



Systemes diphasiques pour le controle de l'électronique

Panorama des systemes diphasiques dédiés au refroidissement de l'électronique

Y. Bertin, Flavio, Filippo, Marc, Valérie,...

Institut P' • UPR CNRS 3346
SP2MI • Téléport 2
Boulevard Marie et Pierre Curie • BP 30179
F86962 FUTUROSCOPE CHASSENEUIL Cedex

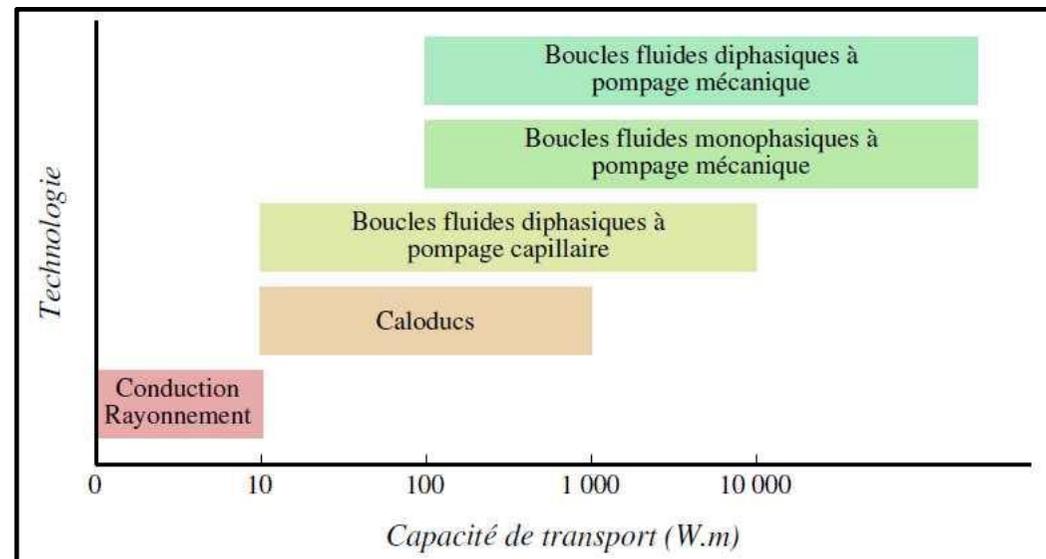


Plan de la présentation

- Indicateurs de performance
- Quelques systèmes diphasiques actifs
 - Micro-canaux, jets/sprays,..
- Systèmes diphasiques passifs
 - Thermosiphons
 - Caloducs,..
 - Chambre à vapeur
 - Boucle diphasique,..
 - ...
- Quelques développements de laboratoire

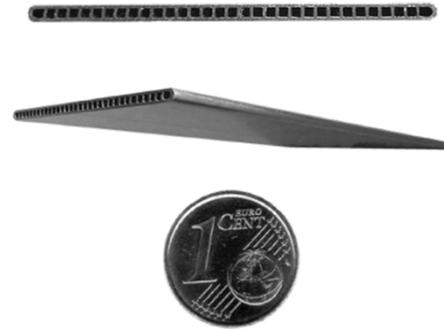
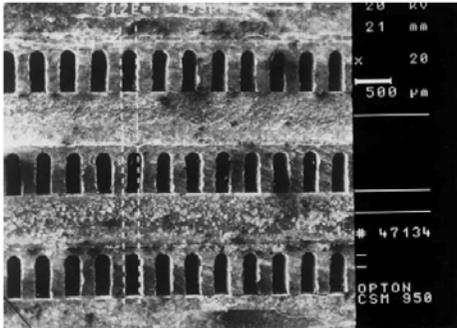
Indicateurs de performance

- Flux de chaleur
- Densité de flux de chaleur
- Résistance thermique
- Coefficient d'échange
- Compacité, ...

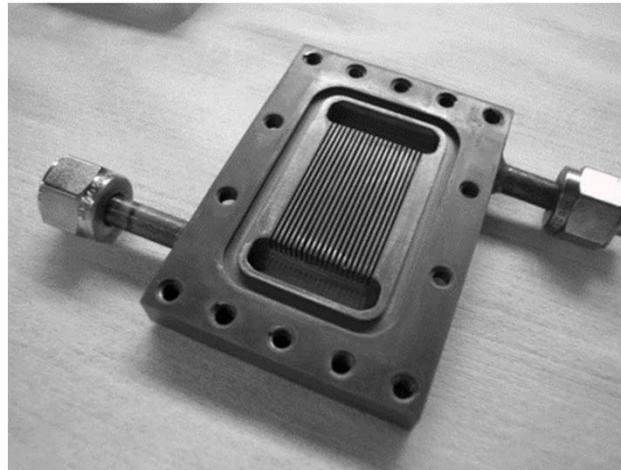


Quelques systèmes diphasiques actifs : Echangeur à micro-canaux

[P. -X. Jiang 2001]

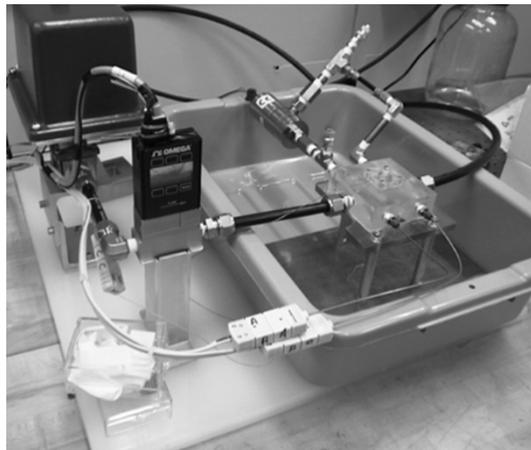


[Agostini et al. 2007]

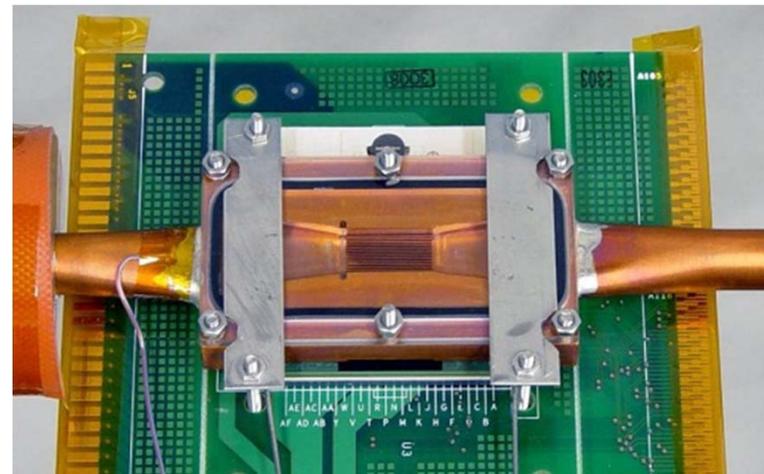


Quelques systèmes diphasiques actifs : Echangeur à micro-canaux

- Technologie prometteuse pour l'évacuation de densité de chaleur élevées jusqu'à 275 W/cm^2 [Faulkner et al.], 250 W/cm^2 , [Kosar et al.] (0,227 mm : diamètre hydraulique)
- Caractérisé par une faible résistance thermique (0,4 K/W [Zhang et al.]).
- Pertes de charge très élevées (jusqu'à 1,6 MPa/m [Steinke et al.])
- Pas de modèles physiques aboutis - Résultats obtenus par les différents auteurs souvent contradictoires.
- Surfaces d'application de la chaleur faibles

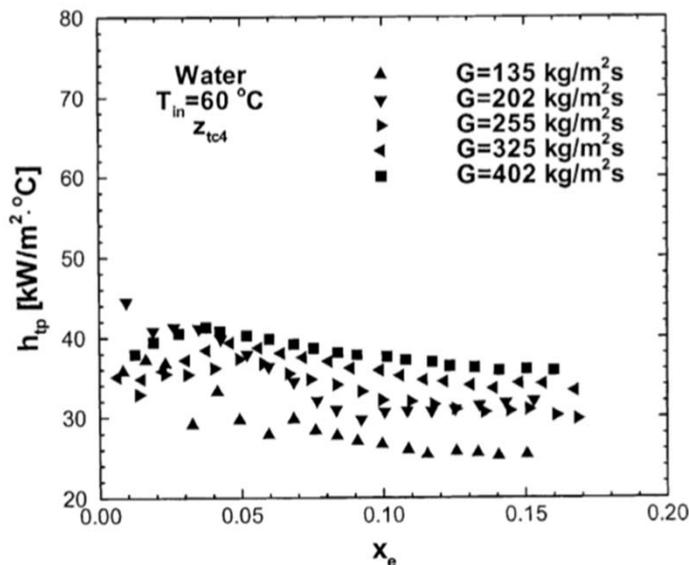


[Colgan et al. 2004]

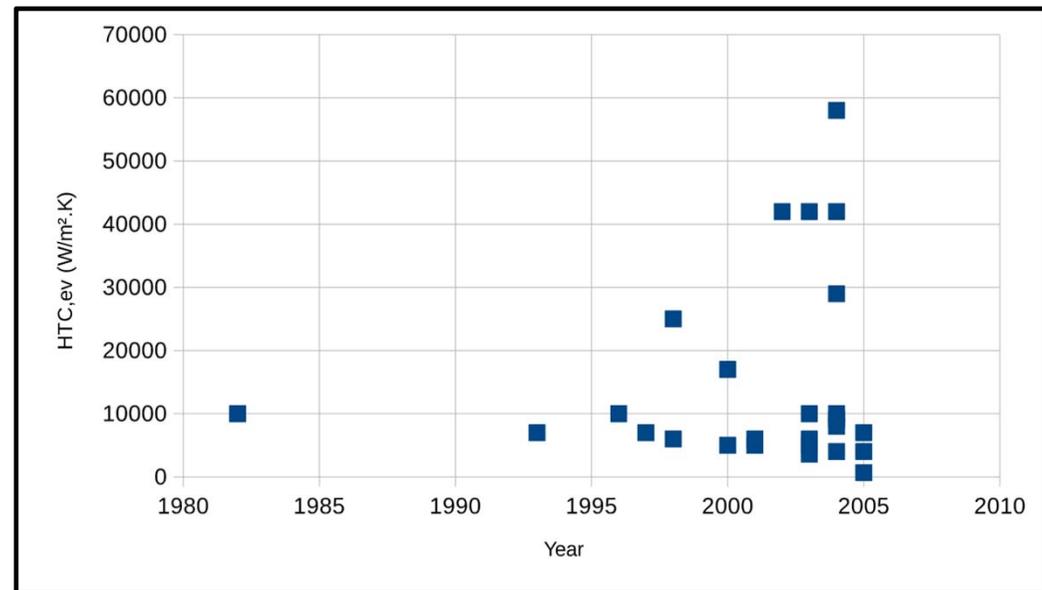


Quelques systèmes diphasiques actifs : Echangeur à micro-canaux

- Echangeurs à micro-canaux: le rapport surface d'échange thermique/volume de l'échangeur est de **l'ordre de 10^8 [W/m³K]** contre le **100 [W/m³K]** des échangeurs classiques [Jiang et al.]
- Fluides : eau, Rxyz

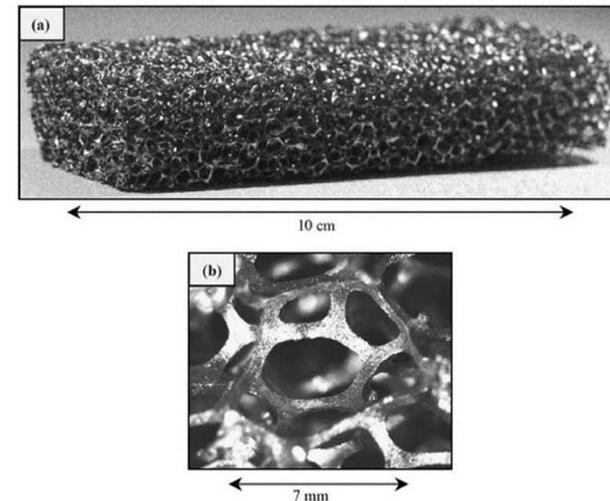


[Qu et al. 2003]



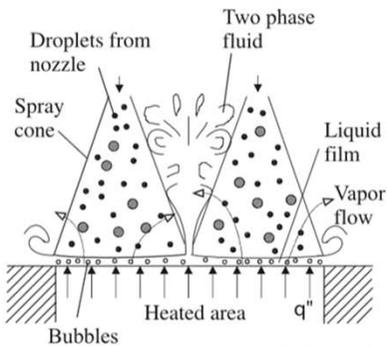
Quelques systèmes diphasiques actifs : Echangeur à mini canaux et mousse poreuse

- L'échange thermique est plus efficace:
 - Présence d'un matériau à haute conductivité (mousse)
 - Augmentation de la surface mouillée : chemin tortueux dans la mousse [Agostini et al.].
 - Distribution de température plus homogène sur la surface chauffée [Jiang et al.]
 - Rth plus faible
 - Mais perte de charge augmentées → 2 à 5MPa/m



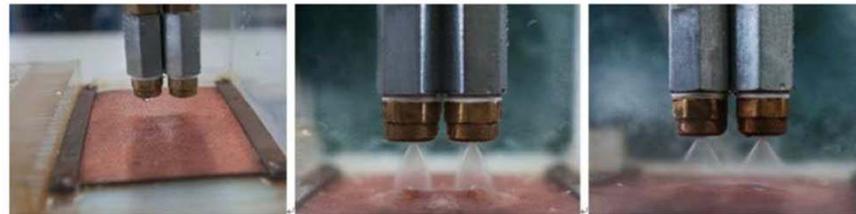
Metal foam [Agostini et al. 2007]

Quelques systèmes diphasiques actifs : Jets et sprays



[Lin et al. 2003]

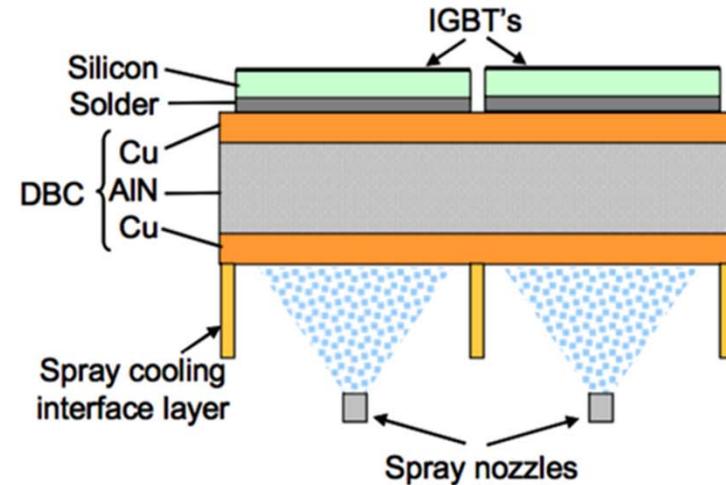
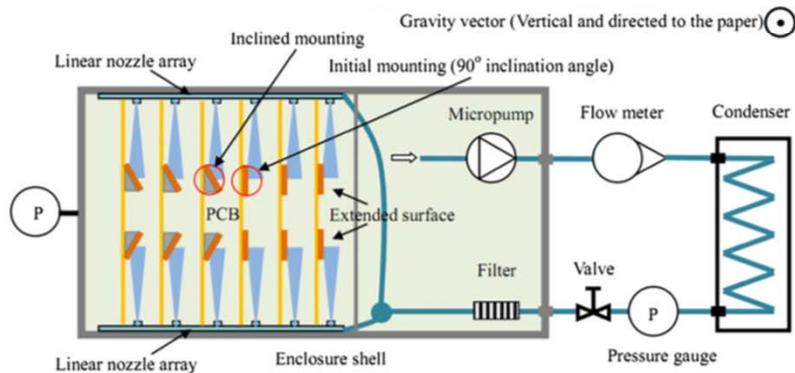
Technologie active à la plus grande capacité de densité de flux de chaleur extraite



[Wang et al. 2013]

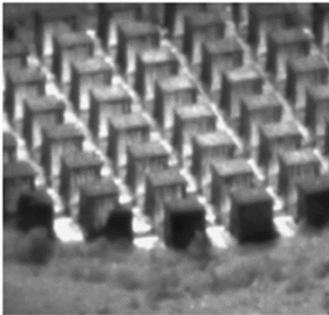


[Zhang et al. 2016]

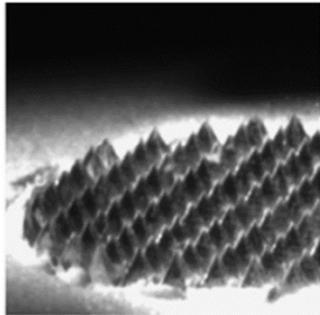


[Bostanci et al. 2004]

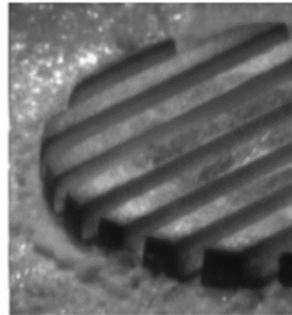
Quelques systèmes diphasiques actifs : Jets et sprays



Cubic Pin Fins

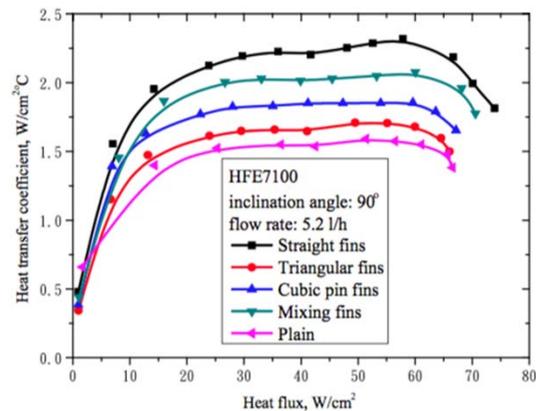


Pyramids

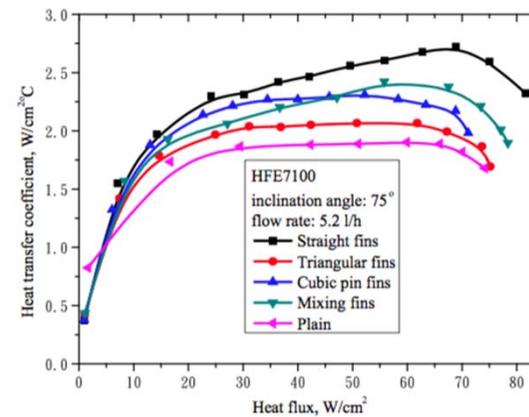


Straight Fins

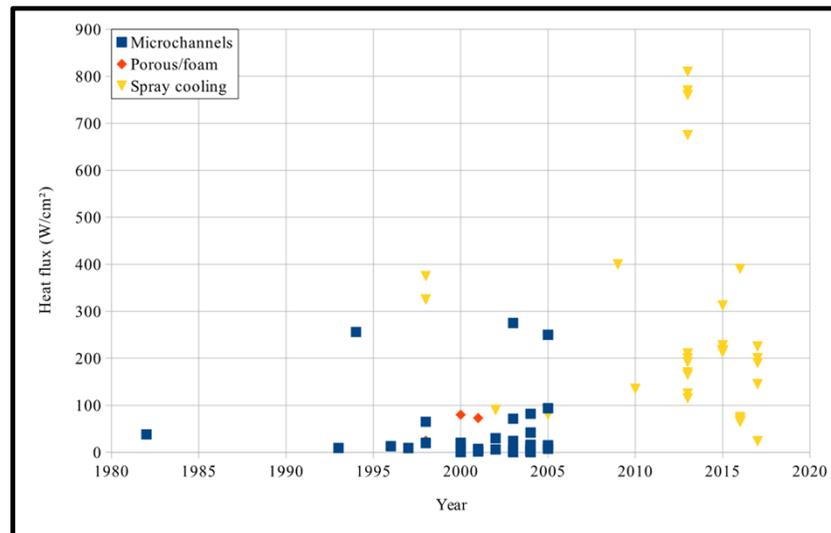
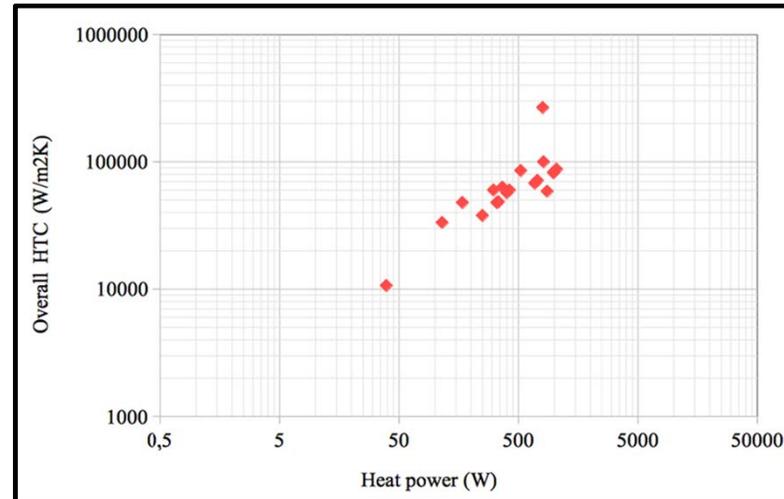
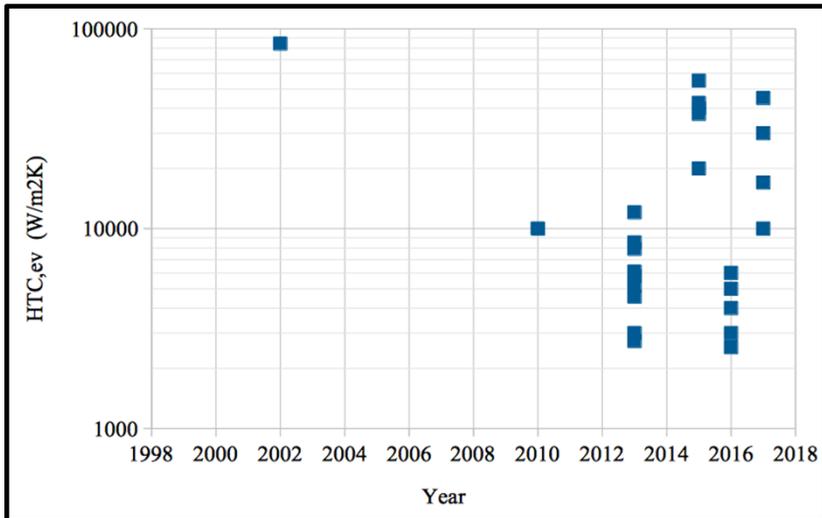
800 W/cm² [Zhang et al.]
en utilisant des surfaces augmentées



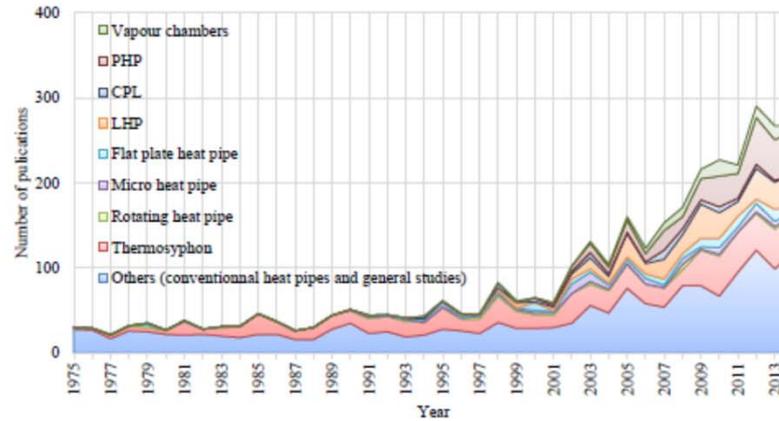
[Zhang et al. 2016]



Quelques systèmes diphasiques actifs : Jets et sprays

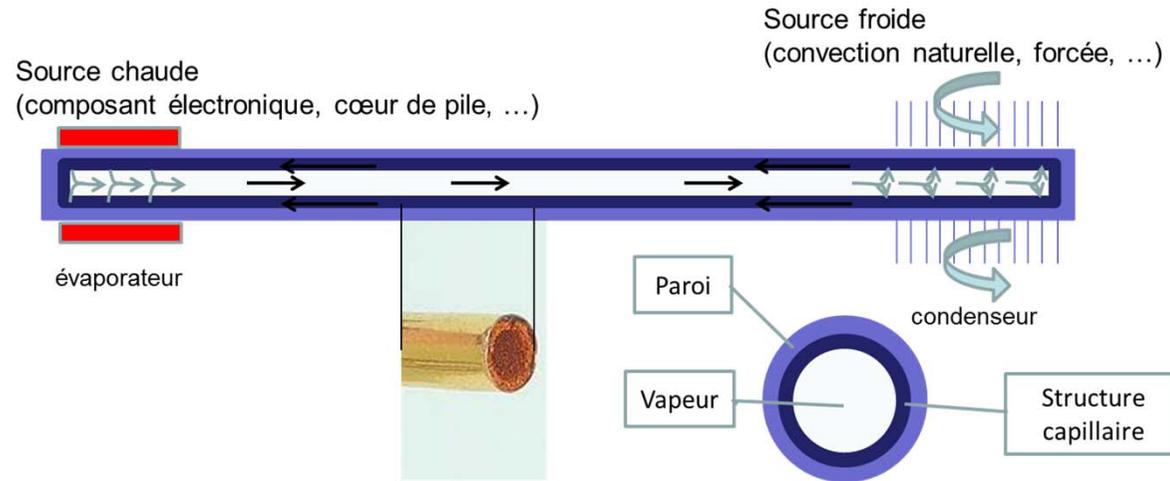


Systemes diphasiques passifs : Caloducs



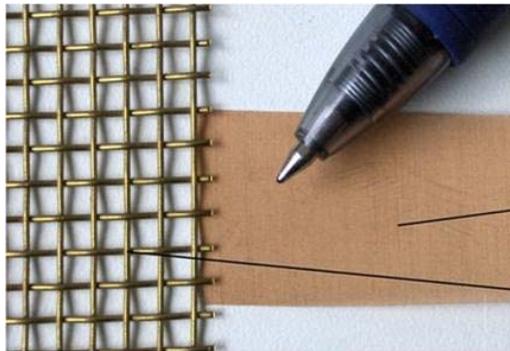
Lips et al 2017

Figure 4 Number of papers dedicated to heat pipes according to the database of Web of Science™

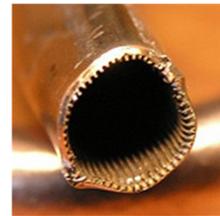


Systemes diphasiques passifs : Caloducs

Structures capillaires de caloducs plats

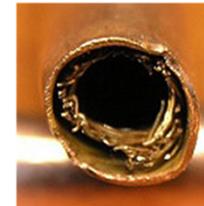


<http://thermolab.co.kr>



Rainures

1 cm



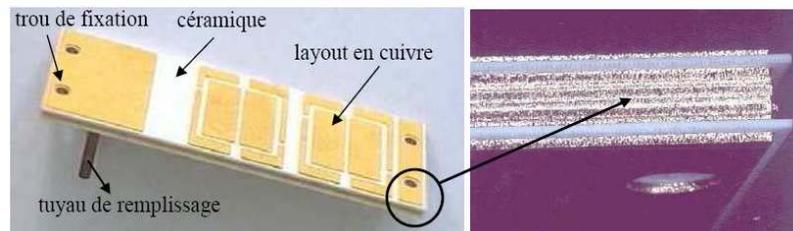
Mèches



Poudres frittées

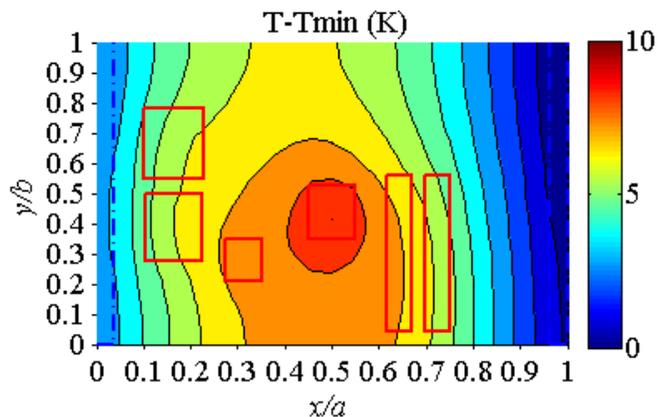
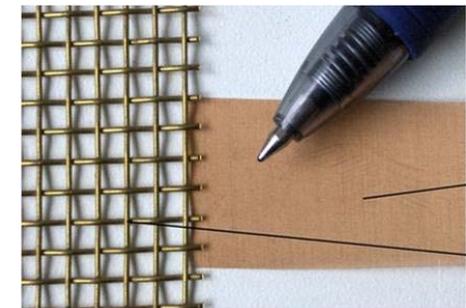
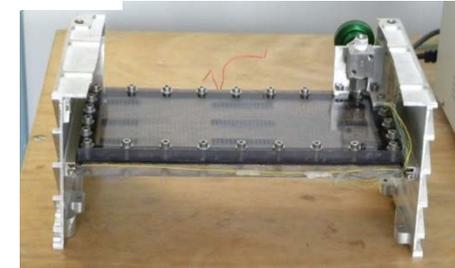
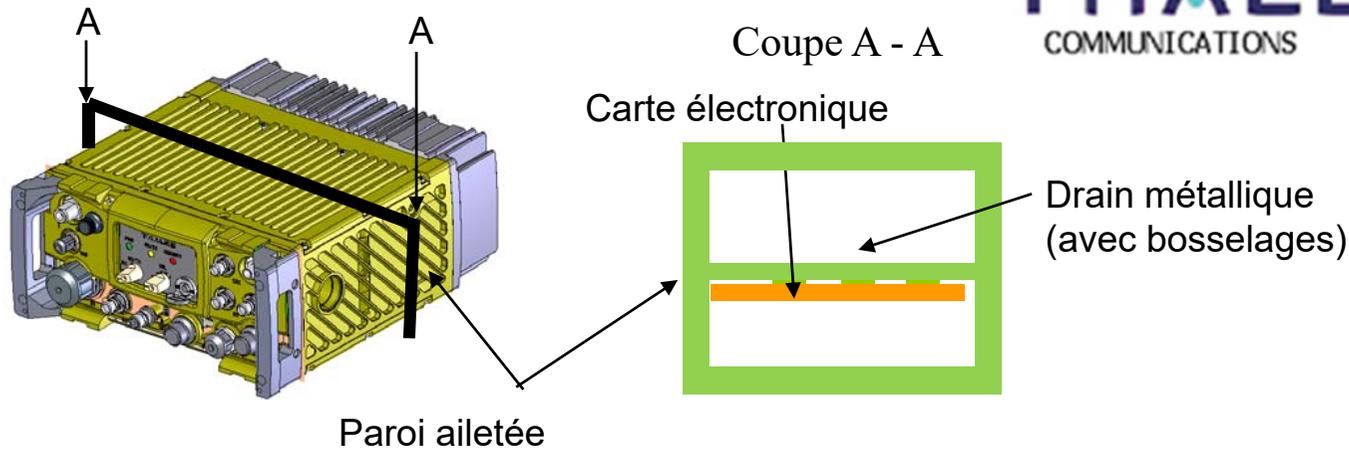


Structures capillaires usuelles



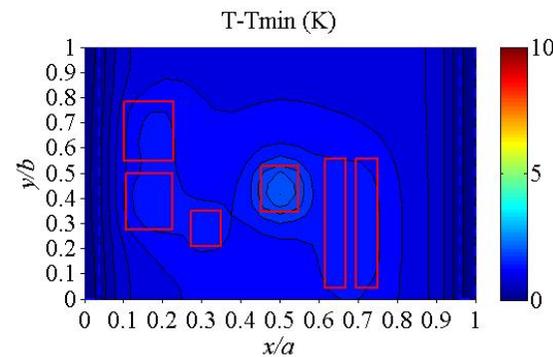
Systèmes diphasiques passifs : Un exemple de caloduc plat

THALES
COMMUNICATIONS



Plaque pleine aluminium

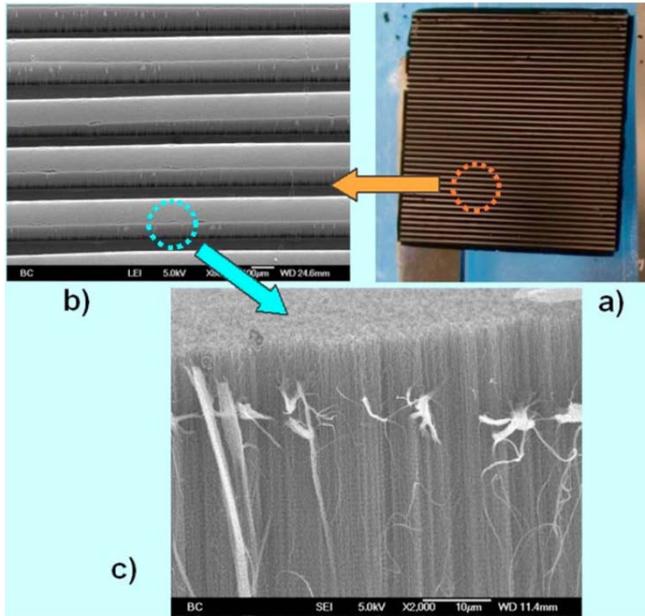
$$\Delta T_{\max} = 9,1 \text{ K}$$



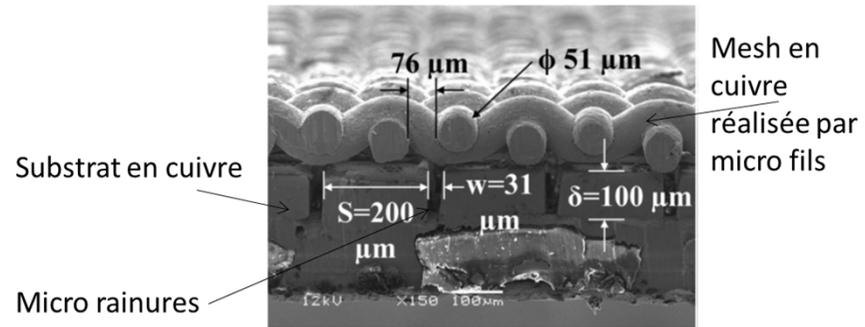
Caloduc plat

$$\Delta T_{\max} = 2,4 \text{ K}$$

Systemes diphasiques passifs : caloduc plat

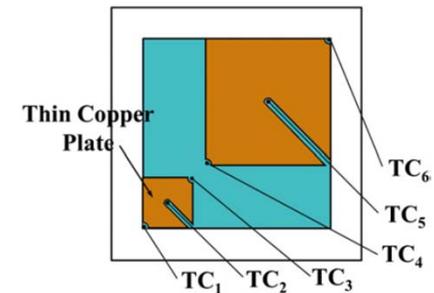
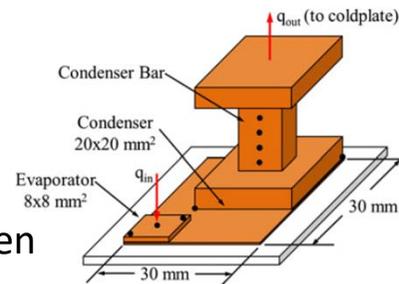


Matrice plate avec structure poreuse hybride



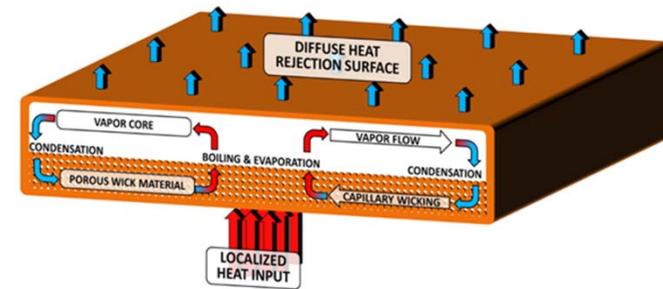
(Oshman et al. 2012)

- Très hautes performances pour un caloduc avec **matrice en silicium**;
- **Structure poreuse** formée par array de nanotubes en carbone et rainures ;
- Capacité d'évacuation de chaleur jusqu'à 600 W/cm^2 (à 24W). (Cai et al. 2010)
- Conductivité thermique équivalente : jusqu'à 2000 W/mK (Oshman et al. 2012)

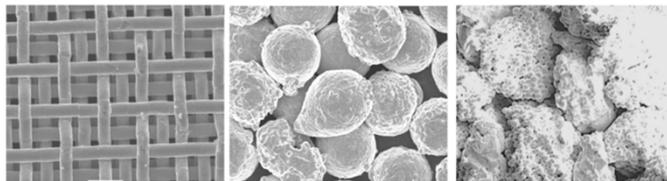


Systemes diphasiques passifs : « Chambre à vapeur »

- Développement intensif dans les années 2002-2013
- Diffuseur Hautes densité de flux
- Retour liquide assuré par pompage capillaire.
- Etudes récentes de la structure poreuse →
Amélioration irrigations et transfert



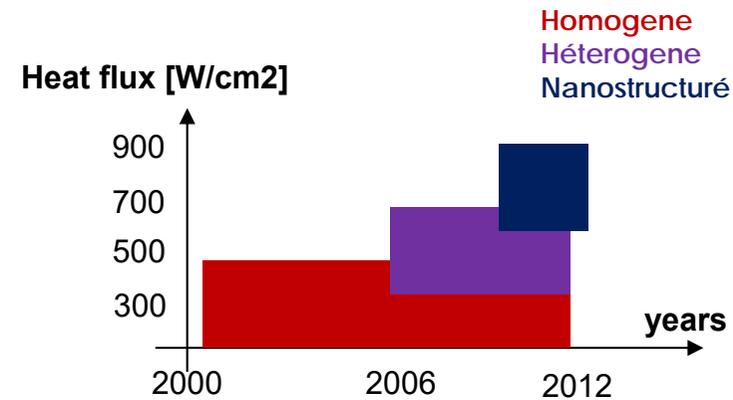
Representation schematique d'une chambre à vapeur
Weibel et al. 2013



« Sintered copper screen mesh » (56µm wire diamètre)

« Sintered particule copper mesh » (100µm diamètre)

« Biporous wick » (600µm diamètre agglomeration de particule de 60 µm)



Capillary-fed evaporation/boiling
Weibel et al. 2013

Systèmes diphasiques passifs : « Chambre à vapeur »

- Quelques indicateurs:

Densité de flux thermique : 300 W/cm^2 (Cai et al. 2009)

Puissance : ordre $0,1 \text{ kW}$ (Zhang et al. 2009)

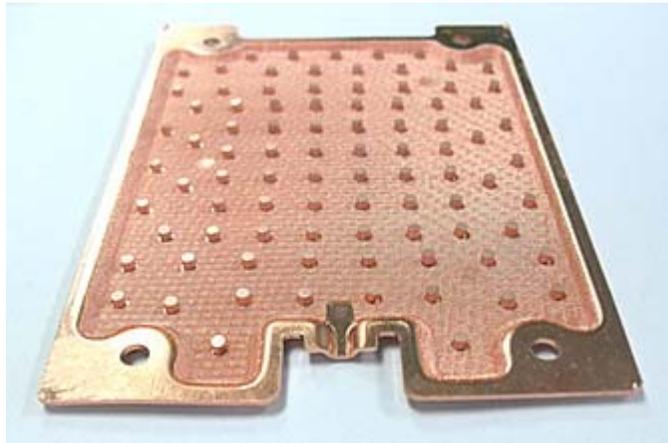
Coefficient de transfert à l'évaporateur: jusqu'à $6 \text{ kW/m}^2 \text{ K}$ (Hsieh et al. 2008)

- Points forts :

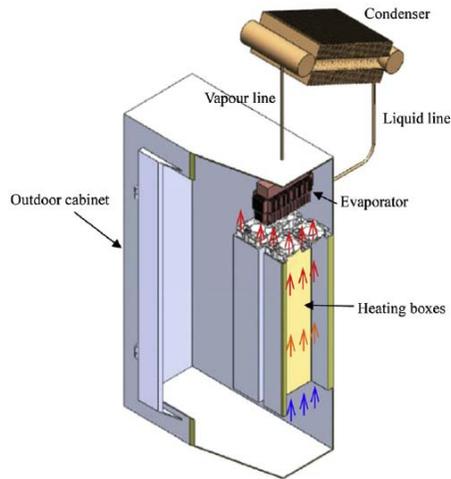
Solutions idéales pour évacuer des grandes densités de flux sur des petites surfaces ($\sim 1 \text{ cm}^2$).

- Faiblesses :

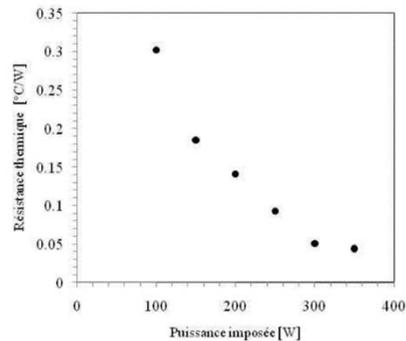
Nécessité d'avoir un puits de chaleur en correspondance de la source chaude.



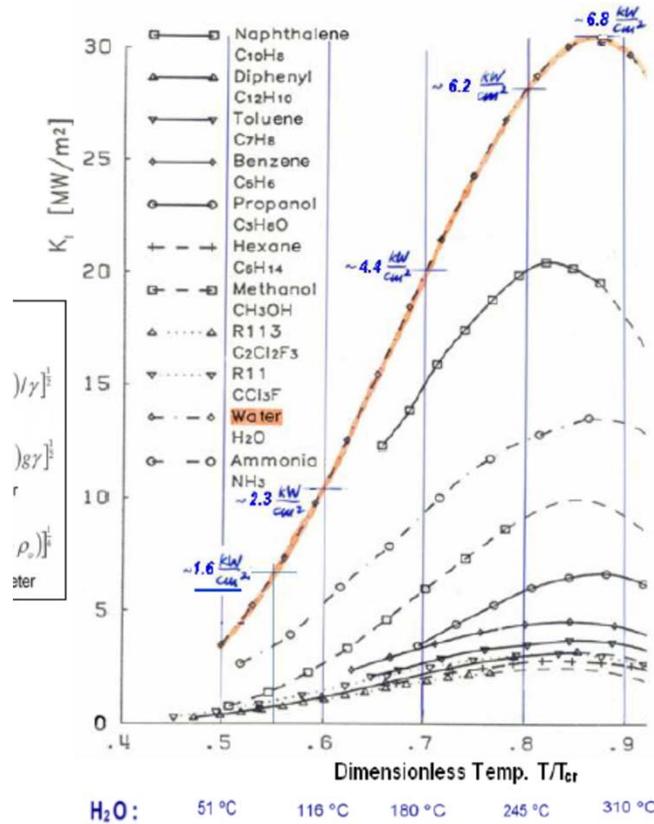
Systèmes diphasiques passifs : Boucles et thermosiphons



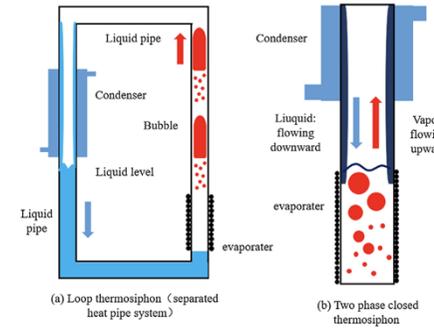
Refroidissement d'armoire de télécommunications
Loualia et al 2015



Bus thermique sur une distance de 5m (Oliveira et al. 2015).



Qmax selon Groll



Boucle thermosiphon et thermosiphon classique
Ding et al. 2017

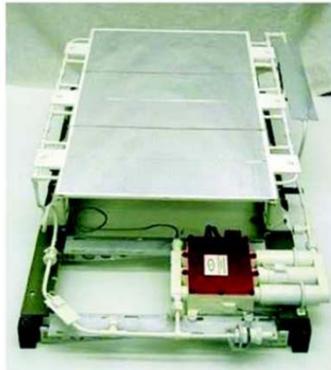
Atherm



1kW en thermosiphon (Abou-Ziyhan et al. 2001)

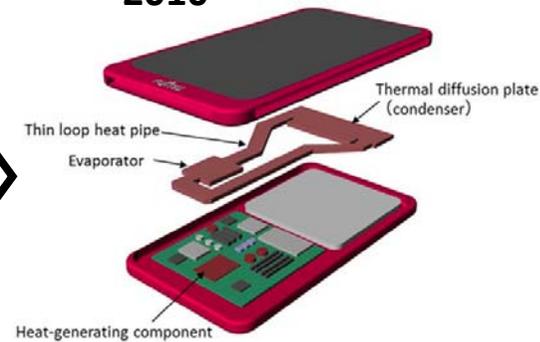
Systèmes diphasiques passifs : Boucle à pompage capillaire

1978

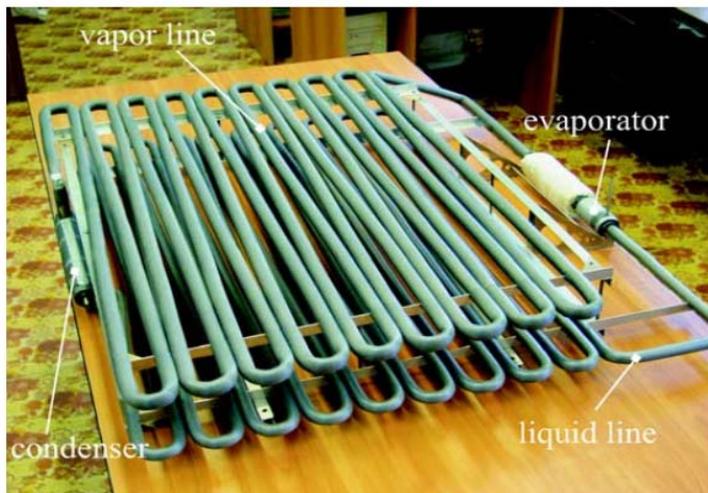


Maydanik et al. 2005

2010



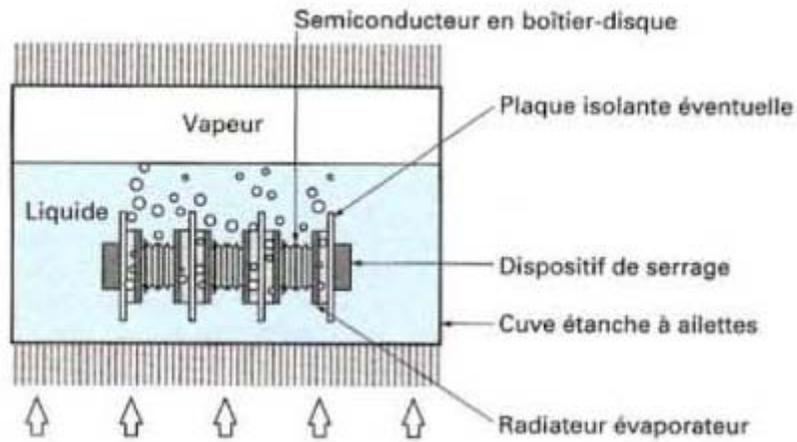
<http://www.fujitsu.com>



LHP : 21 m de longueur
Maydanik et al. 2005

→ 28-35m (Buffone et al. 2016).
revêtement en Graphene
diamètre de pores de l'ordre des 10
nanomètres

Systemes diphasiques passifs : Performances

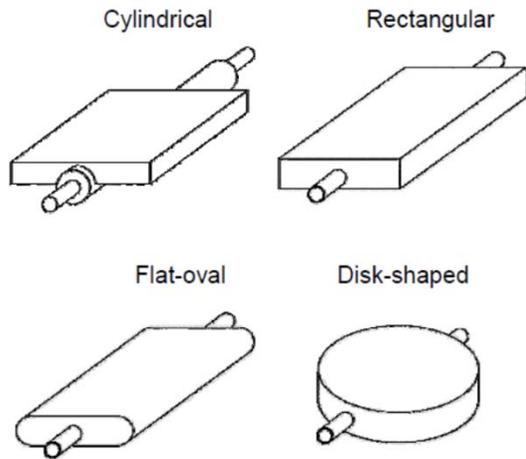


Immersion : 20 à 25 W/cm²

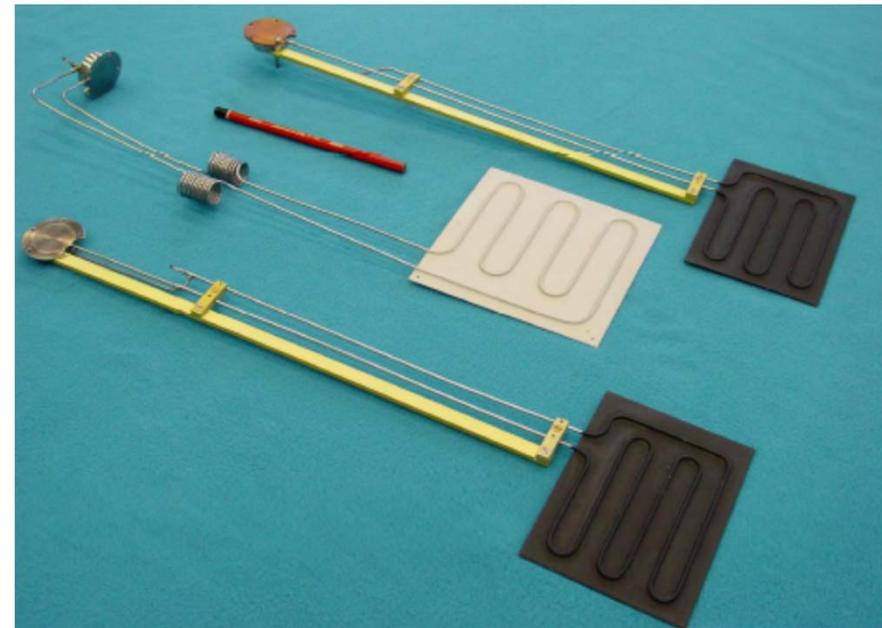
BFDPT : qq kW



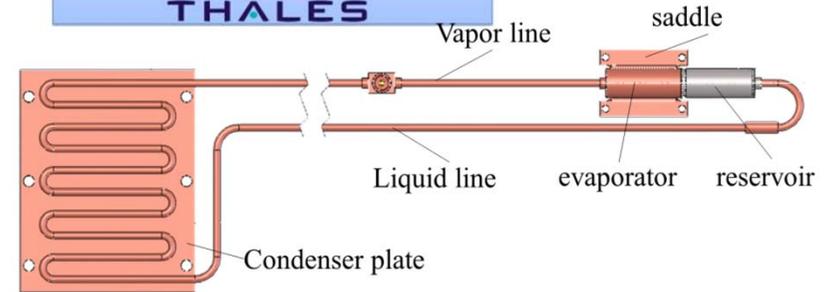
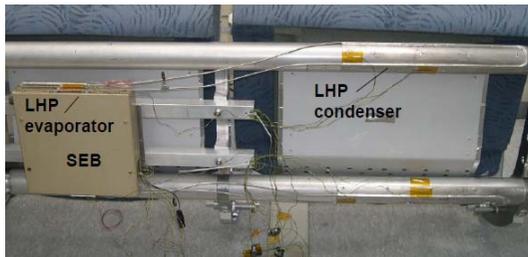
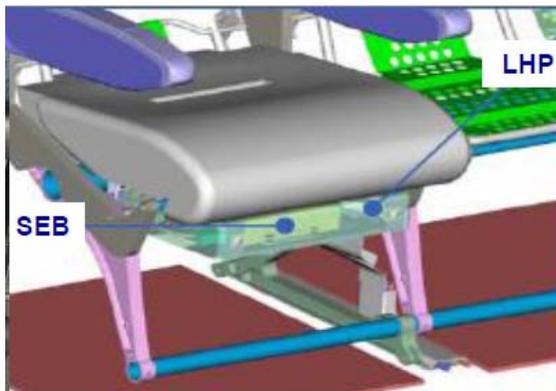
Systemes diphasiques passifs : Boucle LHP à évaporateur plat



www.Atherm.com



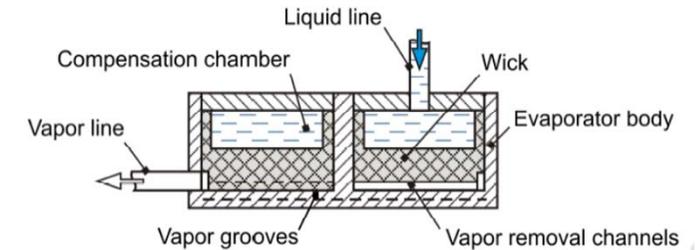
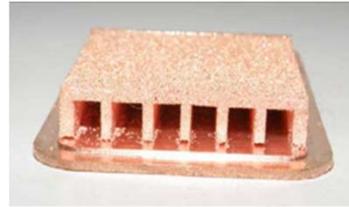
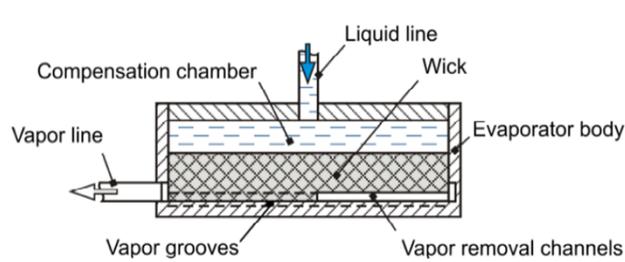
Systemes diphasiques passifs : Boucle à pompage capillaire



Institute of Thermal Physics UB RAS



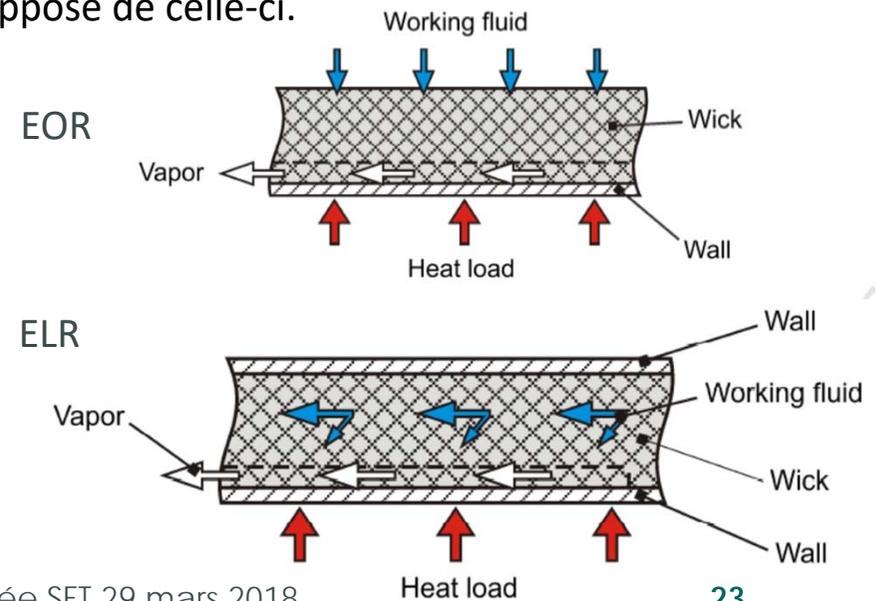
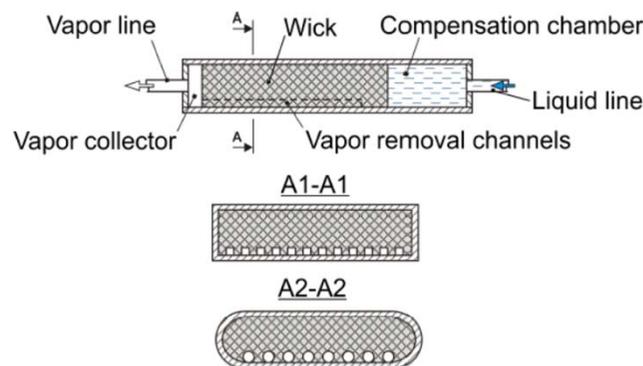
Systemes diphasiques passifs : Boucle LHP à évaporateur plat



Deux typologie d'évaporateurs plats:

ELR (longitudinal replenishment) : le liquide est pompé dans une direction parallèle à celle de la paroi chauffée et le réservoir est en contact sur la surface latérale du milieu poreux.

EOR (opposite replenishment) : le liquide est pompé dans la direction perpendiculaire à celle de la paroi chauffée et le réservoir est sur le coté opposé de celle-ci.



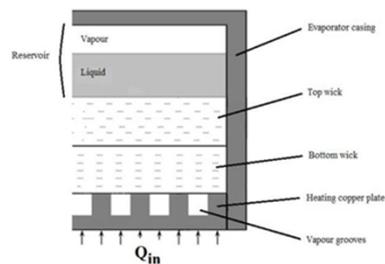
Systèmes diphasiques passifs : Boucle LHP à évaporateur plat

Avantages par rapport aux évaporateurs cylindriques:

- Absence d'interface thermique (« saddle ») donc résistance thermique de conduction à l'évaporateur plus faible et poids réduit;
- Solution compacte et performante.

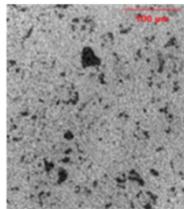
Inconvénients :

- Présence des parois solides minces à l'évaporateur peut mener à des soucis due aux déformations de la structure solide (pour fluides comme l'eau et l'ammoniac);
- Conception et fabrication plus compliquée par rapport aux évaporateurs cylindriques.

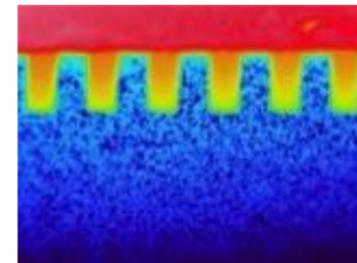


Evaporateur avec deux milieux poreux

Giraudon et al. 2016



Tomographie d'un poreux

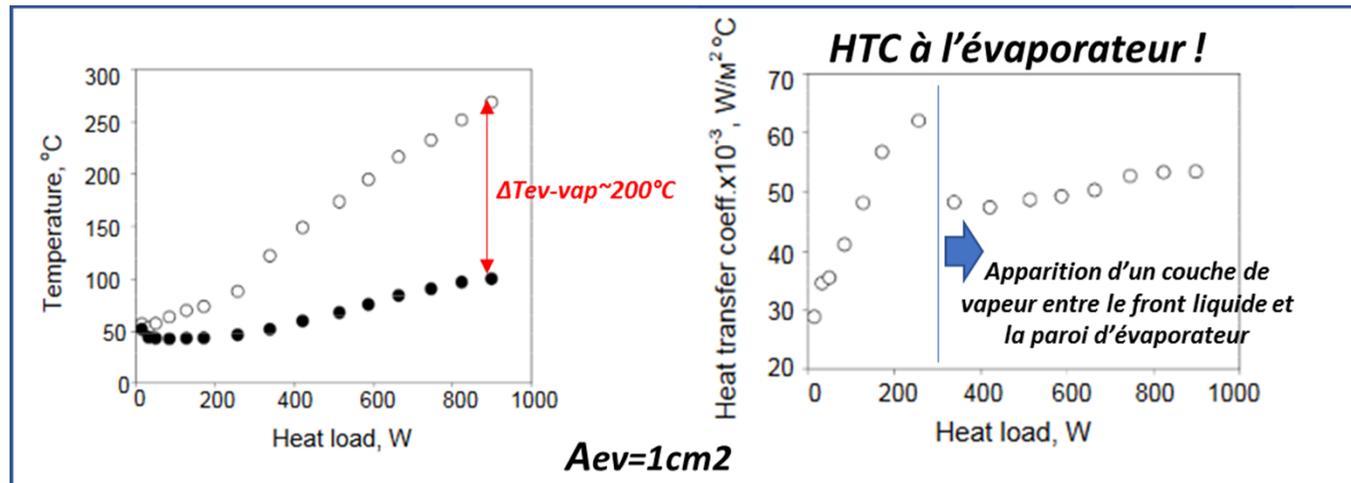
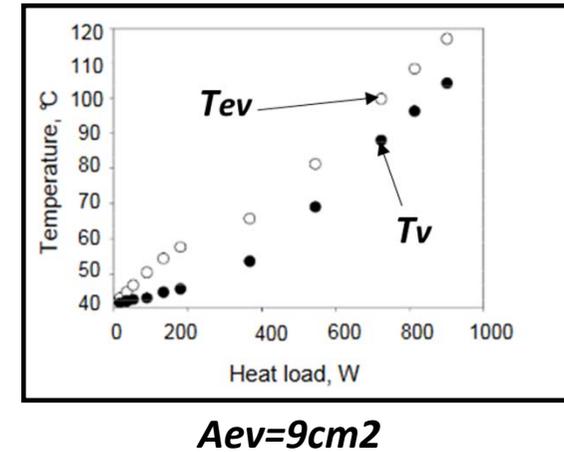
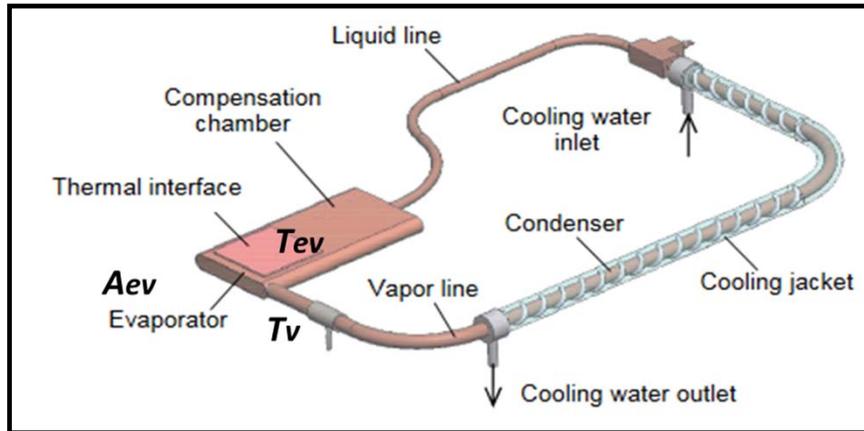


Visualisation infra-rouge de l'interface d'évaporation

Kimihide et al. 2016

Systemes diphasiques passifs : Mini boucle LHP à Evap. Plat

Boucle LHP à Evaporateur plat – $S = 9 \text{ cm}^2$ ou 1 cm^2
Maidanik 2014



Systèmes diphasiques passifs : Performances boucle LHP

Evaporator shape	Evaporator dimensions, mm	Housing/wick material	Working fluid	Evaporator min. thermal resistance, °C/W	Heat load, W	Vapor line length/dia, mm	LHP position, grad	Ref.
disk	50/13	SS/titanium	water	0.091	250	570/2.4	0	[3]
disk	30/10	copper/copper	water	0.019	80	150/2	0	[13]
disk	30/10	copper/nickel	water	0.08	60	50/2	0	[13]
disk	30/10	SS/nickel+titanium	ammonia	0.15	120	520/1.5	0	[8]
disk	102/?	aluminum+SS/nickel	ammonia	0.07	250	1720/6.35*	0	[24]
rectangular	50/40/30	SS/polypropylene	methanol	0.375	80	500/4	0	[29]
rectangular	30/30/15	copper/copper	water	0.015	450	120/5	-90	[34]
rectangular	177.8/177.8/50.3	SS/SS	water	-	450	4300/7.75	0	[32]

* - outer diameter

Table 1. Main characteristics of LHPs with EOR

Performances pour évaporateurs plats à entrée normale

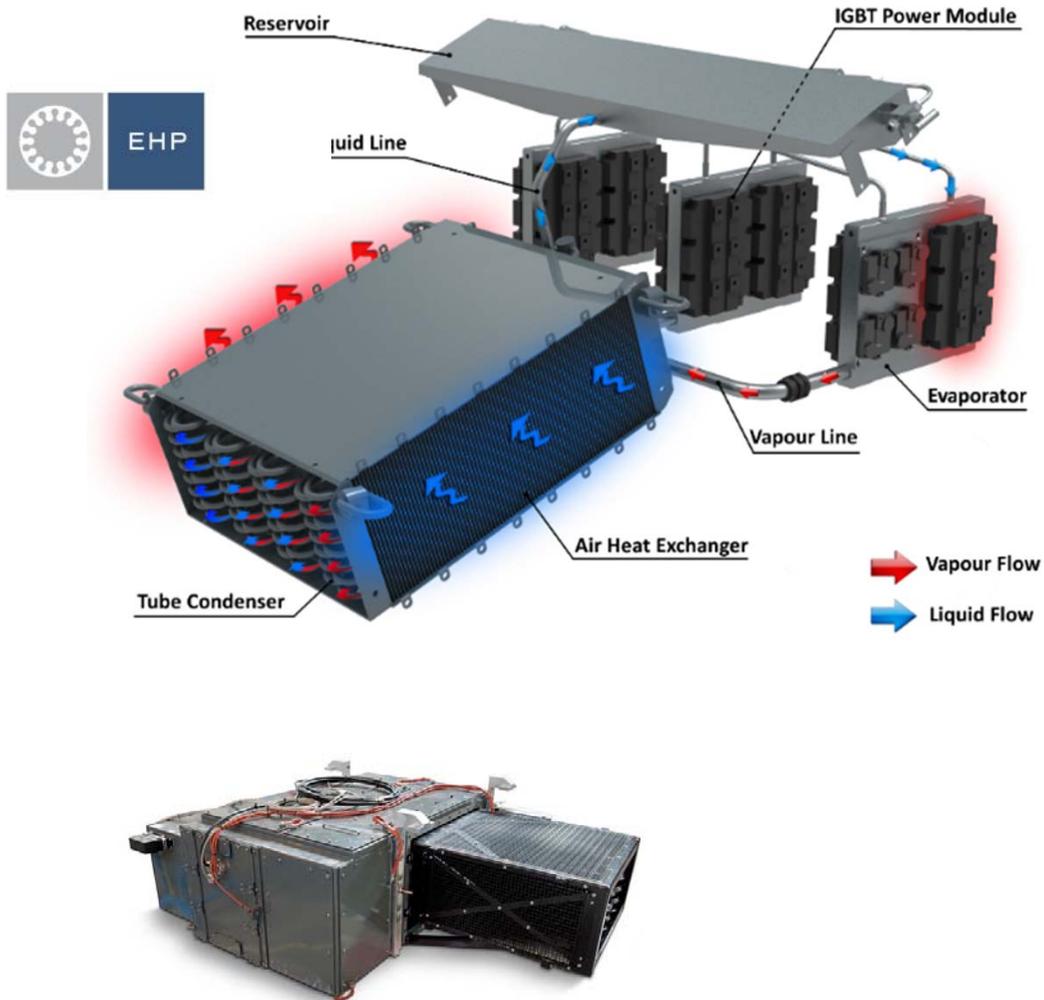
Performances pour évaporateurs plats à entrée latérale

Evaporator shape	Evaporator dimensions, mm	Housing/wick material	Working fluid	Evaporator min. thermal resistance, °C/W	Heat load, W	Vapor line length/dia, mm	LHP position, grad	Ref.
flat-oval	53/21.4/3.2	copper/copper	water	0.042	160	220/2.5	0	[9]
flat-oval	80/42/7	copper/copper	water	0.006	1200	120/5.4	0	[38]
rectangular	100/36.5/8	copper/copper	water	0.08	110	140/2.4	0	[39]
rectangular	45/35/5	copper/nickel	water	0.29	50	150/2	0	[45]
rectangular	76/54/6	copper/SS	methanol	0.13	18	100/1.76	0	[42]
rectangular	76/54/6	SS/SS	acetone	0.14	200	1350/6.35*	0	[44]

* - outer diameter

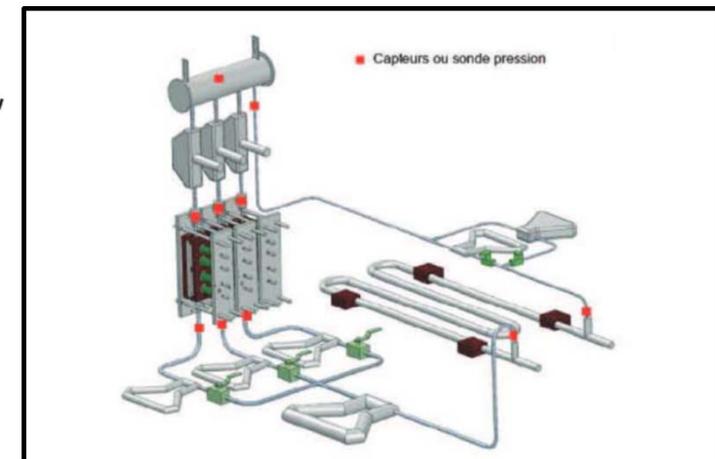
Table 2. Main characteristics of LHPs with ELR

Systemes diphasiques passifs : Boucle à pompage capillaire à Haute puissance

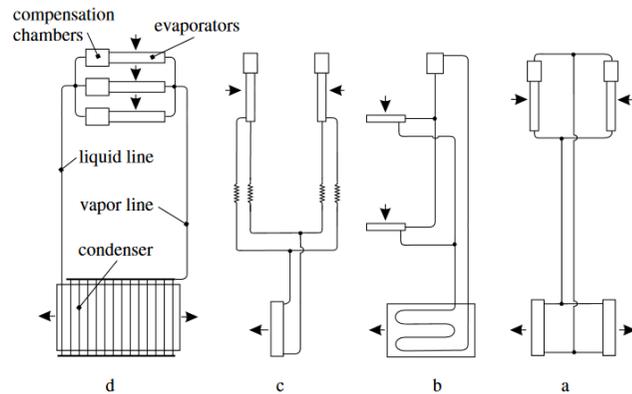


Performances

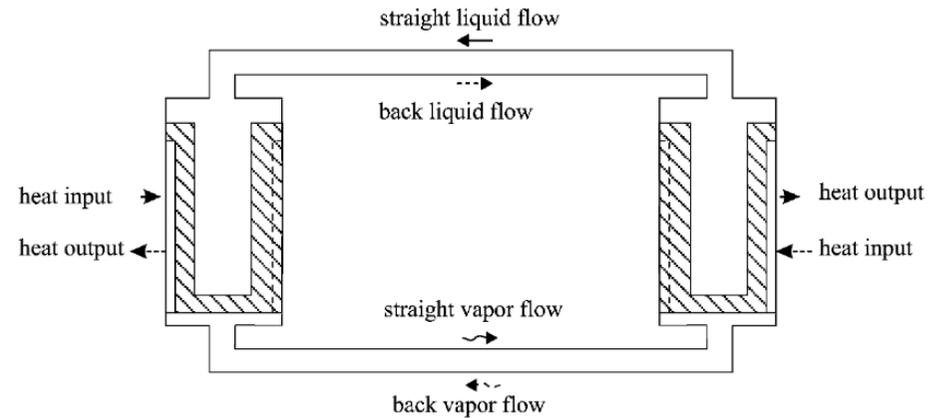
Densité de flux > 100 W/cm²
Flux de chaleur extrait > 5 kW



Systèmes diphasiques passifs : LHP avancées

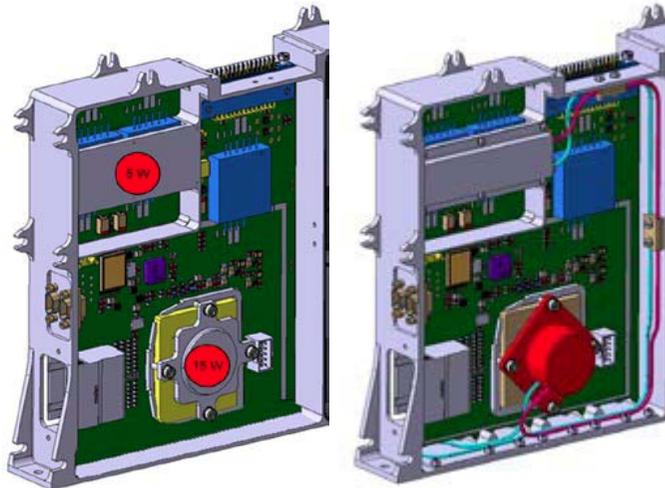


Multi-évaporator / condenser

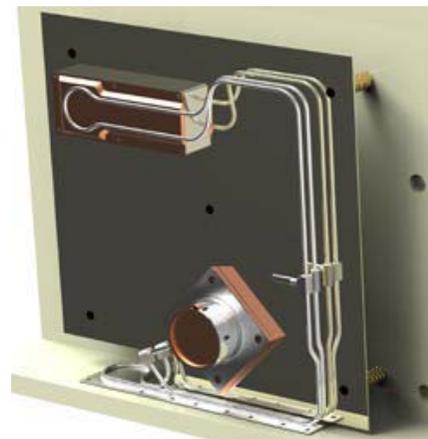


Maydanik et al. 2005

Réversible



Figus et al. 2016



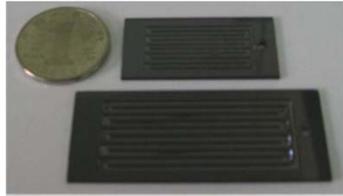
LHP étagée:

- Vapeur crée dans l'évaporateur en bas;
- Condensation partielle ou totale dans le condenseur;
- Re-évaporation sur la deuxième source en haut;
- Re-condensation finale

Systemes diphasiques passifs : Caloducs oscillants

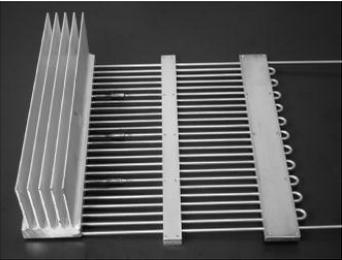
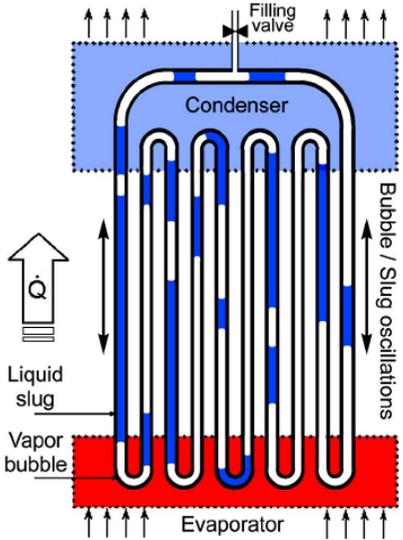


micro-caloduc oscillant en silicium
Qu et al. 2012

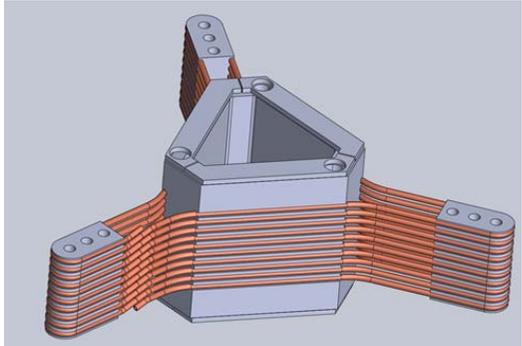


caloduc oscillant cuivre/eau
Javenas 2010

caloduc oscillant :
refroidissement d'IGBT

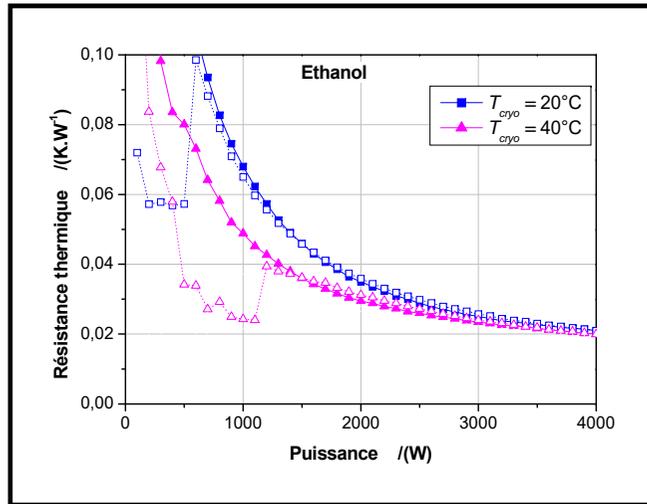
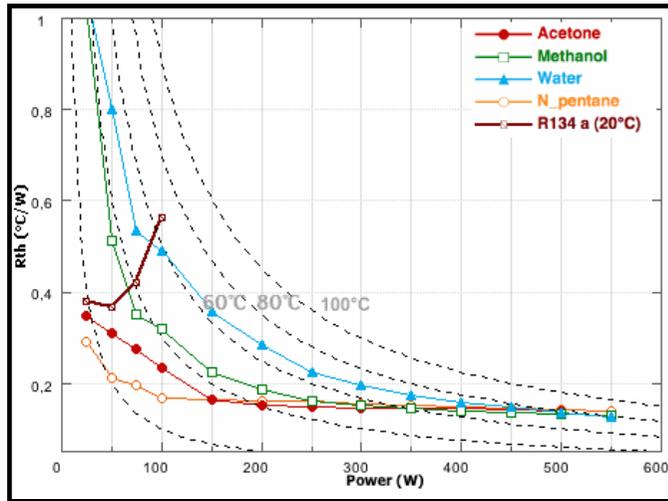
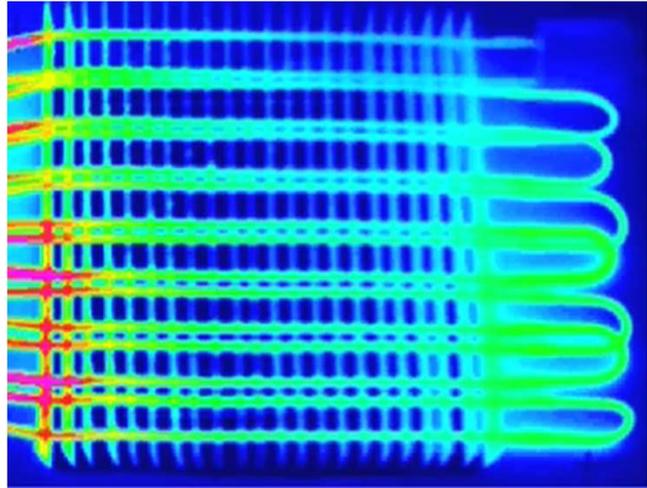
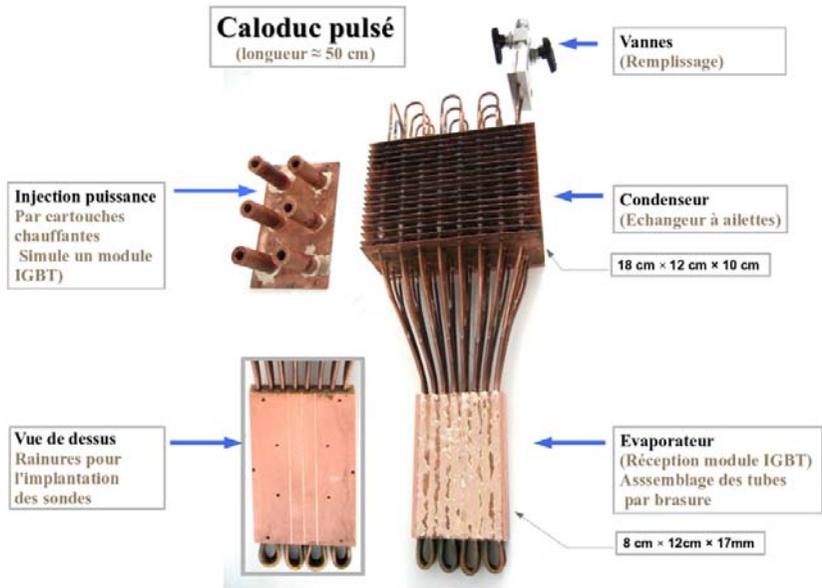


Caloduc oscillant
Cai et al. 2006

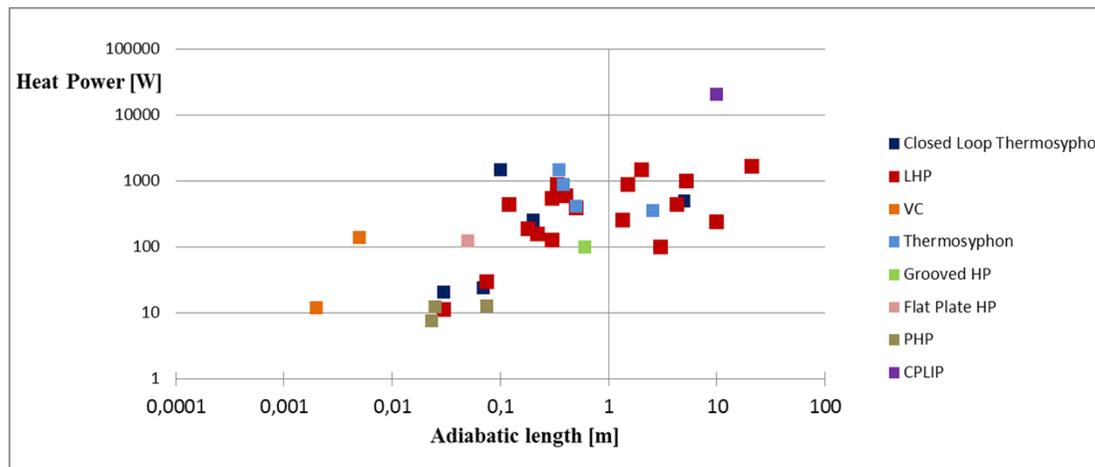
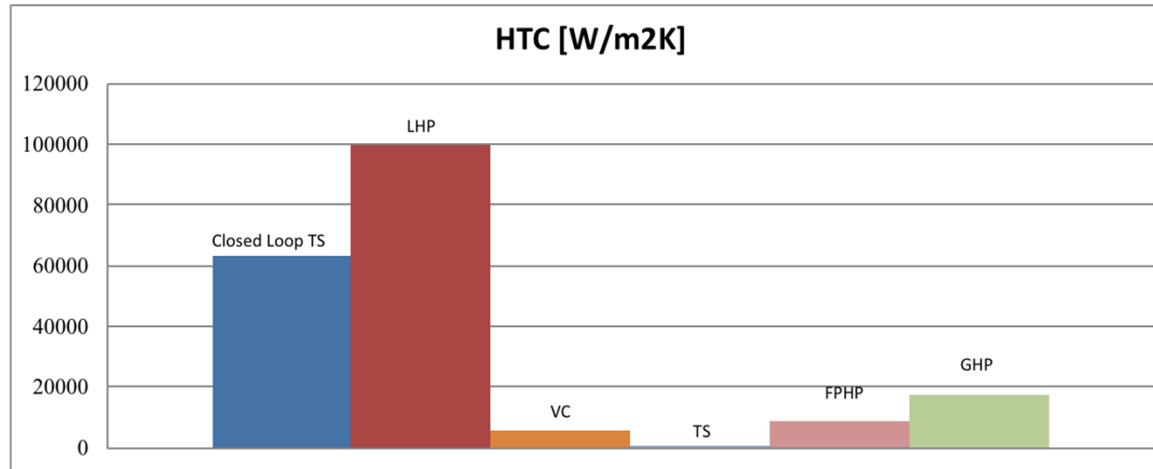


Caloduc oscillant à trois sources chaudes
Dufraisse, P'

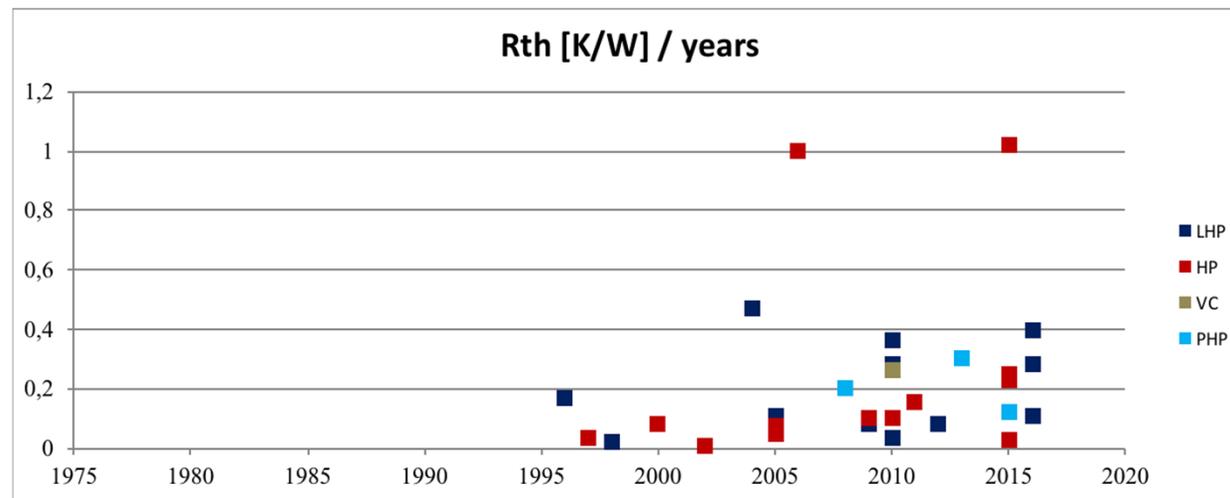
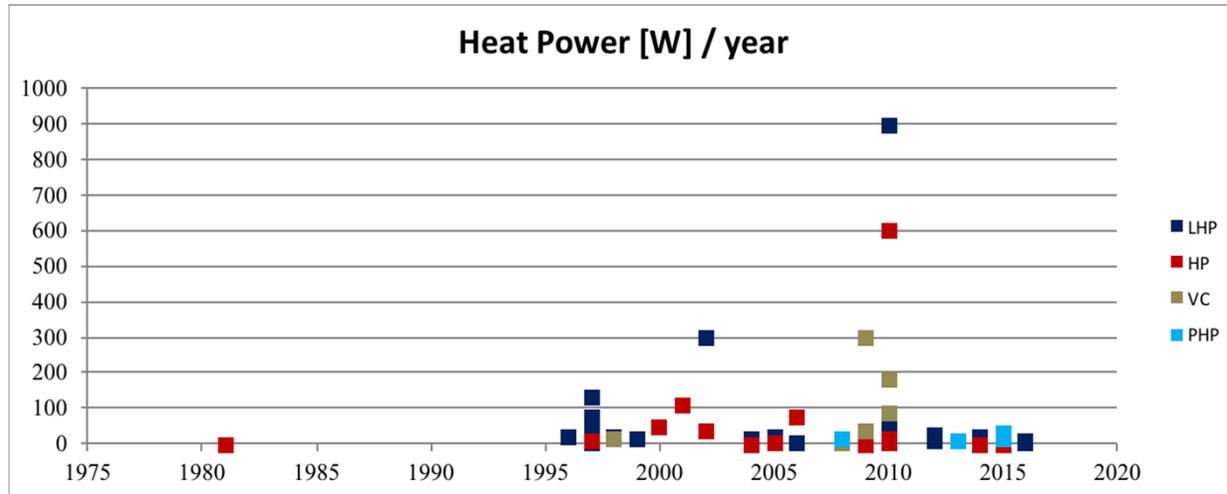
Systemes diphasiques passifs : Caloducs oscillants



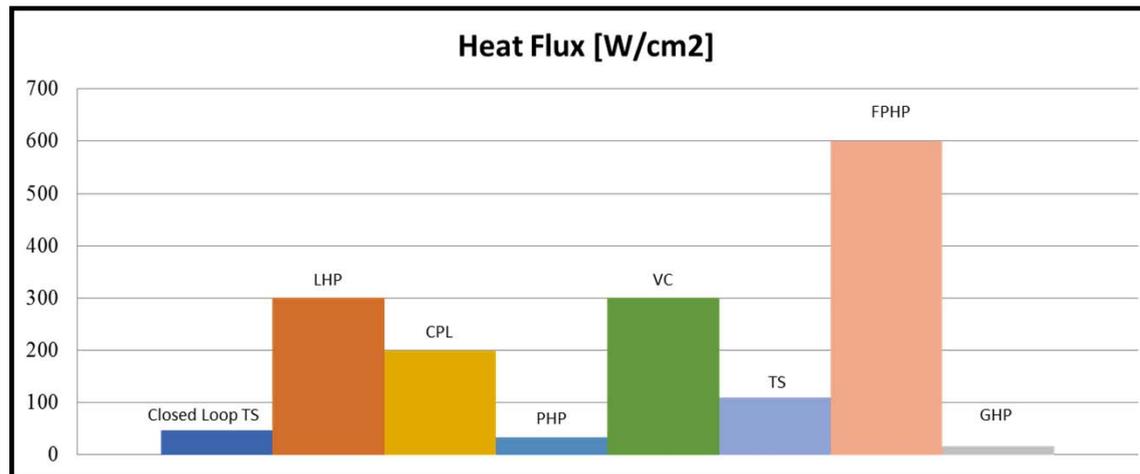
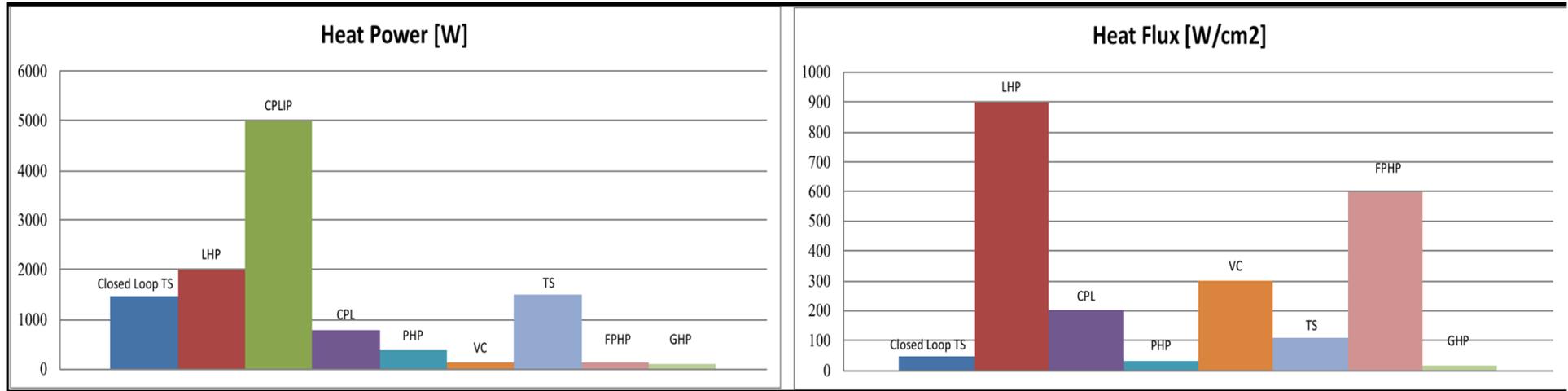
Systèmes diphasiques passifs : Indicateurs



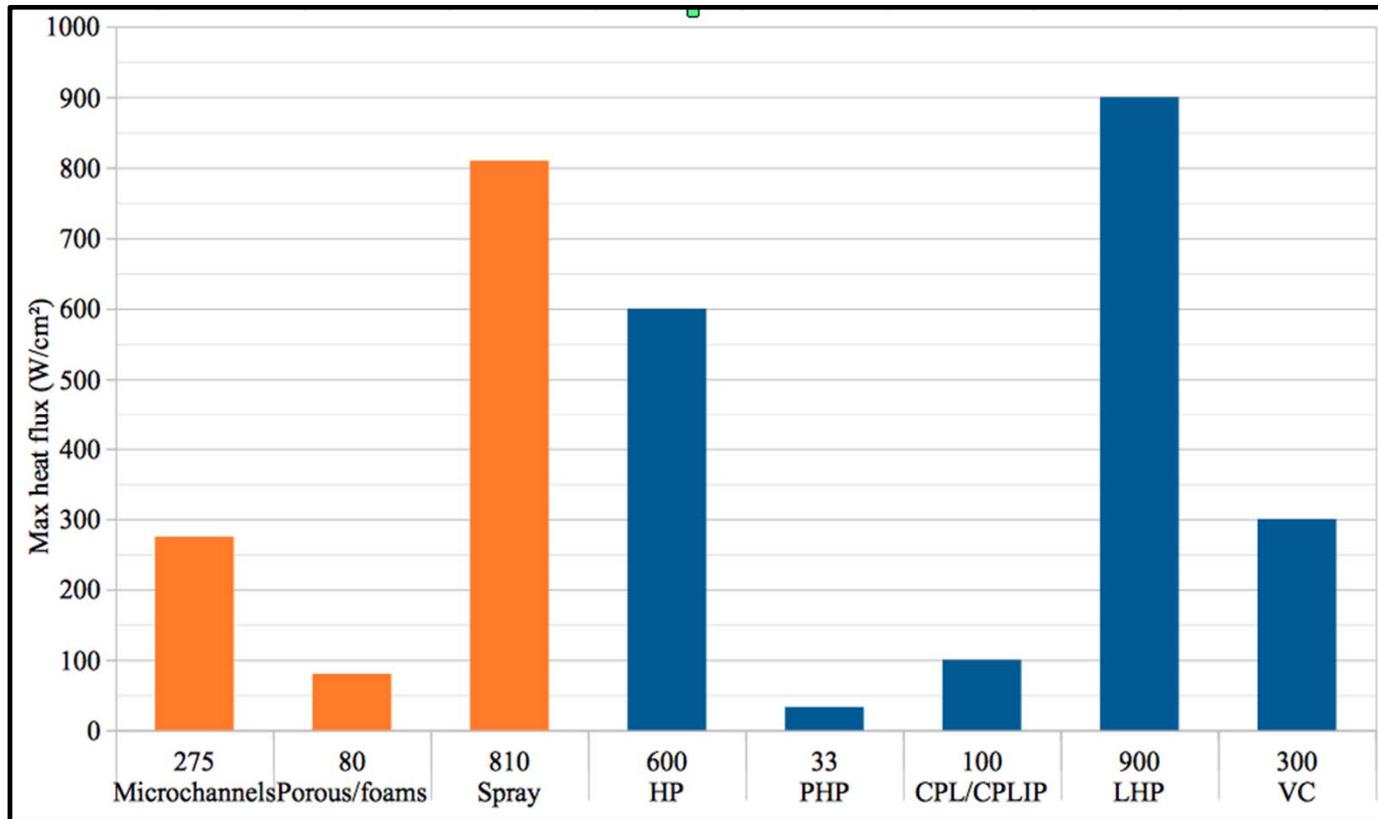
Systèmes diphasiques passifs : Indicateurs



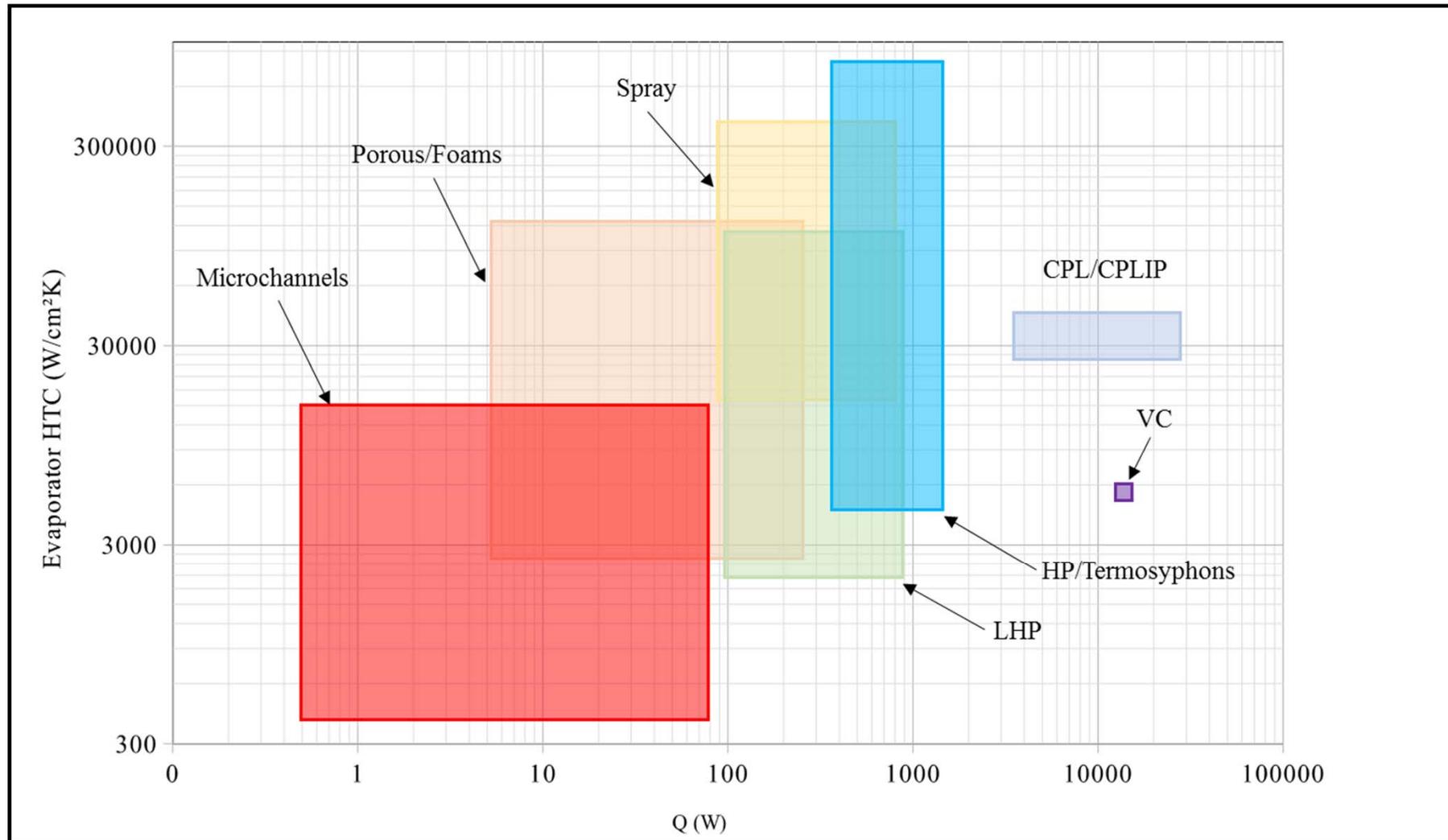
Systemes diphasiques passifs : Performances en flux et densité de flux de chaleur



Systèmes diphasiques actifs et passifs : confrontation



Systèmes diphasiques actifs et passifs :

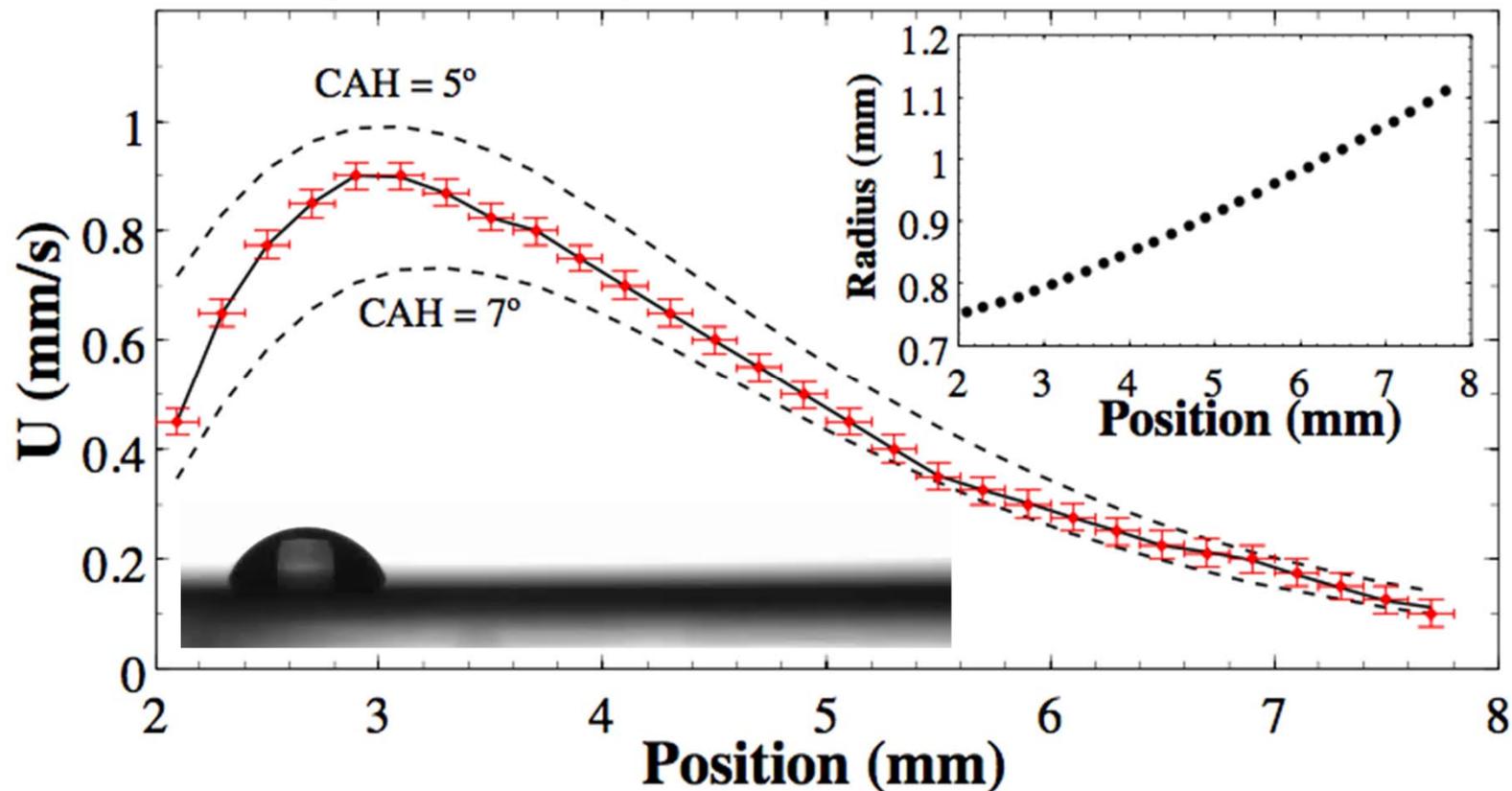


Refroidissement diphasique: quelques pistes en cours d'exploration



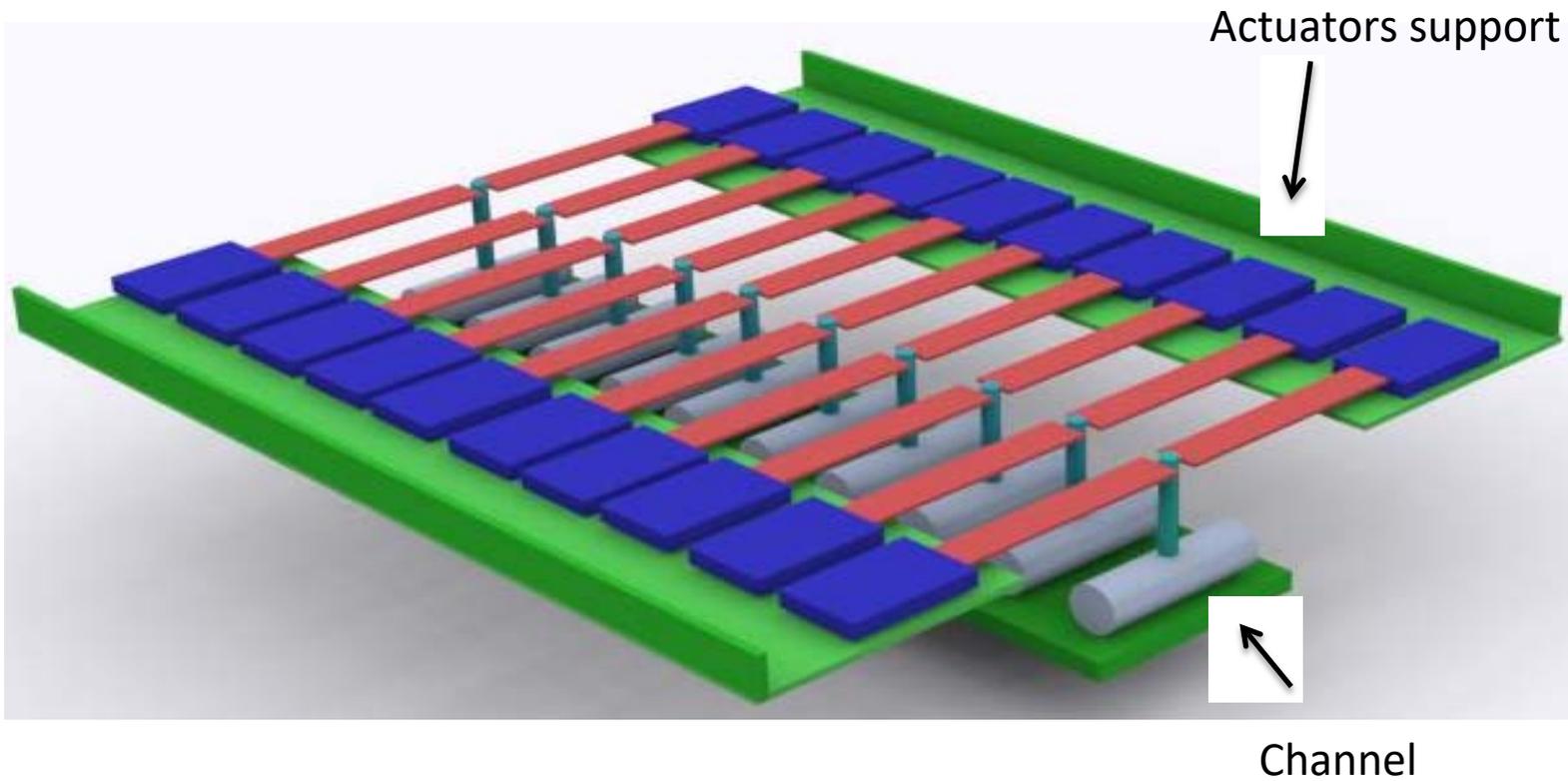
1 – Extraction et transport de la chaleur par des gouttes auto-propulsées

→ Utilisation d'un gradient de mouillabilité pour générer la mise en mouvement et l'étalement de gouttes vers les points chauds



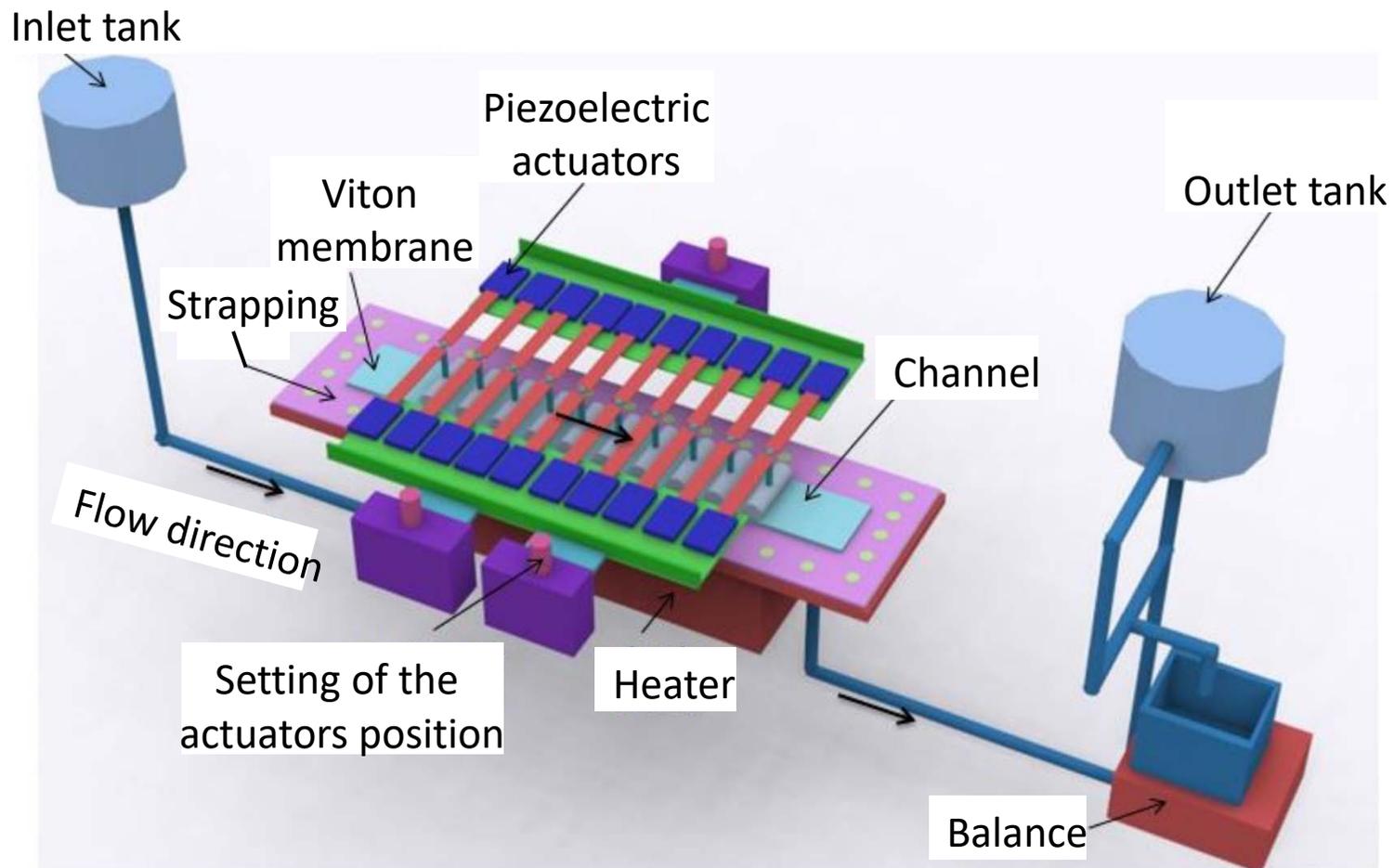
Refroidissement diphasique: quelques pistes en cours d'exploration

2 – Evaporateur à « Morphing » de paroi



Refroidissement diphasique: quelques pistes en cours d'exploration

2 – Evaporateur à « Morphing » de paroi

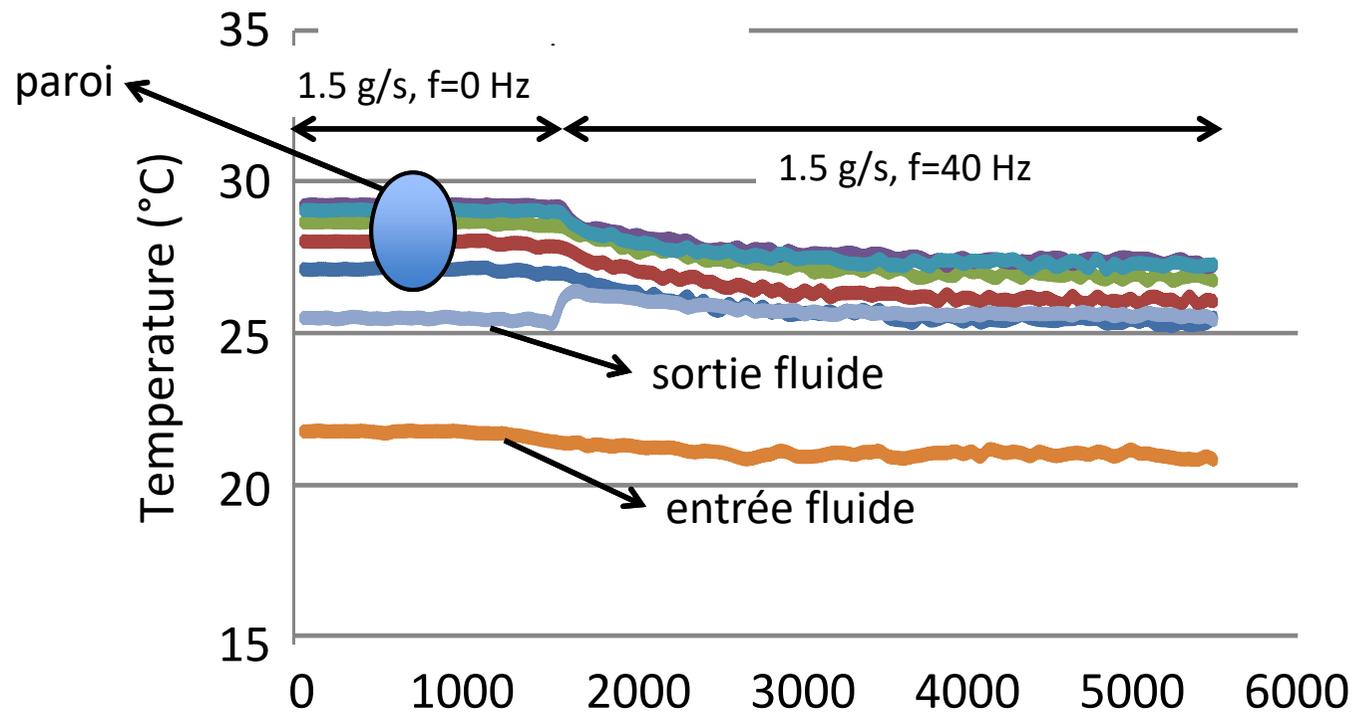


Refroidissement diphasique: quelques pistes en cours d'exploration

2 – Evaporateur à « Morphing » de paroi

Premier essai avec du HFE7000 ($T_{sat}=35^{\circ}\text{C}$):

➡ nette intensification des transferts avec apparition d'ébullition sous-saturée



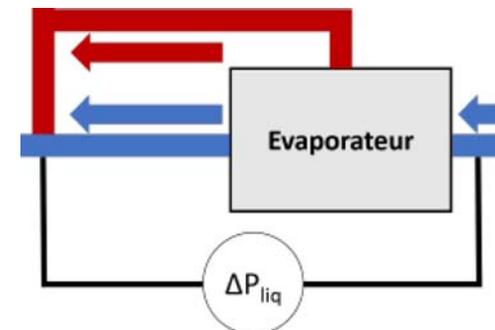
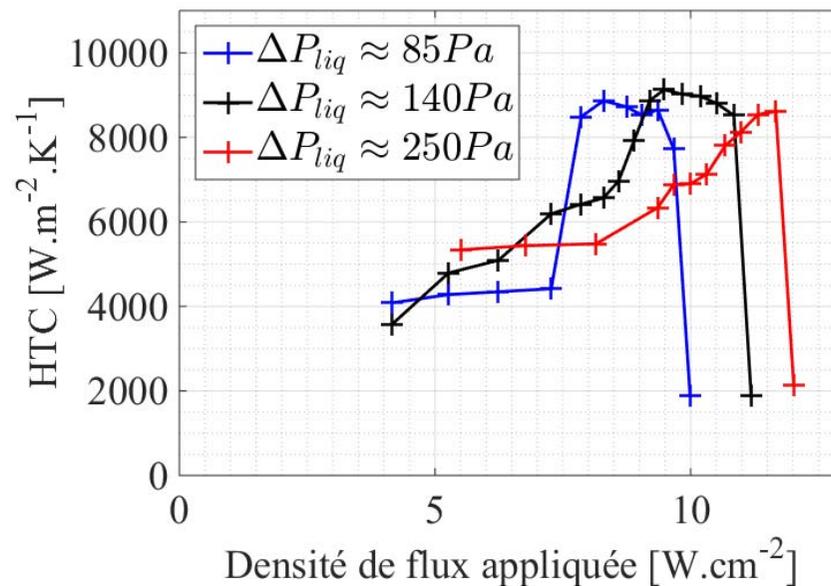
Refroidissement diphasique: quelques pistes en cours d'exploration

3 – Evaporateur à haute performance thermo-hydraulique

Alimentation hybride :

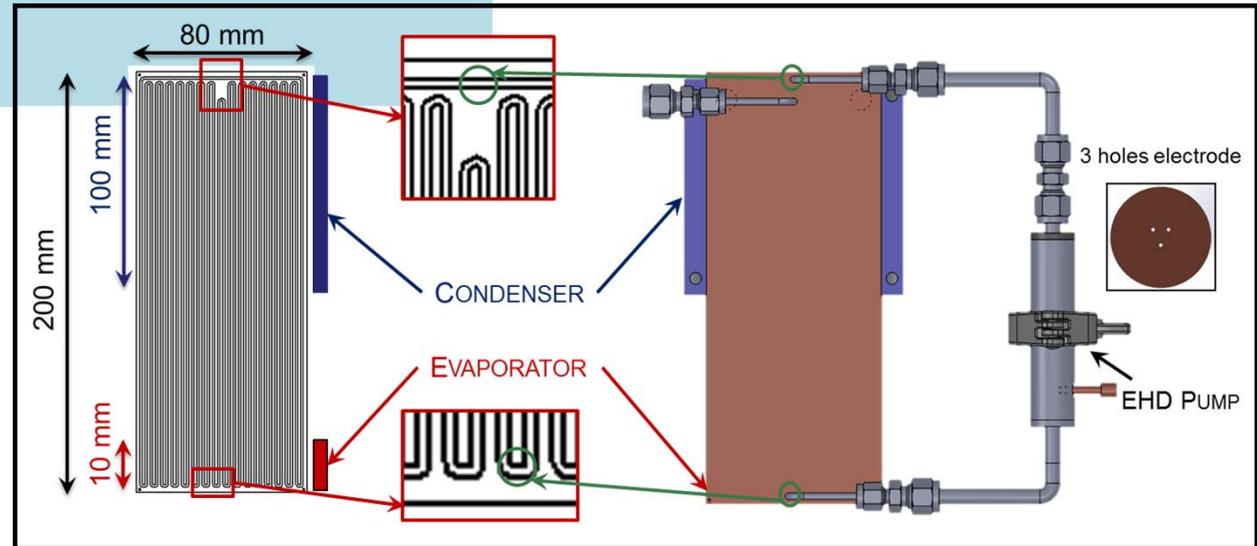
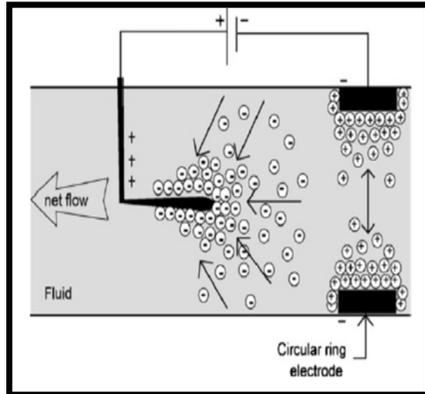
- **Succion capillaire -> maximiser le coefficient de transfert (jusqu'à $\sim 10^4 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ avec du HFE7000)**
- **Séparation des écoulements liquide et vapeur -> minimiser la chute de pression ($< 250 \text{ Pa}$)**

Exemple de résultats:

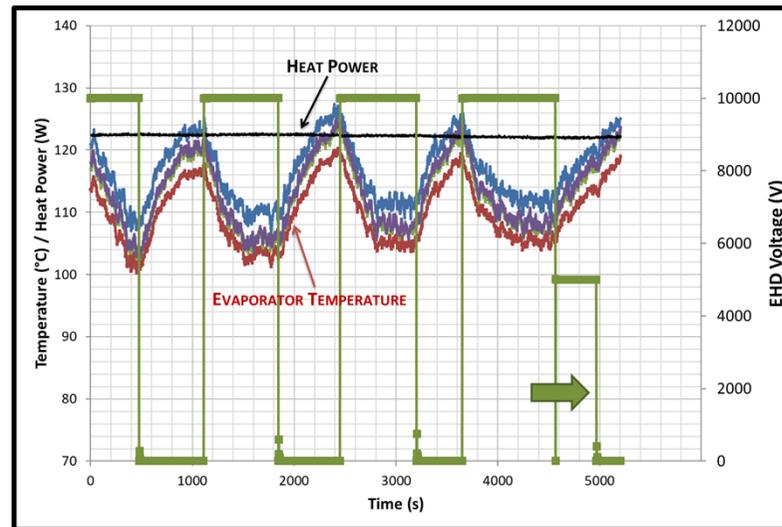
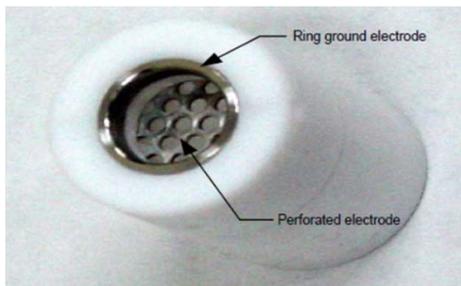


Refroidissement diphasique: quelques pistes en cours d'exploration

4 – Ehd et caloduc oscillant



[Hojjati et al., Colloids and Surface A, 2011]

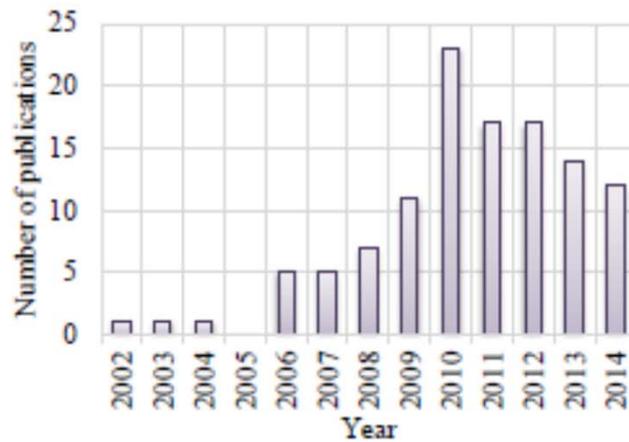


$$R_{TH, NO EHD} \approx 0.75 \text{ K/W}$$

$$R_{TH, EHD} \approx 0.65 \text{ K/W}$$

Refroidissement diphasique: quelques pistes en cours d'exploration

5 – nanofluide – nano-structuration



Nombre de publications
relatant des travaux
caloduc et nanofluides

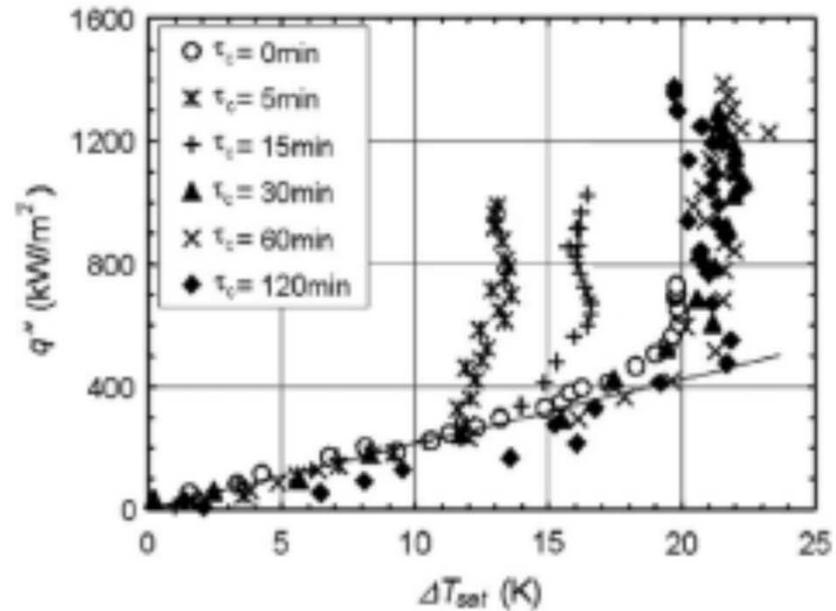


Figure 11 Example of the effect of the nanostructuring of the wall on the boiling curve obtained with γ - Fe_2O_3 nanoparticle on a 100 μm platinum wire. τ_c is the nano-particle coating duration with pure water (Stutz et al., 2011).

Merci de votre attention