

REFROIDISSEMENT DIPHASIQUE PAR SPRAY COOLING,
INTENSIFICATION DES ÉCHANGES
PAR STRUCTURATION DE LA PAROI
(POUR DES FLUIDES FRIGORIGÈNES)

FRANCESC MADRID*
N CANEY *
C RIOFRIO *
A GRUSS **



*LEGI UGA
**CEA LER



SOMMAIRE

- SUJET D'ETUDE
- TRANSFERTS DE CHALEUR EN SPRAY COOLING
- INTENSIFICATION DES TRANSFERTS
- ETUDES EXPERIMENTALES
- CHOIX D'UNE STRUCTURATION POUR INTENSIFIER

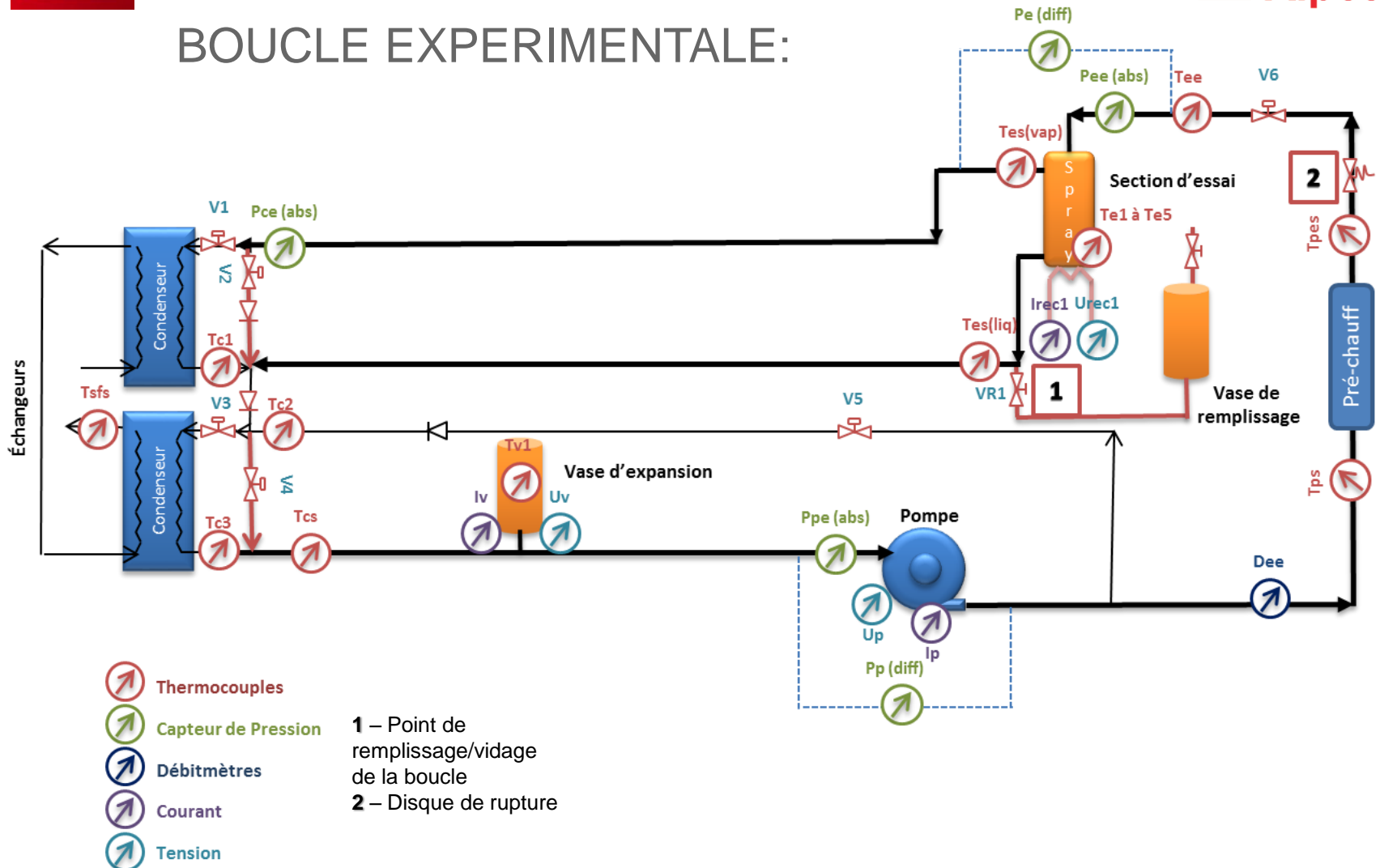
THERMOFLUIDE-RT

- (Transfert thermique par boucles fluides diphasiques à pompage mécanique - De Rupture Technologique)
- Développer une technologie de refroidissement de composants dissipatifs par boucles fluides diphasiques embarqués à pompage mécanique
- Choix de Spray cooling comme la technologie la plus prometteuse (jet impingement, microcanaux, plaque ailettes).

LEGI - CEA: Évaporateur par Spray Cooling

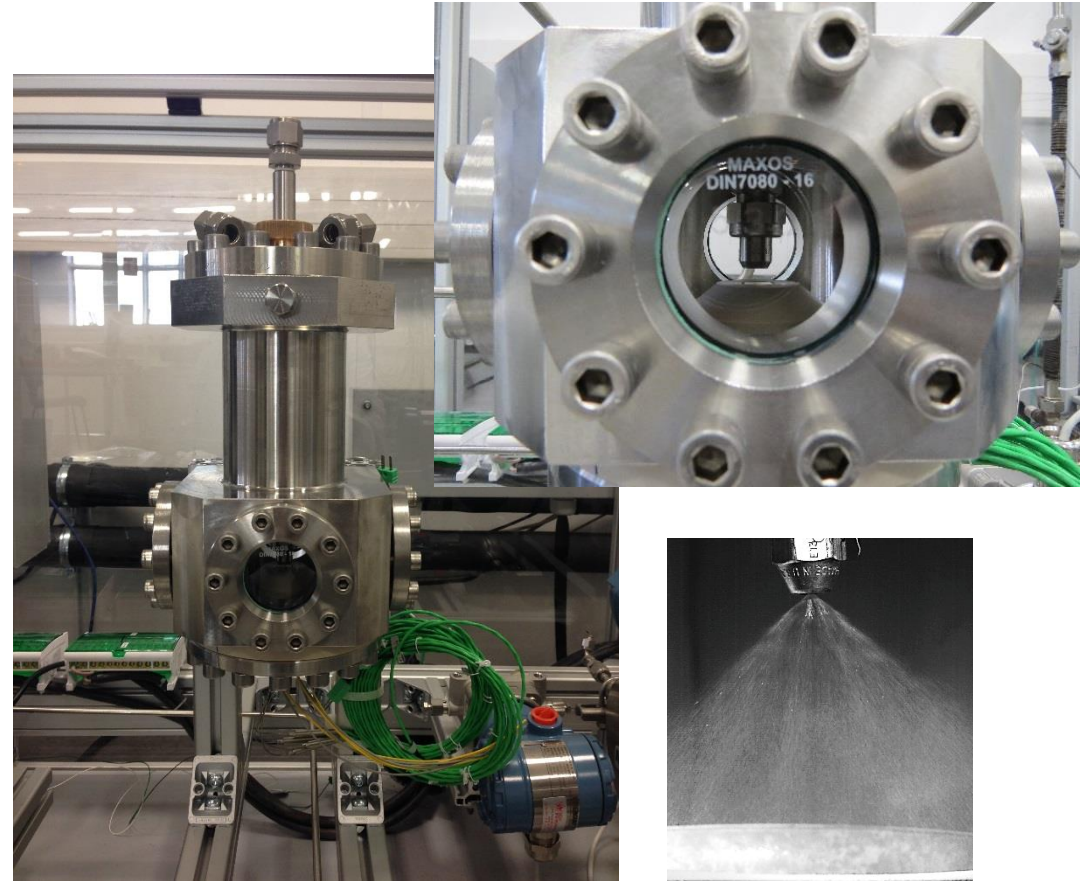
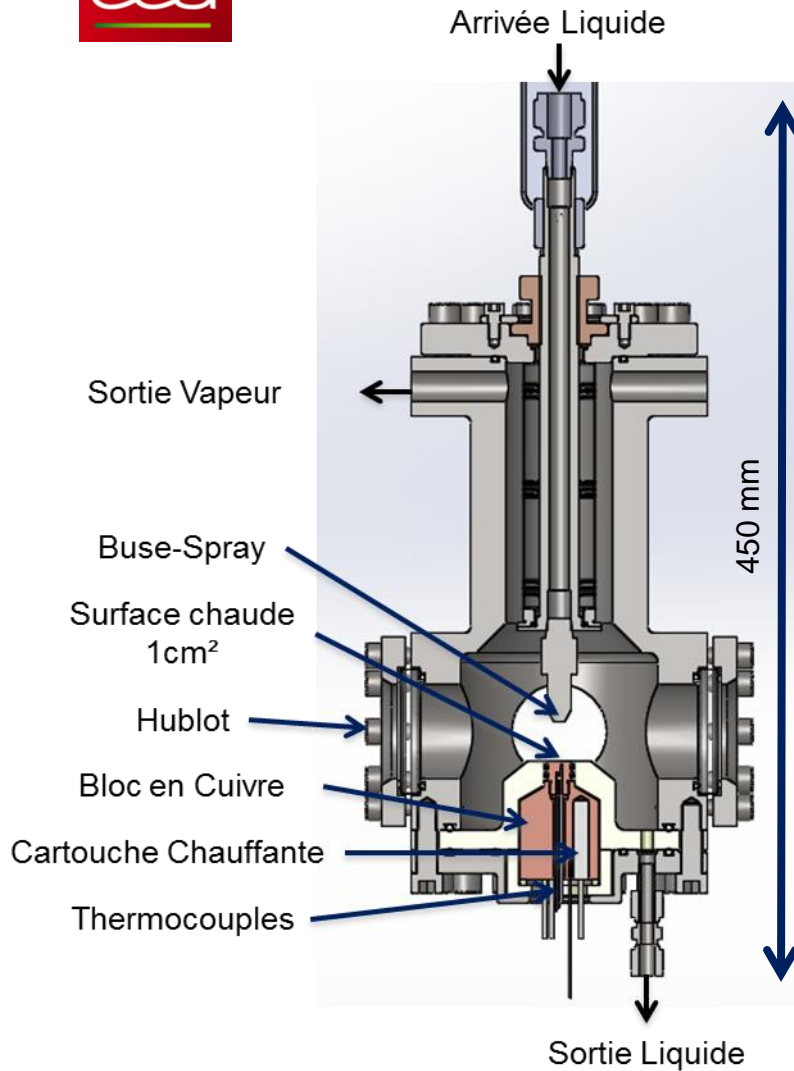
- Thèse Cristina RIOFRIO
 - Modélisation hydraulique et thermique
 - Etude expérimentale des écoulements diphasiques. (mono buse, HFE7100, boucle fermé, distance variable, débits / diamètre goutte variable), puissance variable (minimum de 100W/cm²)
- Etude intensification du coefficient d'échange par structuration de la paroi

BOUCLE EXPERIMENTALE:



SUJET D'ETUDE

SECTION D'ESSAIS:



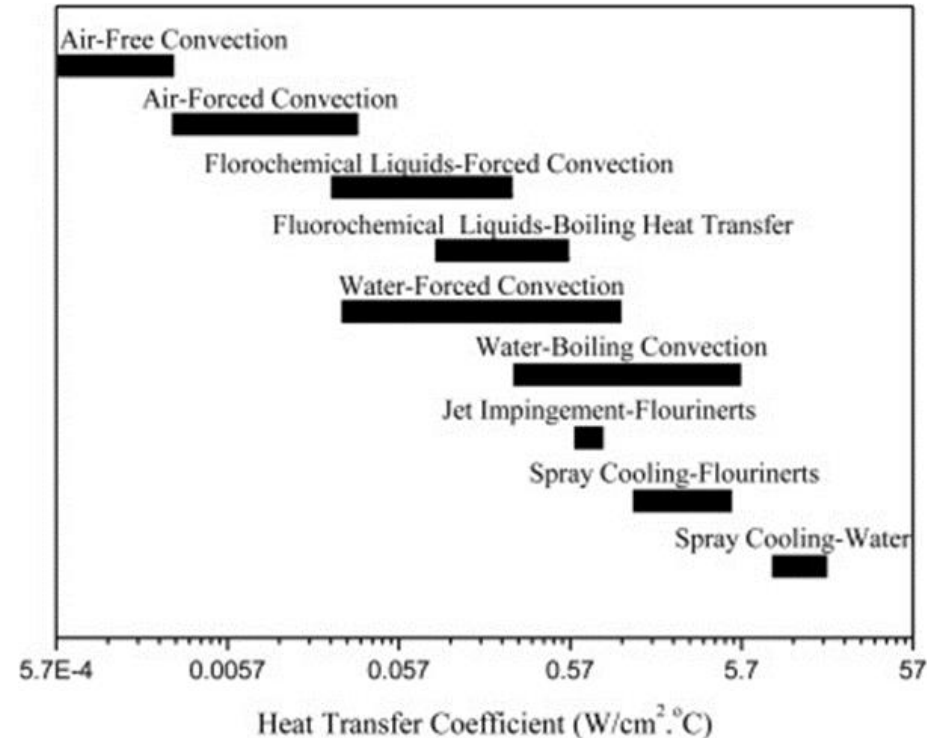
Un liquide est pulvérisé fines gouttelettes projetées sur une surface à refroidir.

Spray generé

- Par pression
- Par gaz propulseur

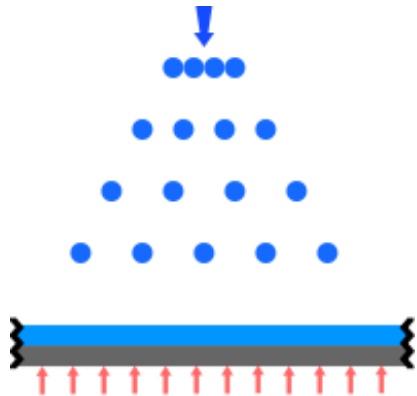
Avantages du Spray Cooling:

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

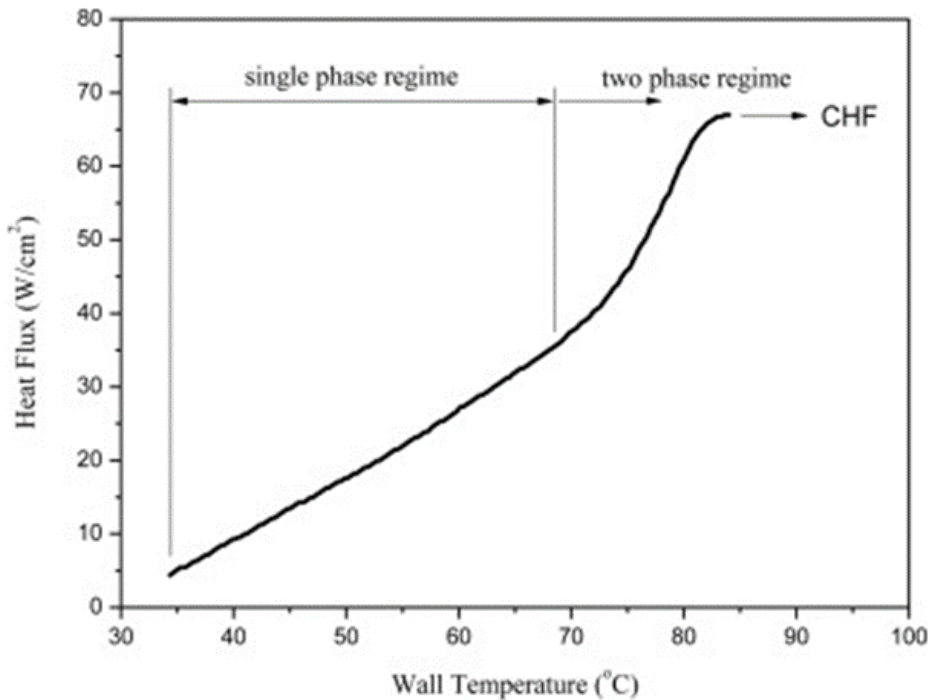


Sienski K, Eden R, Schaefer D. 3-D electronic interconnect packaging. In: 1996 IEEE proceedings aerospace applications conference. IEEE; 1996. p. 363–73.

TRANSFERTS DE CHALEUR EN SPRAY COOLING



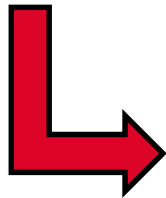
Courbe de transfert de chaleur (W/cm^2) typique.



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

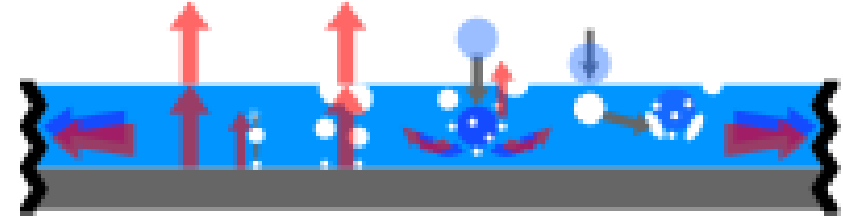
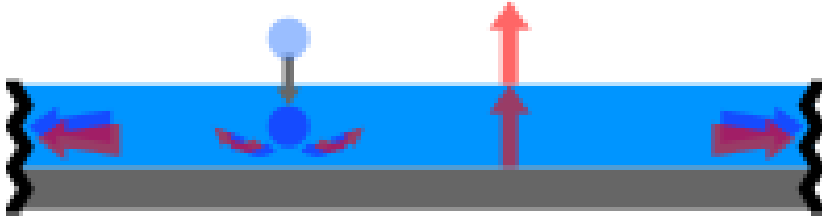
Facteurs pour améliorer le transfert thermique en Spray cooling.

- 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 (matériel, rugosité, coatings, 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)

TRANSFERTS DE CHALEUR EN SPRAY COOLING

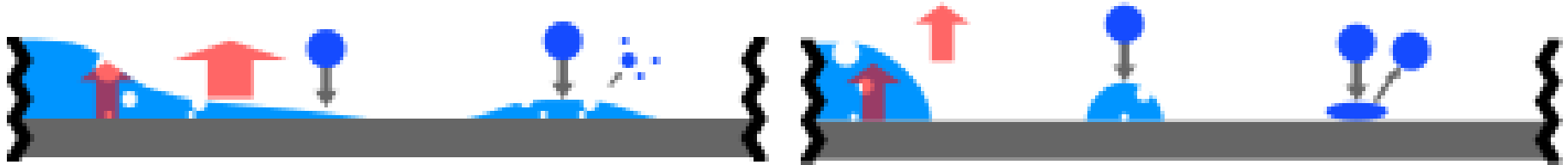


Régime monophasique

- Convection forcée par l'irruption de nouvelles gouttes
- Conduction de chaleur dans le film liquide, évaporation en surface
- Si gaz propulseur, convection forcée en surface.

Régime diphasique (Ebullition, effet dominant)

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



TRÈS MOUILLANT

Assèchement partiel et 'droplet impingement'

- Film liquide mincie au limite, apparition des zones sèches.
- Mécanismes dominants au max de son efficacité.
 - Conduction
 - Nucléation paroi
 - Nucléation secondaire
- Evaporation goutte à goutte

PEU MOUILLANT

Assèchement partiel et 'droplet impingement'

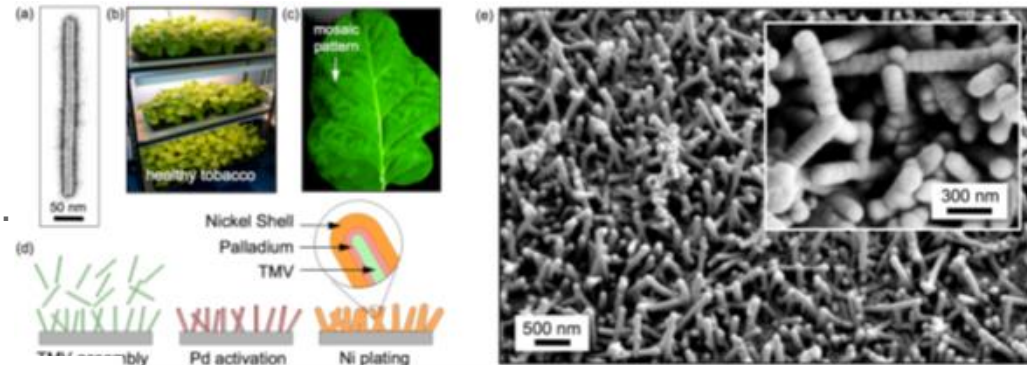
- Retrait plus rapide du liquide. CHF arrive vite.



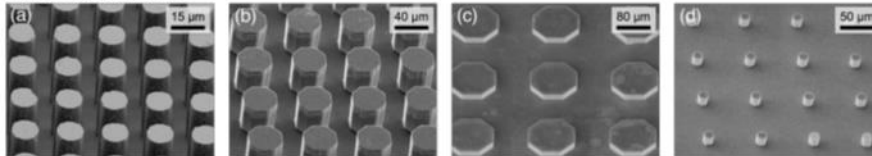
[2012-2014-2015Rahman]

Pool boiling, EAU

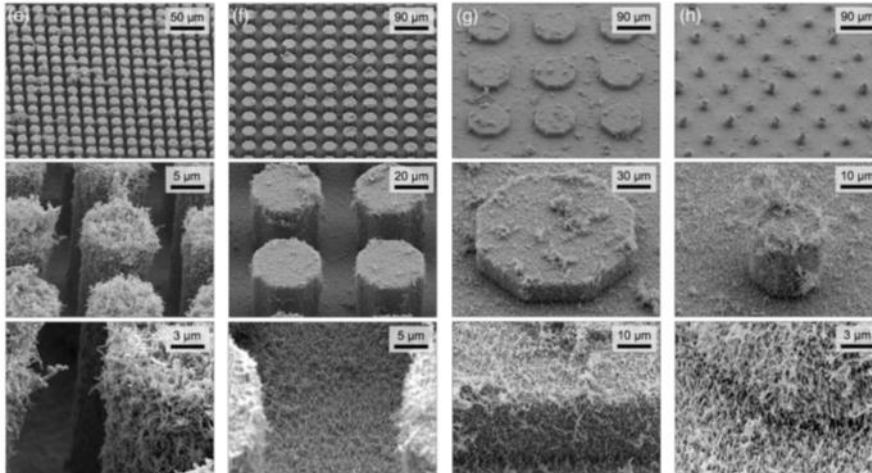
- Structuration nano, micro et hybride.
- Structure nano super-hydrophilique



Microstructured Surfaces



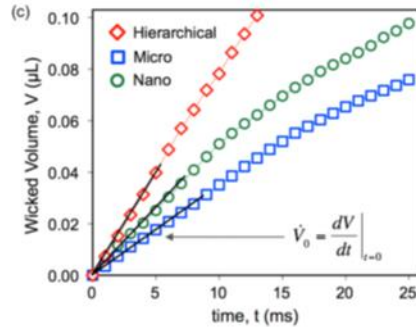
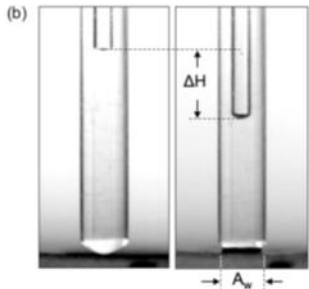
Hierarchical Surfaces



“Self assembled tobacco mosaic virus TMV”
 Nanostructure $\sim 1\mu\text{m}$ super hydrophile.
 Valable pour tout matériel métallique et non-
 métallique
 Spécialement adapté pour déposition sur
 grandes surfaces et des géométries
 complexes

ETUDES EXPERIMENTALES EN SPRAY COOLING

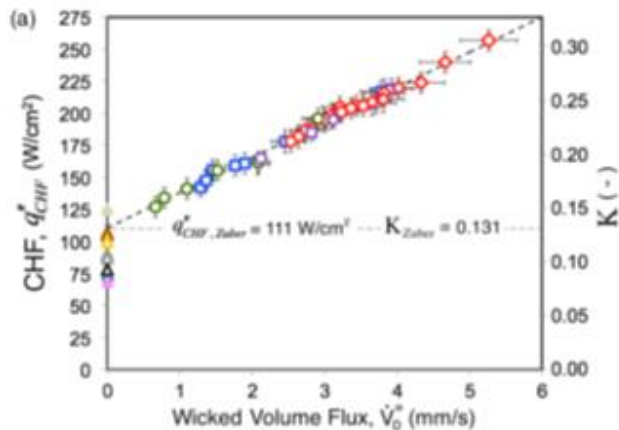
$$\dot{V}_0'' = \frac{1}{A_w} \left(\frac{dV}{dt} \right)_{t=0}$$



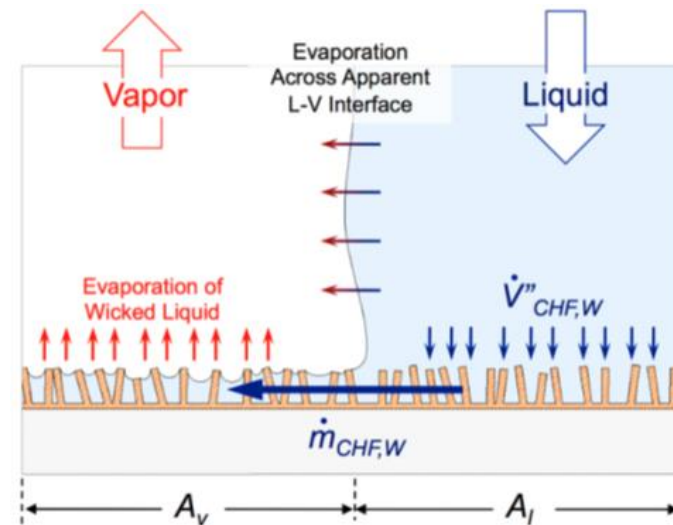
WICKABILITY

Paramètre phénoménologique, mesurable qui caractérise la capacité inhérente d'une surface structure à transporter su fluide par capillarité.

Capture les effets de la taille de la nano/micro-structure, effets de morphologie, mouillabilité et porosité dans un seul paramètre phénoménologique.



La wickability est le seul paramètre significatif (CHF) dans l'ébullition en paroi (quand super hydrophile)



ETUDES EXPERIMENTALES EN SPRAY COOLING

[2001-2002Rini] Pool Boiling et Spray cooling en FC-72 en saturation.

- Visualisation de la interaction goutte - bulle
- Visualisation => Estimation de la contribution de la nucléation primaire, secondaire, cycle de vie de la bulle.

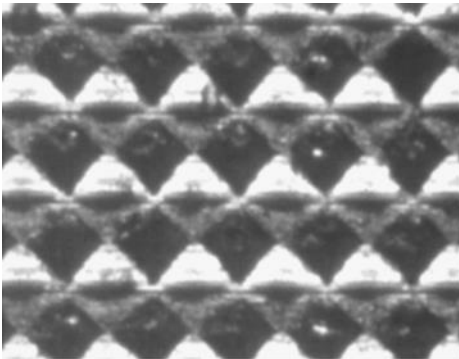
En régime diphasique

- Augmentation du flux de gouttes => augment des nucléations secondaires, transport par convection forcée et arrachement de bulles.
- Nucléation secondaire crée plus de bulles (85%) que la nucléation en paroi.
- Contribution au flux de chaleur (approx 50% secondaire, et 50% primaire) pour tout flux de gouttes.

ETUDES EXPÉRIMENTALES EN SPRAY COOLING

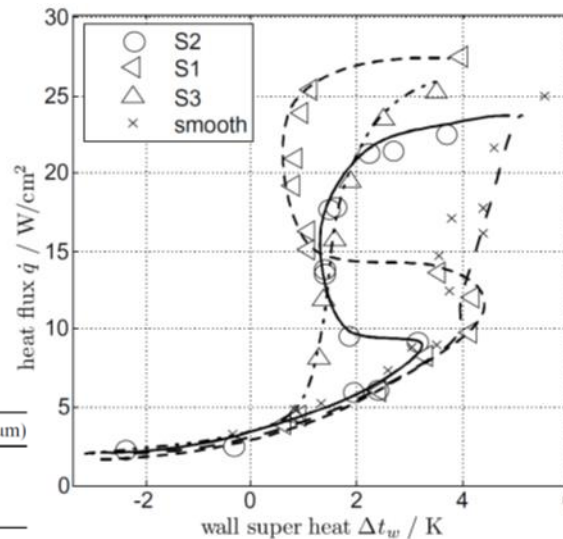
[2006Sodtke]

- 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).

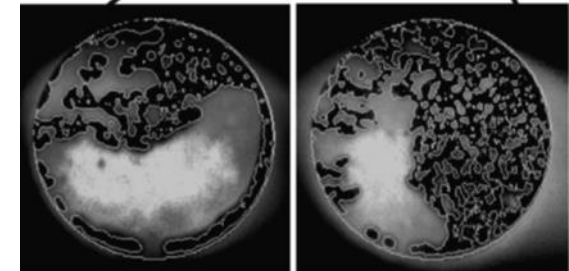
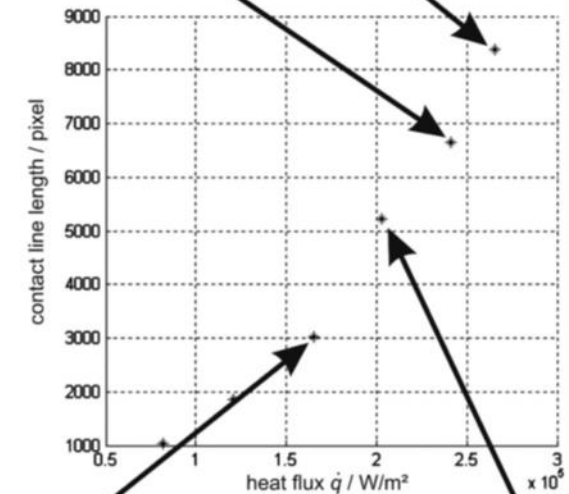
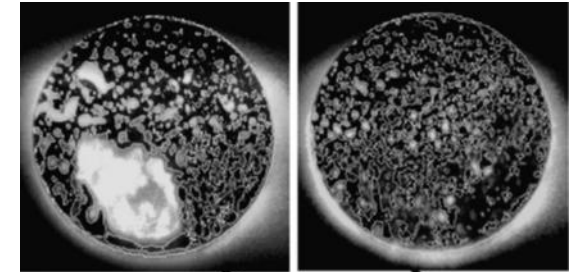


Dimensions of surface structures

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)







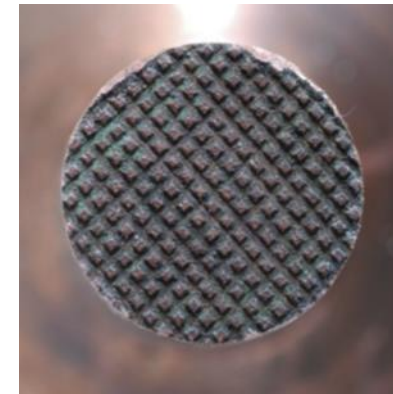
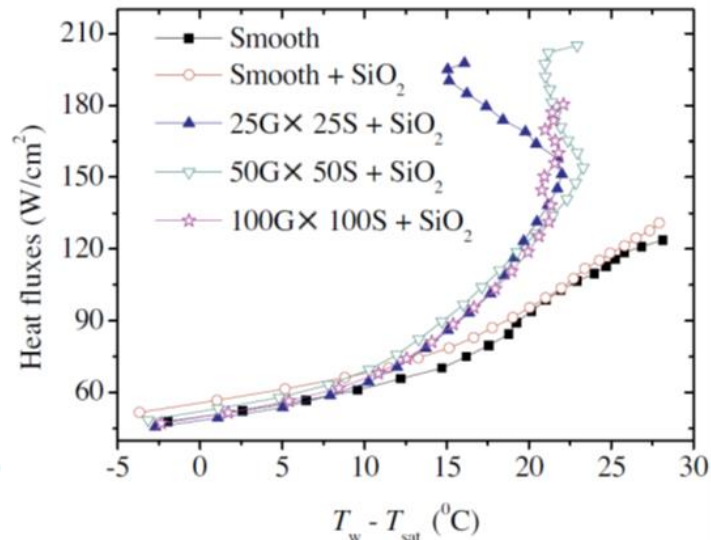
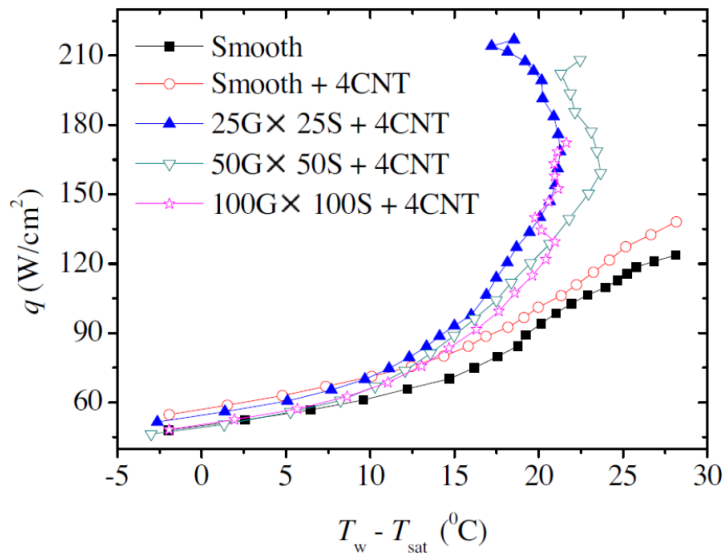
[2013-2014-2015Zhang]

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

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

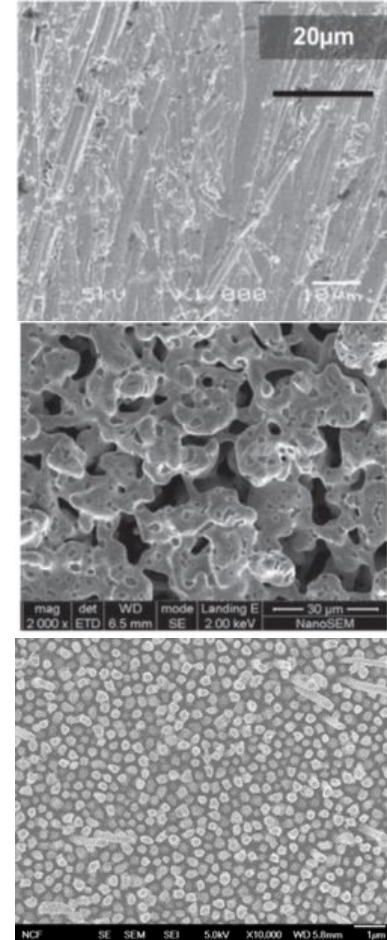
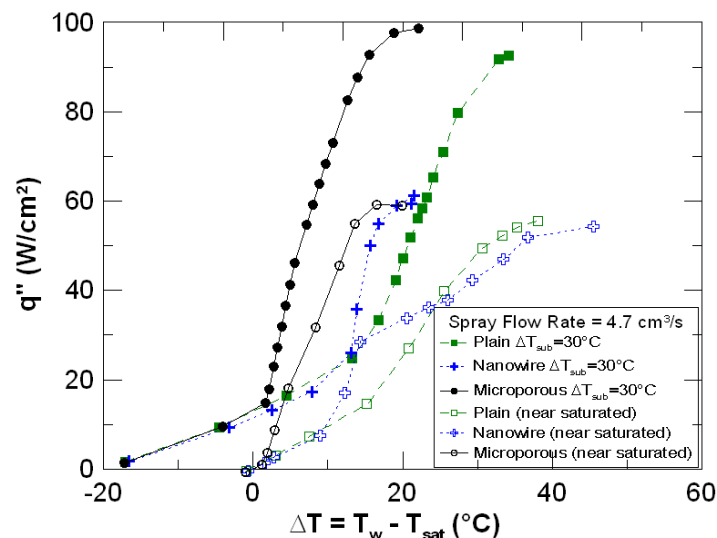
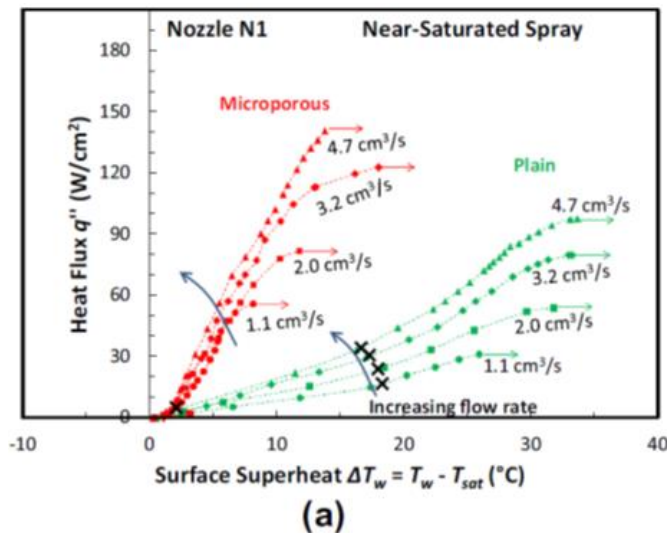
Deionized water contact angles on various surfaces.

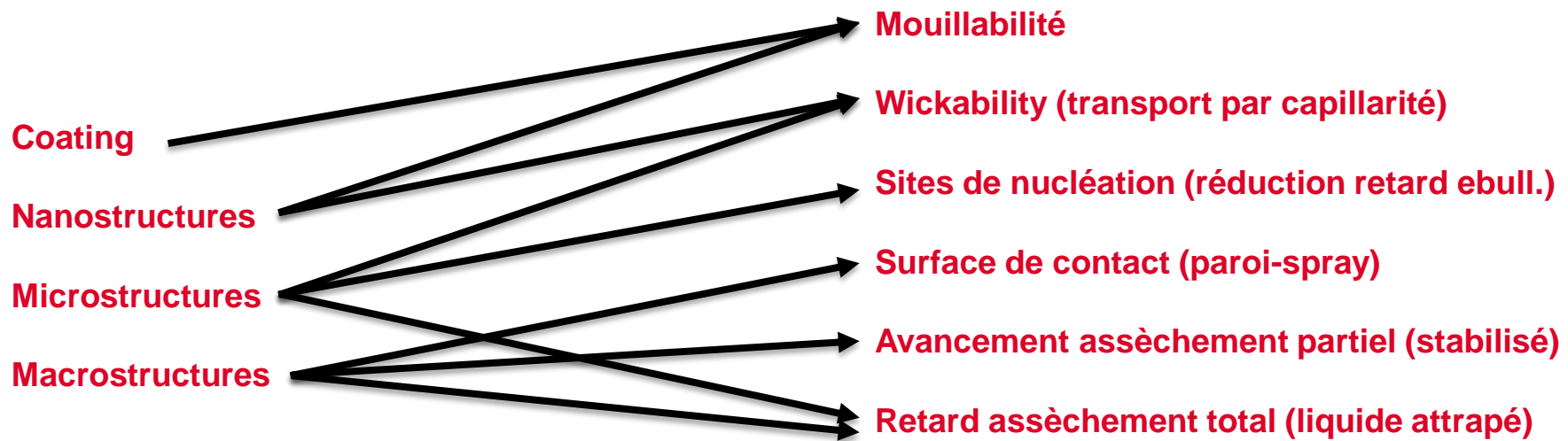
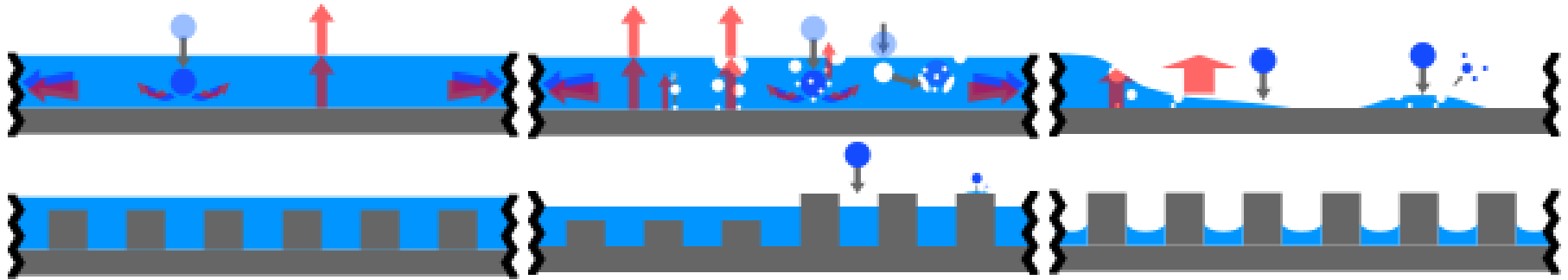
Surface	Droplet shape	Contact angle (°)
Si (smooth)		62.5
Si + SiO ₂		13.1
Si + 1CNT + SiO ₂		10.5
Si + 4CNT + SiO ₂		8.0



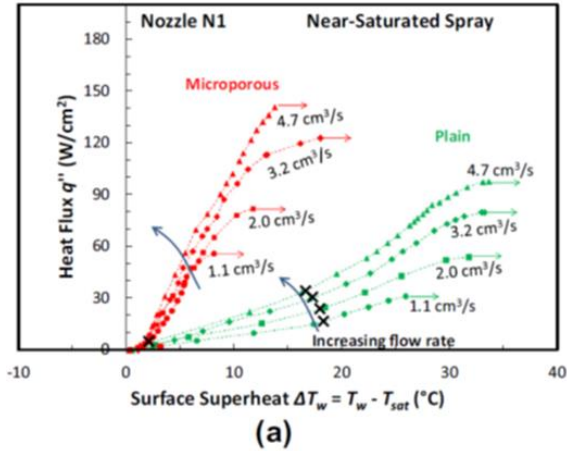
[2010-2014Thiagarajan] Etude expérimentale HFE7100

- Micro structuration (haute porosité –Wickability-) et Nano structuration (nanowires)
- Microstructure: Amélioration consistante du transfert thermique, avancement de la nucléation et CHF (Augment nombre sites de nucléation, remouillage plus efficace des zones asséchées).
- Les nanowires n'améliorent pas significativement le transfert thermique ni le CHF (HFE7100 est déjà très mouillant, structure trop petite pour faire des sites de nucléation). Fragile.

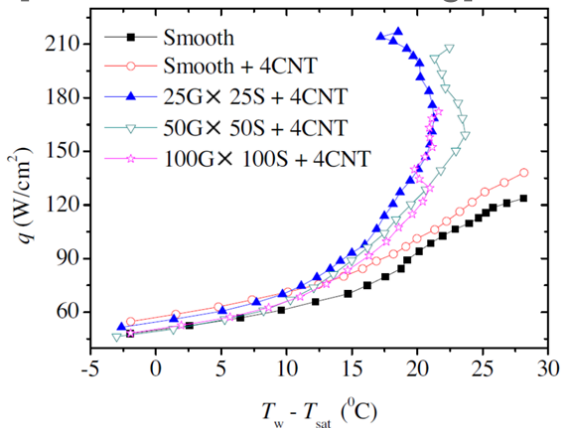




[2010-2014Thiagarajan] Micro

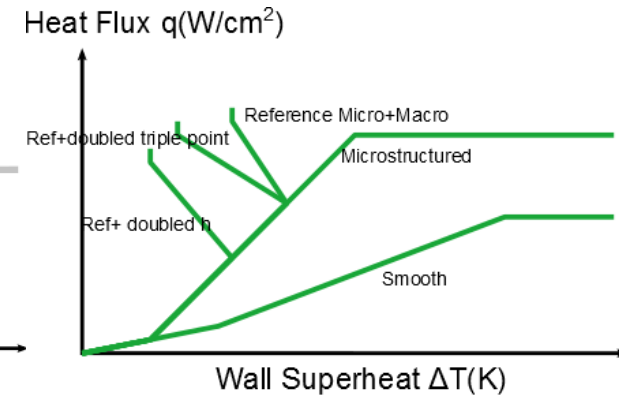
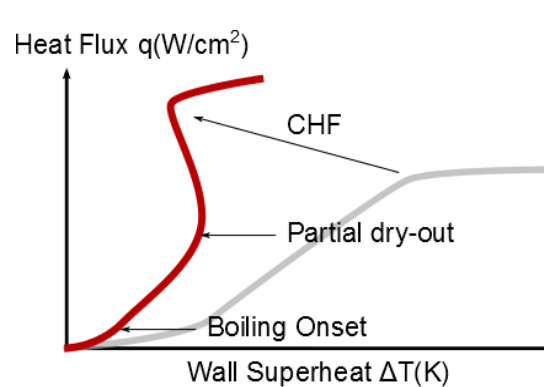


[2013-2014-2015Zhang] Macro



TRAVAIL EN COURS:

- Dimensionner un jeu d'échantillons de test (et son plan d'essai)
 - Lisse
 - Micropores
 - Macrostructures (goujon, pyramides, canaux, cavités...)



MERCI POUR VOTRE ATTENTION

REFROIDISSEMENT DIPHASIQUE PAR SPRAY COOLING,
INTENSIFICATION DES ÉCHANGES
PAR STRUCTURATION DE LA PAROI
(POUR DES FLUIDES FRIGORIGÈNES)

FRANCESC MADRID*

N CANEY*

A GRUSS **

*LEGI UGA

**CEA LER

BIBLIOGRAPHIE

- [2012Rahman] Rahman, M.M.; Olceroglu, E.; McCarthy, M; POOL BOILING HEAT FLUX ENHANCEMENT USING BIOTEMPLATED NANOSTRUCTURES, pages 223-226, Proceedings PowerMEMS, 2012
- [2014Rahman] Md Mahamudur Rahman, Emre Ölçeroğlu, and Matthew McCarthy. Role of Wickability on the Critical Heat Flux of Structured Superhydrophilic Surfaces. Langmuir, 2014, 30 (37), pp 11225–11234. DOI: 10.1021/la5030923
- [2015Rahman] Md Mahamudur Rahman and Matthew McCarthy. BIOTEMPLATED NANOSTRUCTURES FOR ENHANCING CHF AND HTC DURING POOL BOILING. Pages 125-126. Proceedings of the 9 th International Conference on Boiling and Condensation Heat Transfer April 26-30, 2015 – Boulder, Colorado.
- [2001Rini] Rini DP, Chen R-H, Chow LC. Bubble behavior and heat transfer mechanism in FC-72 pool boiling. ExpHeatTransf2001;14:27–44.
- [2002Rini] Rini DP, Chen R-H, Chow LC. Bubble behavior and nucleate boiling heat transfer in saturated FC-72 spray cooling. J Heat Transf 2002;124:63.
- [2006Sodtke] C. Sodtke, P. Stephan (2007). Spray cooling on micro structured surfaces. Int. J. of Heat and Mass Transfer, vol. 50, p.4089-4097
- [2013Zhang] Z. Zhang, J. Li, P. Jiang, Experimental investigation of spray cooling on 655 at and enhanced surfaces, Applied Thermal Engineering 51 (1-2) (2013).
- [2014Zhang] Zhang, Zhen, et al. "Experimental investigation of spray cooling on smooth and micro-structured surfaces." International Journal of Heat and Mass Transfer 76 (2014): 366-375.
- [2015Zhang] Zhang, Zhen, et al. "Experimental investigation of spray cooling on micro-, nano-and hybrid-structured surfaces." International Journal of Heat and Mass Transfer 80 (2015): 26-37.
- [2010Thiagarajan] Thiagarajan, Suraj Joottu, et al. "Enhancement of heat transfer with pool and spray impingement boiling on microporous and nanowire surface coatings." 2010 14th International Heat Transfer Conference. American Society of Mechanical Engineers, 2010.
- [2014Thiagarajan] Thiagarajan, Suraj Joottu, Sreekant Narumanchi, and Ronggui Yang. "Effect of flow rate and subcooling on spray heat transfer on microporous copper surfaces." International Journal of Heat and Mass Transfer 69 (2014): 493-505.