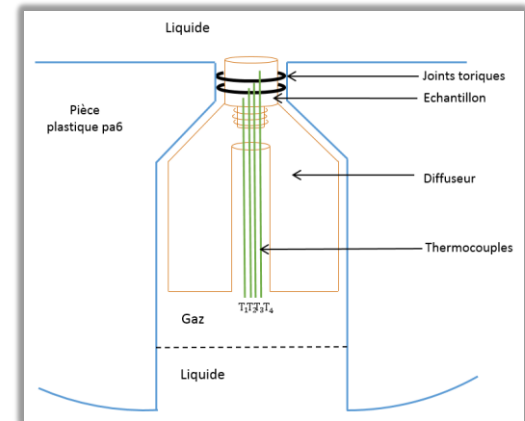
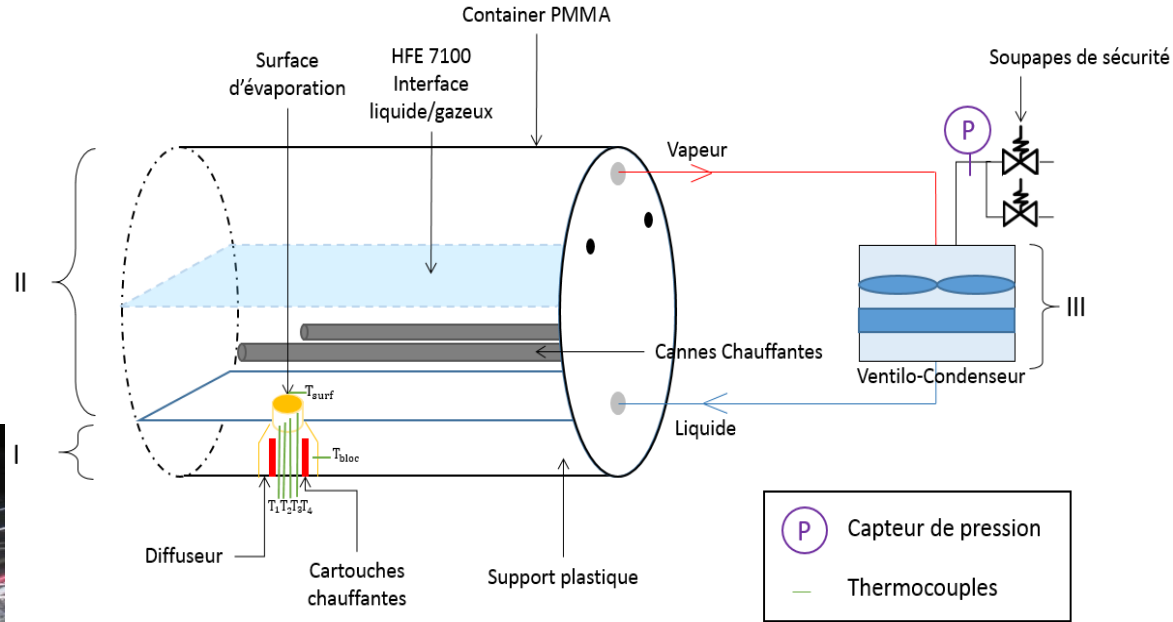
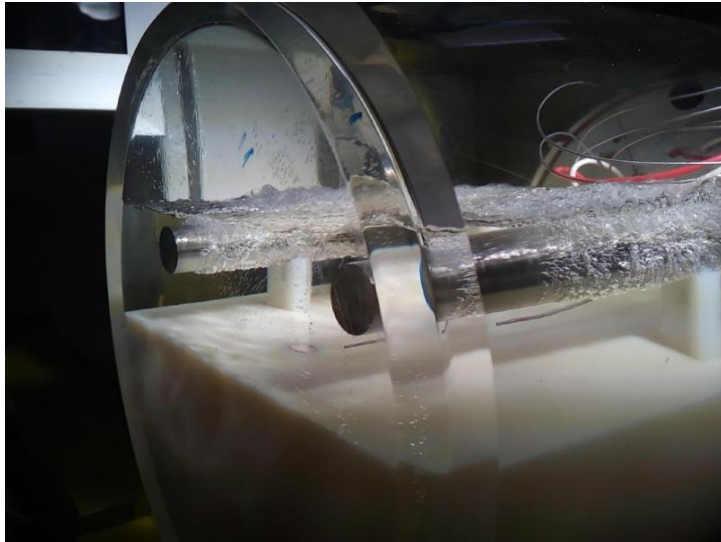
Coefficient d'échange thermique en fonction du flux
15 kg/h - 6 mm - $\Delta T_{\text{sous}}=2,5\text{ }^{\circ}\text{C}$



BOUCLE EXPERIMENTALE: POOL BOILING

POOL BOILING

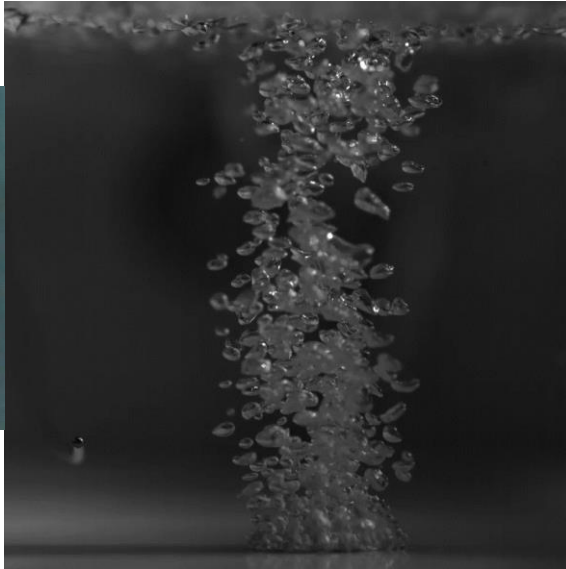
- Test des effets sur la nucleation en paroi (Decouplée de la nucleation secondaire).



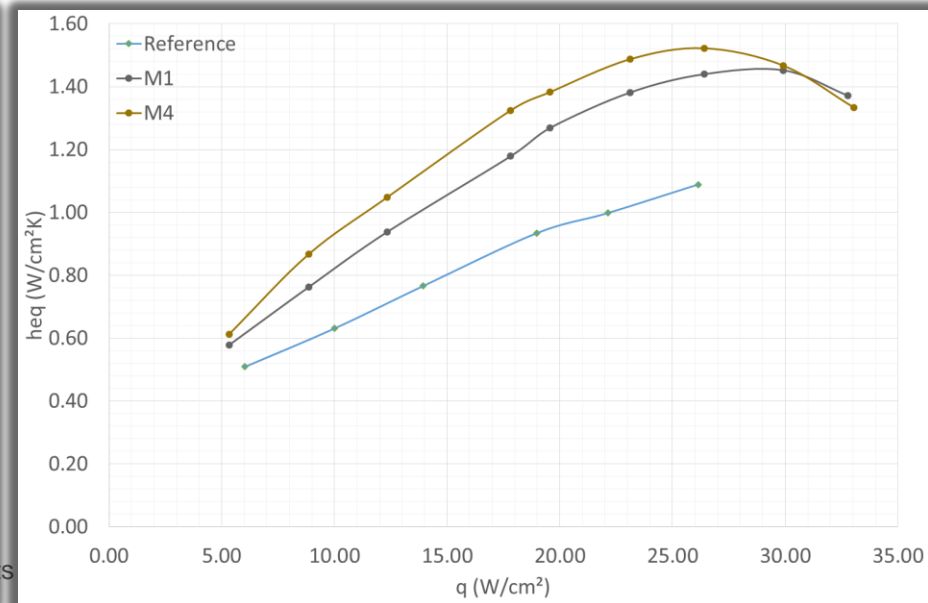
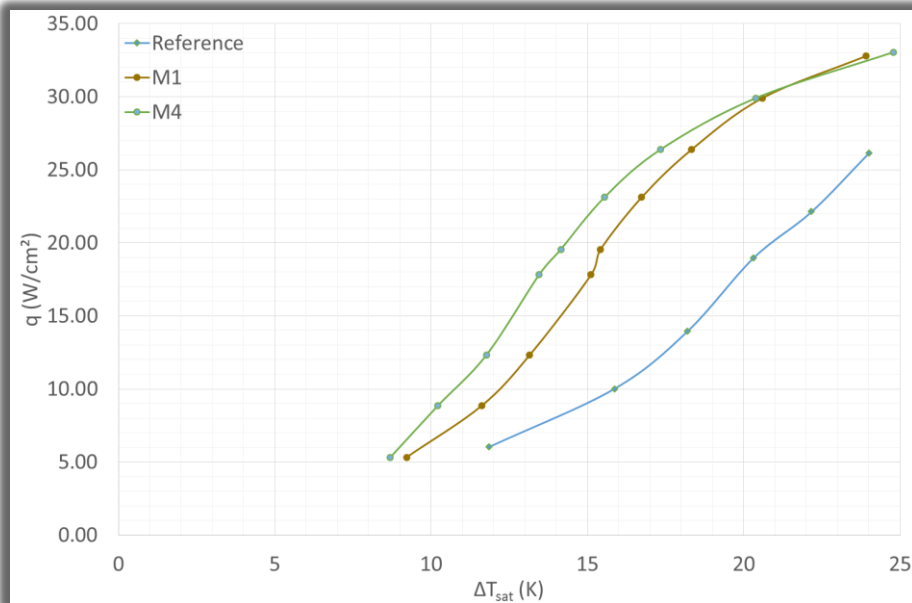
BOUCLE EXPERIMENTALE: POOL BOILING



Reference

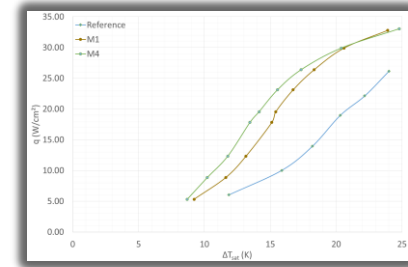
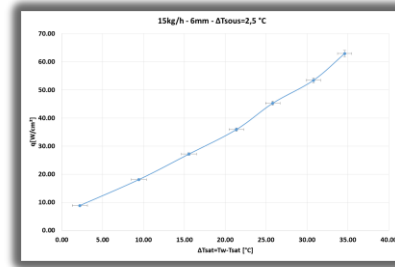
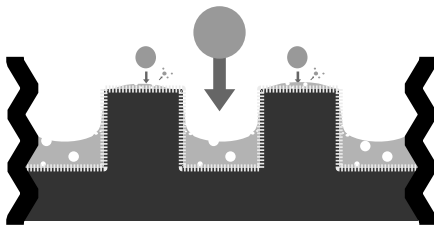


Macro 1



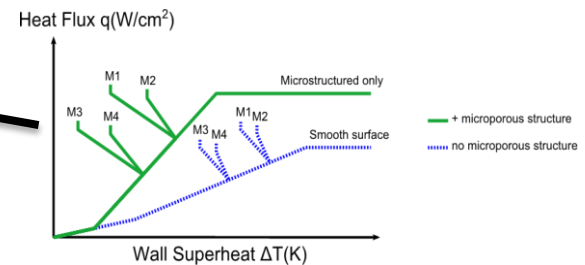
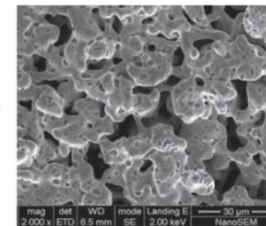
Intensification en Spray Cooling:

- Surfaces hybrides microstructure sur macrostructure
- Tests préliminaires (spray cooling et pool boiling) sur surfaces de référence et macrostructures



Perspectives:

- Depots microporeux
- Depots CNT
- Essais Spray Cooling:
 - Macro / Micro / Macro+Micro
- Essais Pool Boiling
 - Macro / Micro / Macro+Micro / CNT





MERCI POUR VOTRE ATTENTION

**INTENSIFICATION DES ÉCHANGES DE CHALEUR PAR
STRUCTURATION DE LA PAROI EN CHANGEMENT DE PHASE AVEC
UN FLUIDE MOUILLANT**

FRANCESC MADRID*

N CANEY *

C RIOFRIO *

A GRUSS **

***LEGI UGA**

****CEA LITEN**

REFERENCES

S.J. **Thiagarajan**, S. Narumanchi, C. King, W. Wang, R. Yang, Enhancement of Heat Transfer With Pool and Spray Impingement Boiling on Microporous and Nanowire Surface Coatings, in: 2010 14th Int. Heat Transf. Conf. Vol. 6, ASME, 2010: pp. 819–828. doi:10.1115/IHTC14-23284.

S.J. **Thiagarajan**, S. Narumanchi, R. Yang, Effect of flow rate and subcooling on spray heat transfer on microporous copper surfaces, Int. J. Heat Mass Transf. 69 (2014) 493–505. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.09.033.

Z. **Zhang**, J. Li, P.-X. Jiang, Experimental investigation of spray cooling on flat and enhanced surfaces, Appl. Therm. Eng. 51 (2013) 102–111. doi:10.1016/j.applthermaleng.2012.08.057.

Z. **Zhang**, P.-X. Jiang, X.-L. Ouyang, J.-N. Chen, D.M. Christopher, Experimental investigation of spray cooling on smooth and micro-structured surfaces, Int. J. Heat Mass Transf. 76 (2014) 366–375. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.04.010.

Z. **Zhang**, P.-X. Jiang, D.M. Christopher, X.-G. Liang, Experimental investigation of spray cooling on micro-, nano- and hybrid-structured surfaces, Int. J. Heat Mass Transf. 80 (2015) 26–37. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.08.085.

C. **Sodtke**, P. Stephan, Spray cooling on micro structured surfaces, Int. J. Heat Mass Transf. 50 (2007) 4089–4097. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.12.037.