



# Tech Hour Management Thermique par MCP

27/04/16



UNION EUROPÉENNE

Ce projet est cofinancé par  
le Fonds européen de  
développement régional



Liberté • Égalité • Fraternité  
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE



Opération cofinancée par l'État  
FONDS NATIONAL  
D'AMÉNAGEMENT  
ET DE DÉVELOPPEMENT  
DU TERRITOIRE



RÉGION NORMANDIE

# ORGANISATEURS

## TECH HOUR - PLASTRONIQUE



Normandie AeroEspace, la filière d'excellence en Normandie dans l'aéronautique, le spatial, la défense et la sécurité.



Mov'eo, le pôle de compétitivité pour l'automobile et la mobilité propre et intelligente.



ACSIEL Alliance Electronique, syndicat de l'électronique qui regroupe les ex-adhérents du GIXEL, du SITELESC, du SIMTEC et du GFIE



ASTech Paris Region, pôle de compétitivité dans le domaine de l'aéronautique, de l'espace et des systèmes embarqués



Le pôle MEDEE est une association Professionnelle et Scientifique en Génie Électrique au service des Projets Technologiques et Commerciaux des entreprises.

## Agenda du Tech Hour – 12h30 à 13h30 :

- Introduction
- Présentation de la technologie et de ses avancées
- Présentations d'applications

## Format et règles de fonctionnement :

- Le Tech Hour se déroule via l'outil de conférence téléphonique Webex



La présentation durera **30 minutes**, pendant lesquelles les **micros seront coupés**

- Il n'y a pas de nécessité de connecter sa webcam
- A l'issue de la présentation, vous pourrez poser vos **questions** par le « **chat** » du Webex.
- Nous vous conseillons pour ceux qui seront en Webex d'utiliser **un casque**.



## Et après :

- En fonction des intérêts un **atelier / séminaire** pourra être organisé pour aller plus loin sur cette nouvelle technologie / process



## Intervention du professeur **Souad HARMAND** – Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis

La gestion thermique des systèmes électriques se fait de plus en plus sous de fortes contraintes liées, aussi bien à l'augmentation des densités volumiques et surfaciques des flux de chaleurs ainsi qu'à des environnements de plus en plus sévères. Ces environnements sont généralement peu propices au développement de technologies de refroidissement classiques (dissipateur à air, plaque d'eau...) et la proximité de sources de refroidissement sont généralement rares.

L'exposé proposé par le professeur Souad HARMAND (Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis) fait le point sur les technologies de thermal management efficaces et compactes. Il sera ainsi présenté quelques exemples d'utilisation des Matériaux à Changement de phases Solide-Liquide, tel que les paraffines dans des matrices céramiques ou encore des dispositifs de types Vapor Chamber et caloducs statiques ou en rotation.

**Bon**

**Tech**

Partenaire  
de votre réussite !



Université  
de Valenciennes  
et du Hainaut-Cambrésis



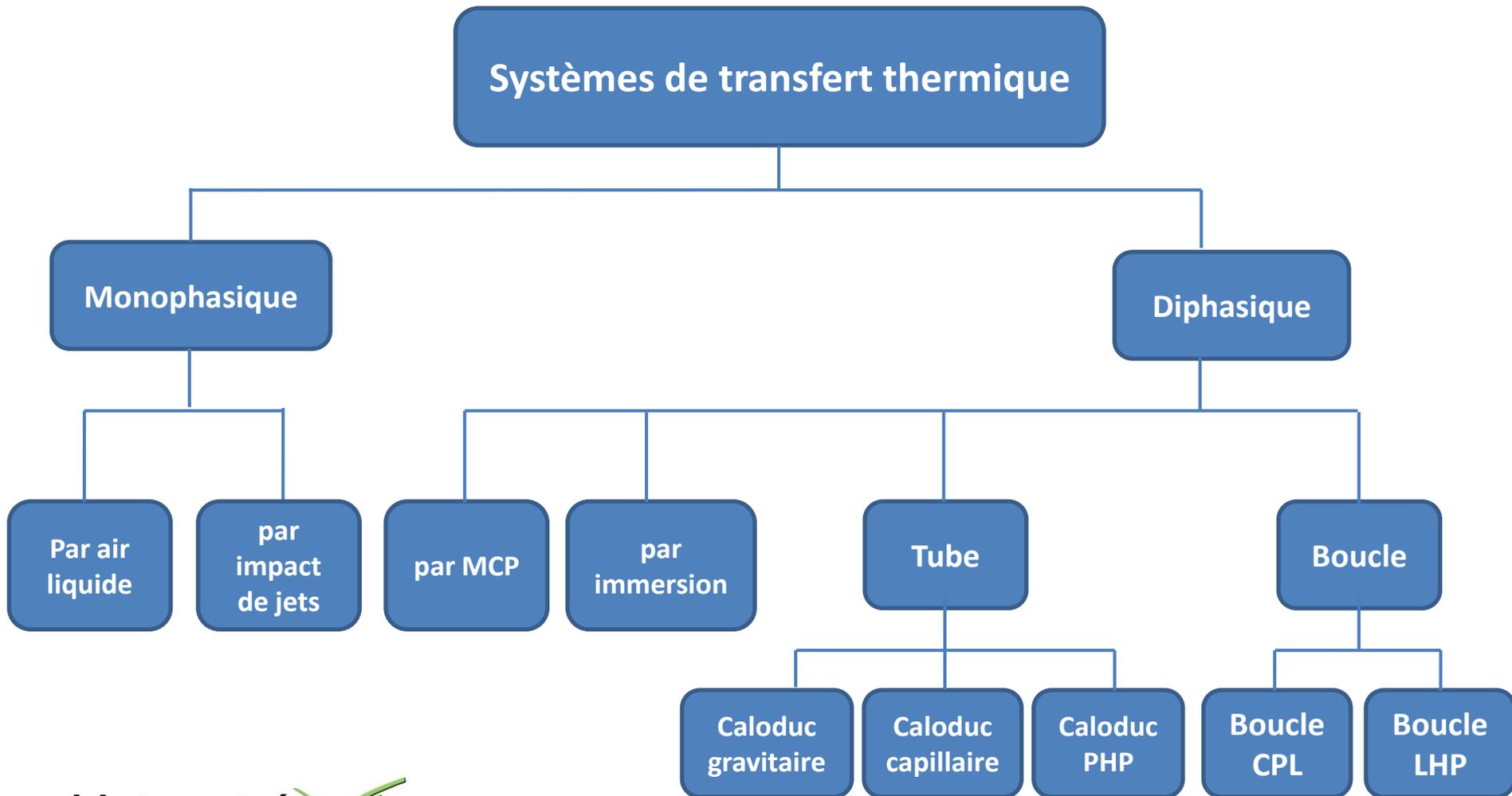
Université  
de Valenciennes  
et du Hainaut-Cambrésis



# Techniques de refroidissement innovantes pour les systèmes électriques

**Prof. Souad Harmand**

# Les techniques de refroidissement des systèmes électriques

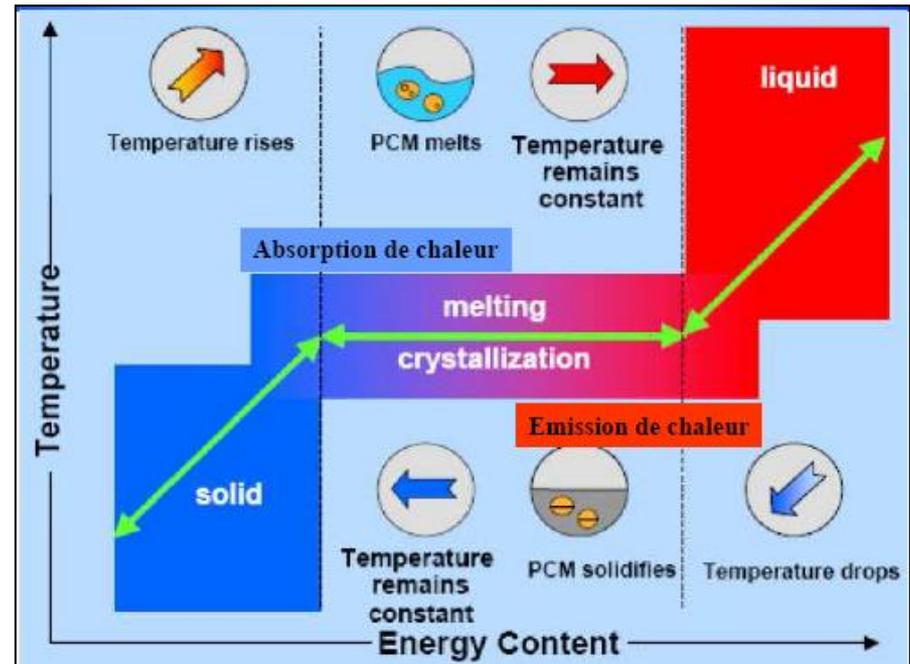


# Les Matériaux à changement de phase



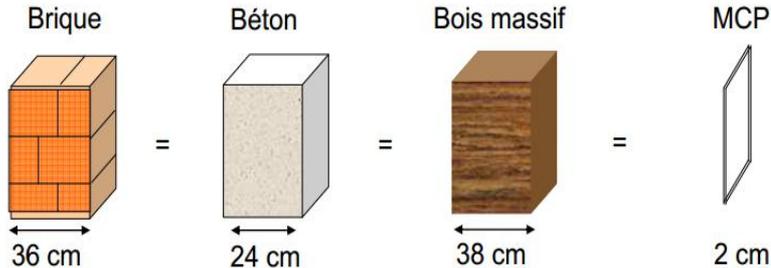
*Un composé qui absorbe et libère de la chaleur lors d'une transformation de phase (solide-liquide ou liquide-gaz) à température constante*

## Principe de fonctionnement



# Propriétés caractéristique

## Compacité énergétique

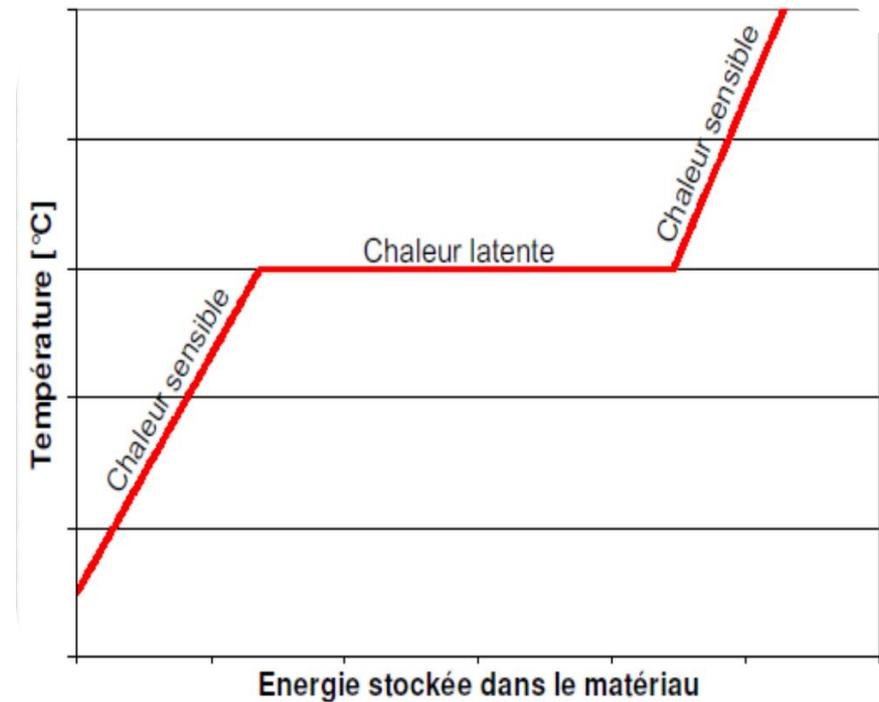


Chaleur latente **importante**

## Eventail de température

variété de températures de fusion

## Rôle Tampon



Caractère **isotherme** de la charge/décharge



## Tests de performances et comparaison de plusieurs configurations



### Dissipateur de chaleur

- Une plaque en cuivre
- Un dissipateur à 14 ailettes
- Un dissipateur à 6 ailettes

### Nature du MCP

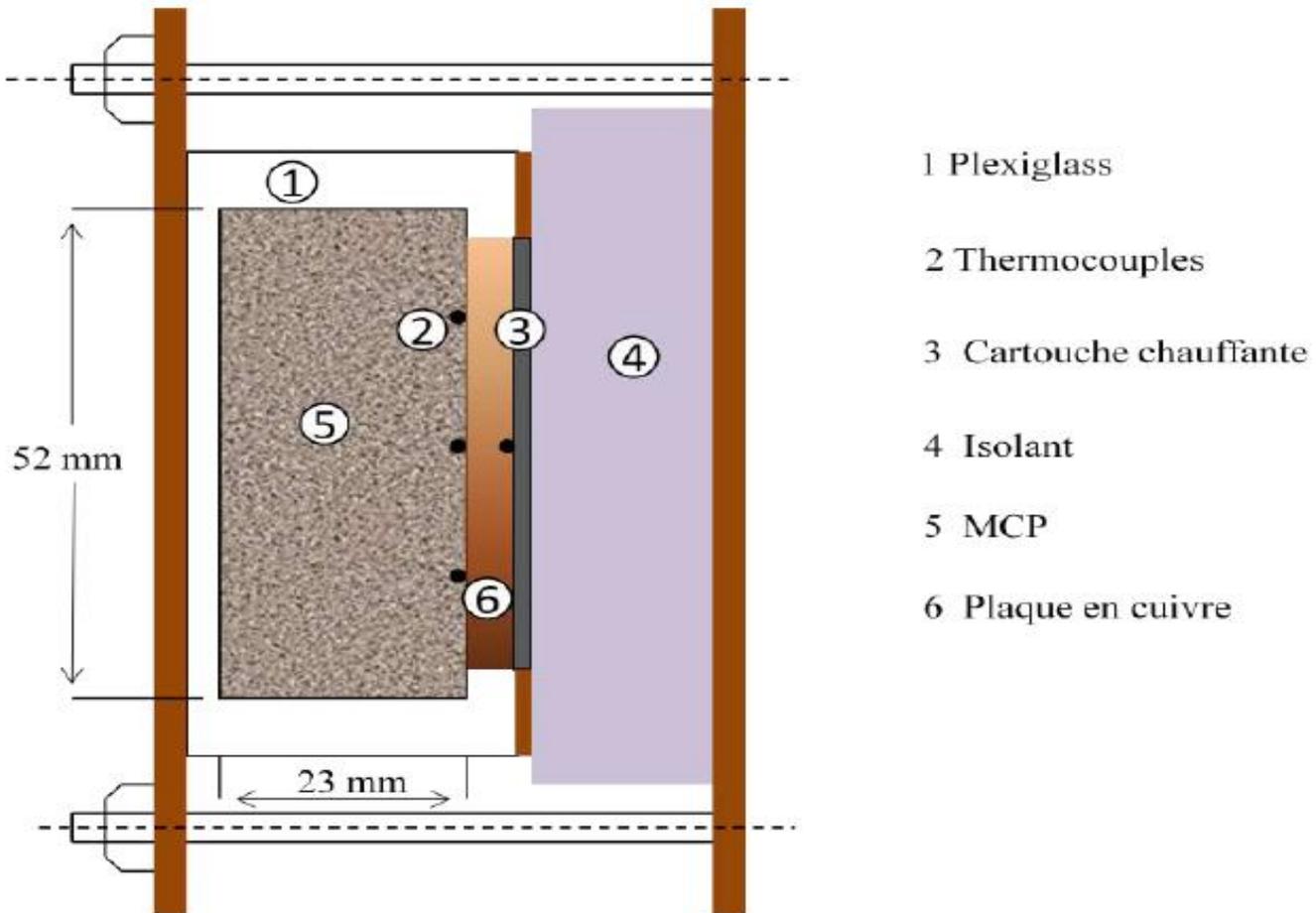
- La paraffine pure
- Une matrice MCP-graphite
- Une matrice MCP-silicone

**Régime continu**  
**Régime intermittent**

### Distribution du flux thermique (chauffage discret)

- Concentration de flux
- Répartition uniforme du flux
- Répartition non-uniforme du flux

# Dispositif expérimental

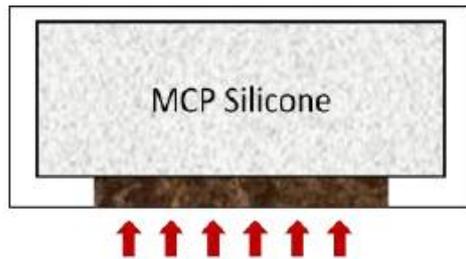


# Nature du MCP

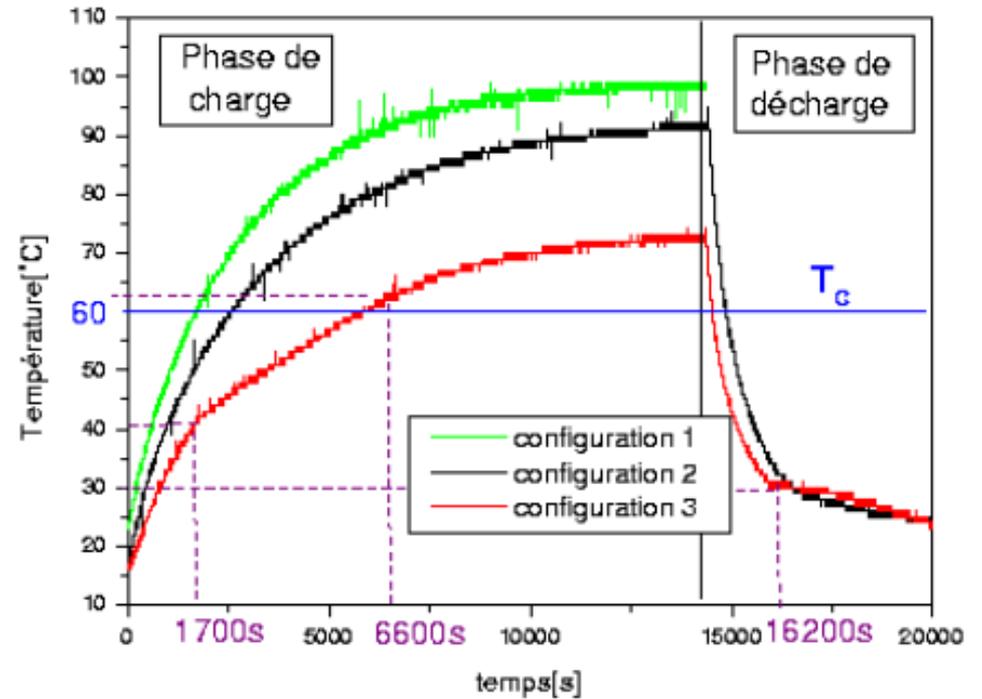
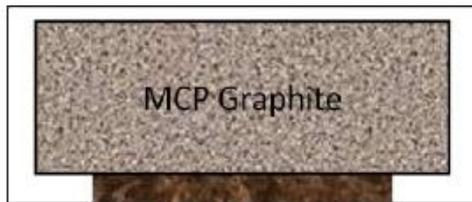
Configuration 1



Configuration 2



Configuration 3

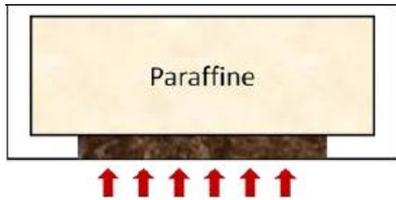


Comparaison de la température de surface au cours du temps pour 3 configurations pour la position horizontale

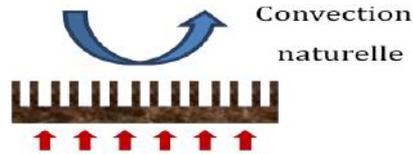
Flux de chaleur  $Q=3000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$

# Différents dissipateur de chaleur

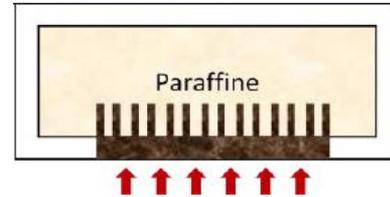
Configuration 4



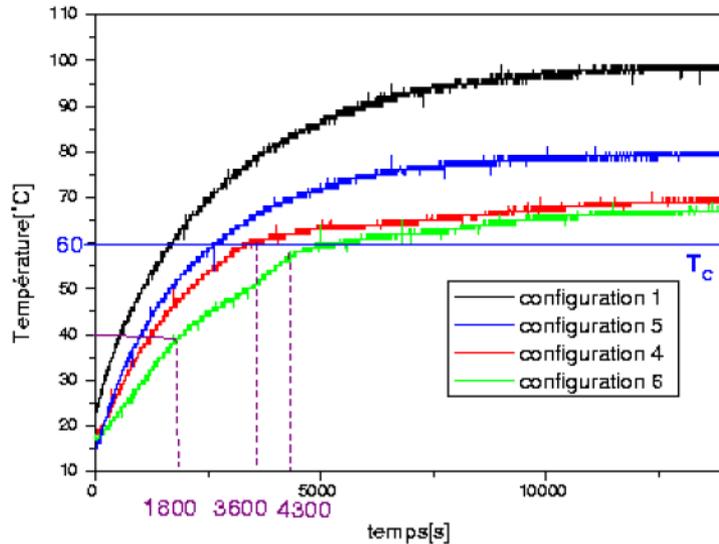
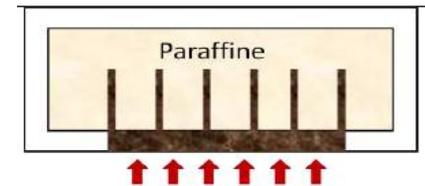
Configuration 5



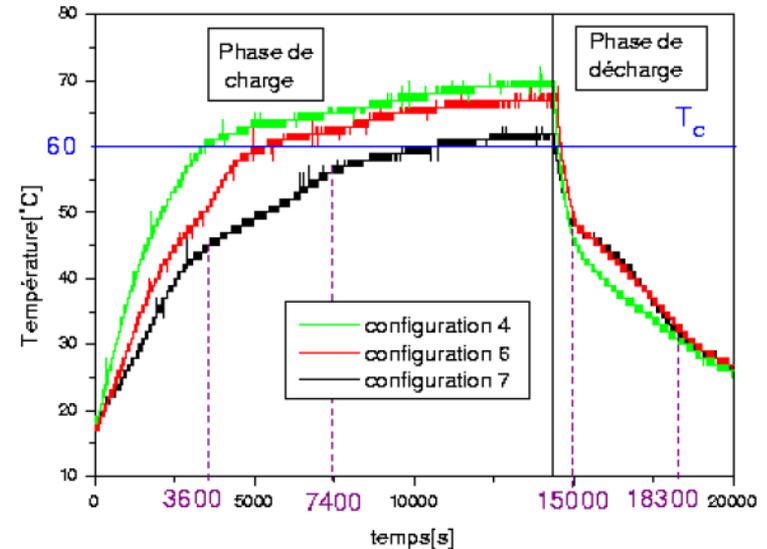
Configuration 6



Configuration 7

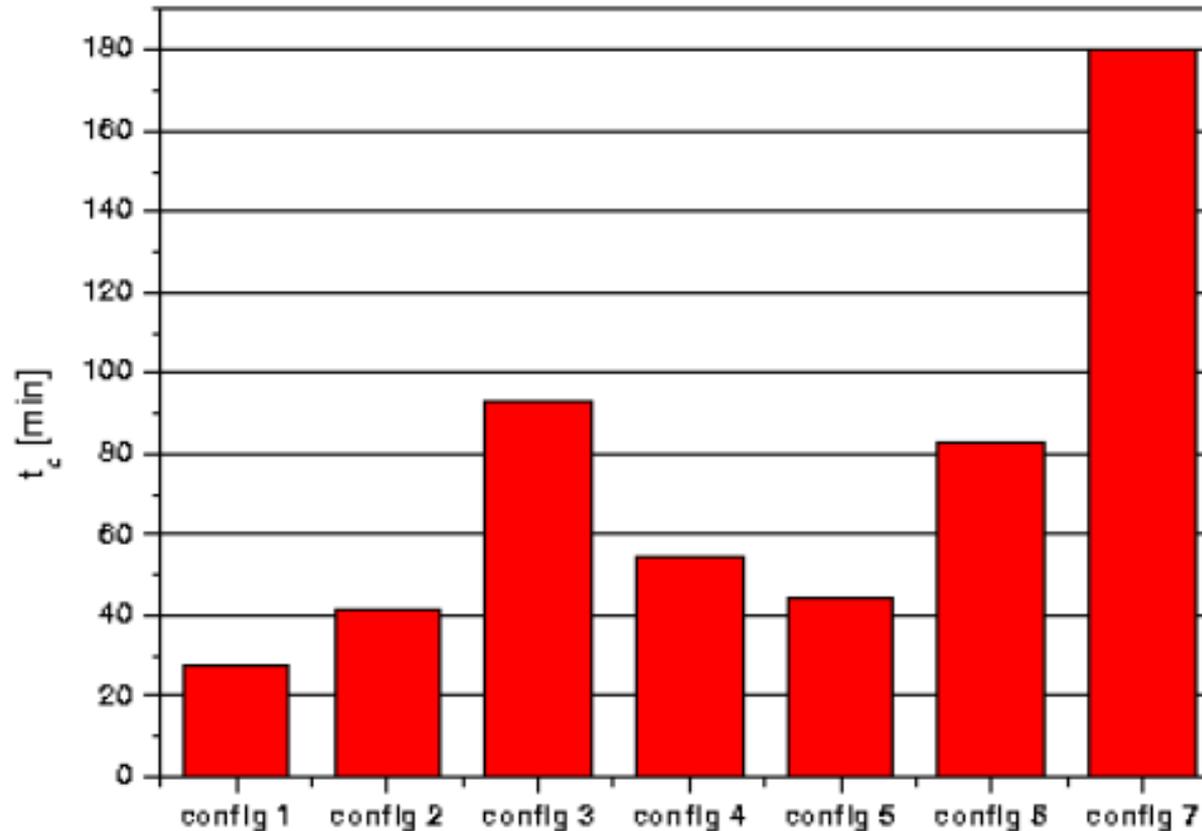


Température de surface 4 configurations



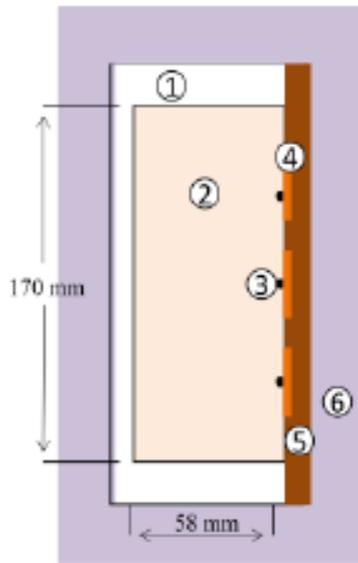
Température de surface pour 3 configurations

# Comparaison de la performance thermique



Temps critique  $t_c$  pour toutes les configurations en position horizontale pendant la phase de charge

# Chauffage discret



- 1 Plexiglas
- 2 MCP
- 3 Thermocouples
- 4 source discrète
- 5 Bakélite
- 6 Polystyrène

## Différentes distributions du flux thermique

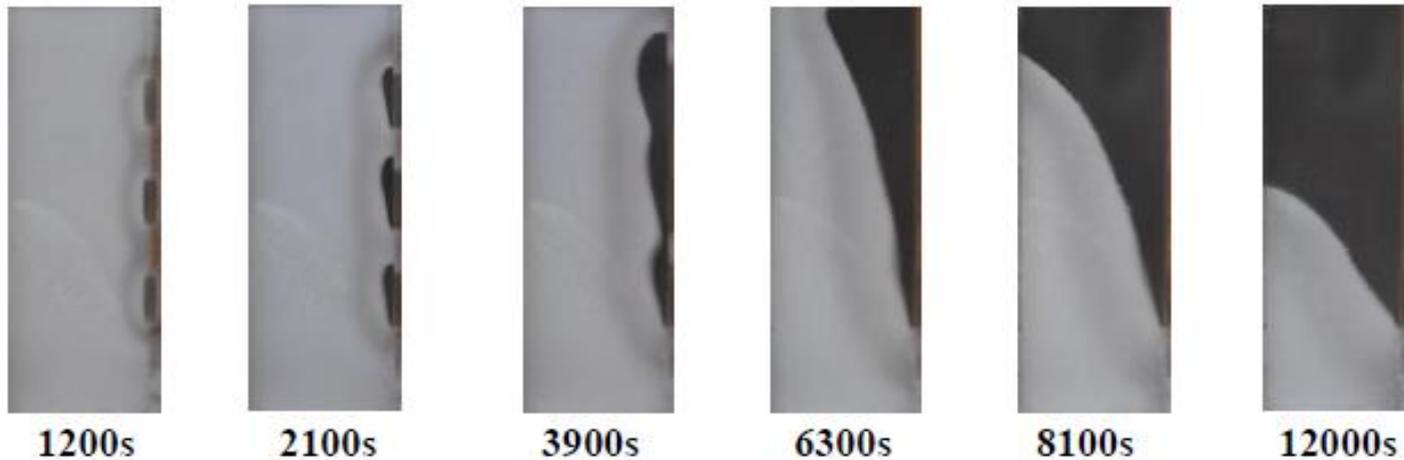
- Concentration de flux (cas 2,3 et 4)
- Répartition uniforme du flux (cas 1)
- Répartition non-uniforme du flux :  
entre deux sources (cas 5,6 et 7)  
entre trois sources (cas 8,9 et 10)

## Représentation schématique du système de refroidissement

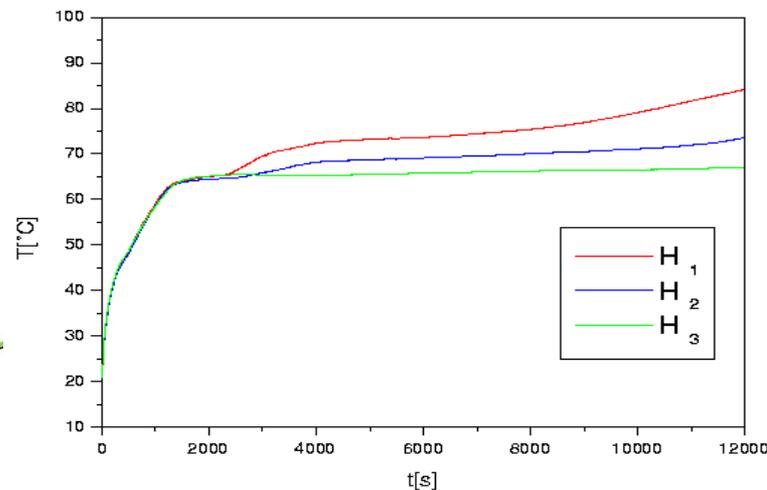
## Différents cas de la repartition du flux

Case	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$Q_1(\text{W.m}^{-2})$	3000	9000	0	0	4500	4500	0	5000	2000	2000
$Q_2(\text{W.m}^{-2})$	3000	0	9000	0	4500	0	4500	2000	5000	2000
$Q_3(\text{W.m}^{-2})$	3000	0	0	9000	0	4500	4500	2000	2000	5000

# Répartition uniforme du flux



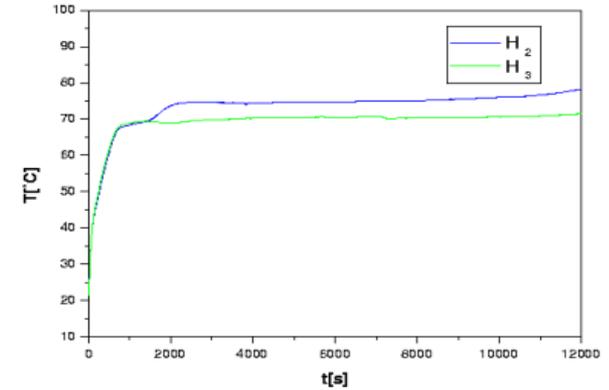
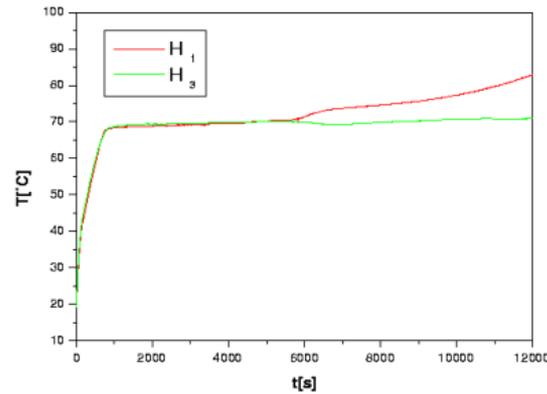
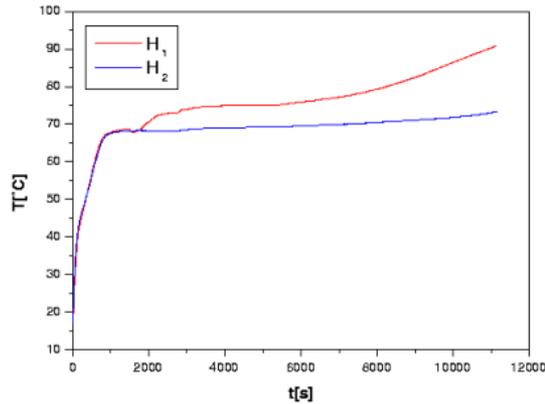
Différentes positions du front de fusion pour différents instants



Variation de la température au cours du temps des trois sources pour le 1<sup>er</sup> cas

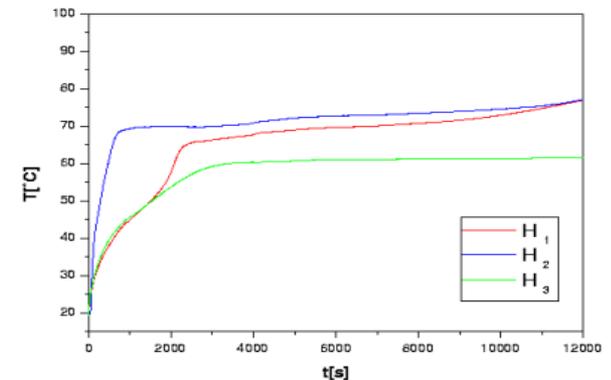
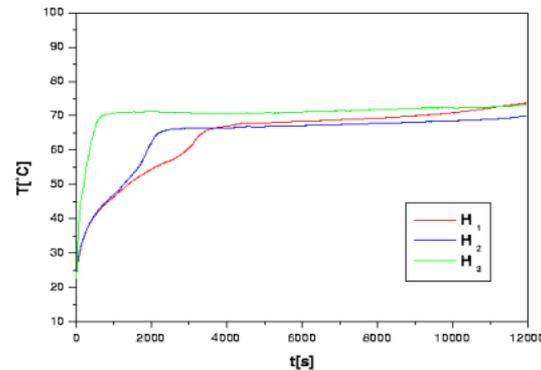
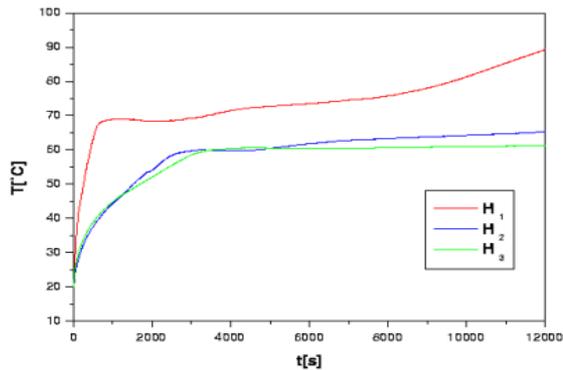
# Répartition non-uniforme du flux

## Entre deux sources



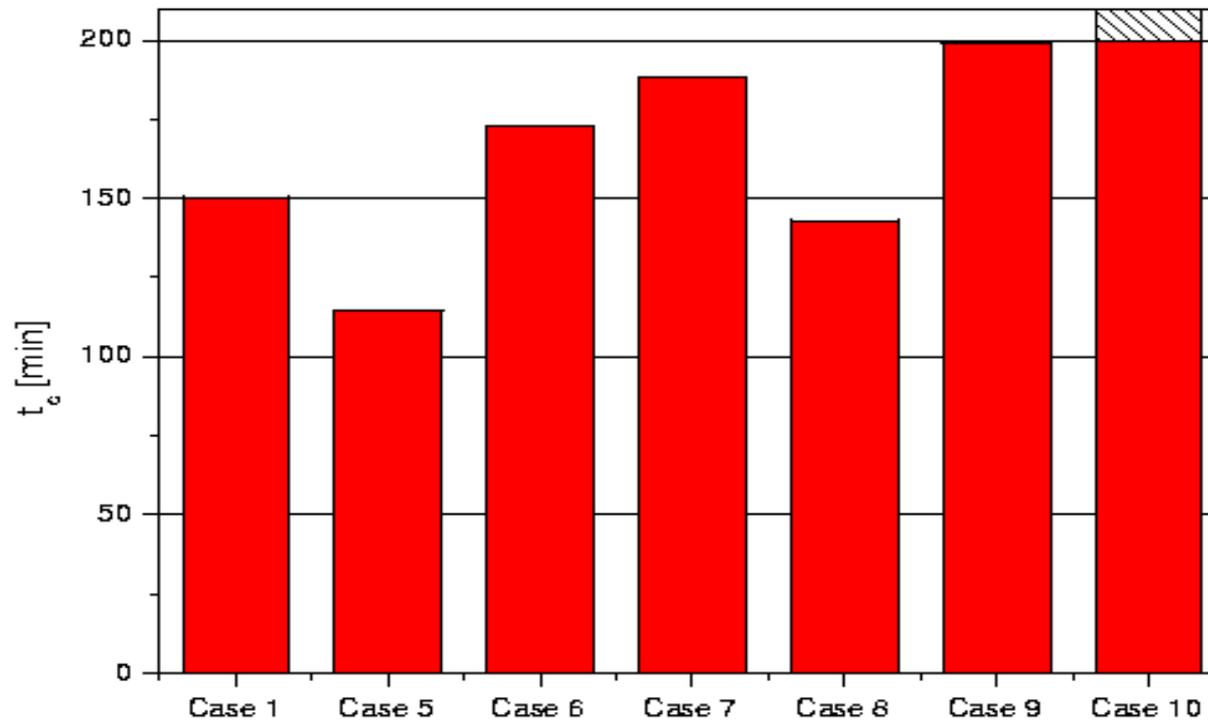
Variation de la température au cours du temps des deux sources pour les cas 5,6 et 7

## Entre trois sources



Variation de la température au cours du temps des trois sources pour les cas 8,9 et 10

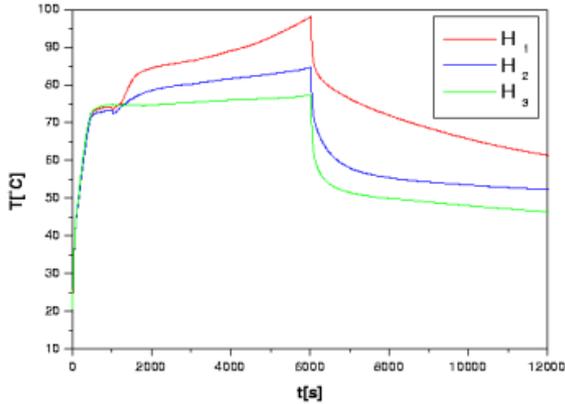
# Comparaison de la performance thermique



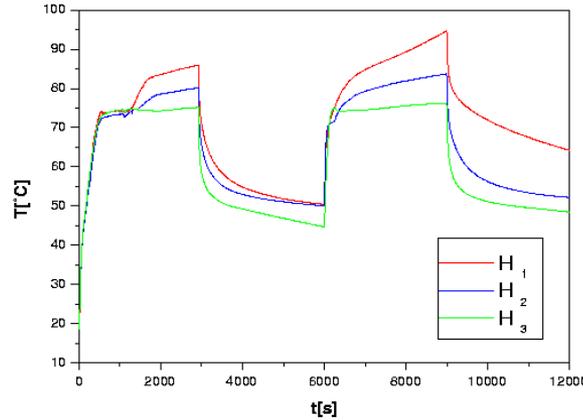
Temps critique  $t_c$  pour différentes répartitions du flux

# Régime intermittent

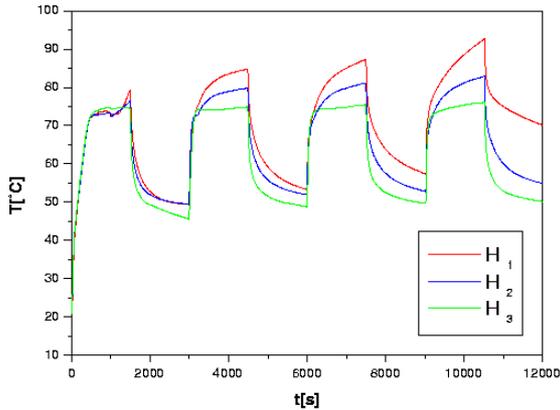
1 cycle



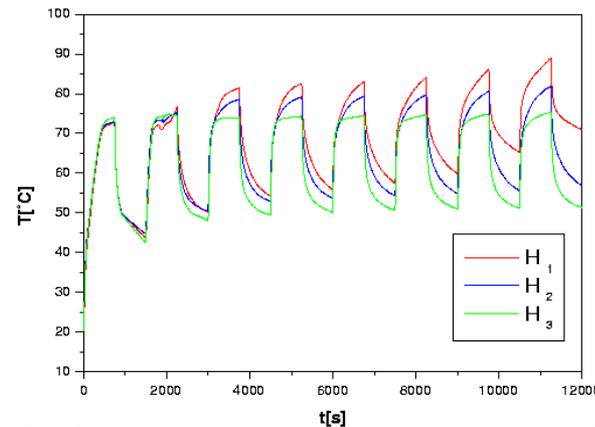
2 cycles



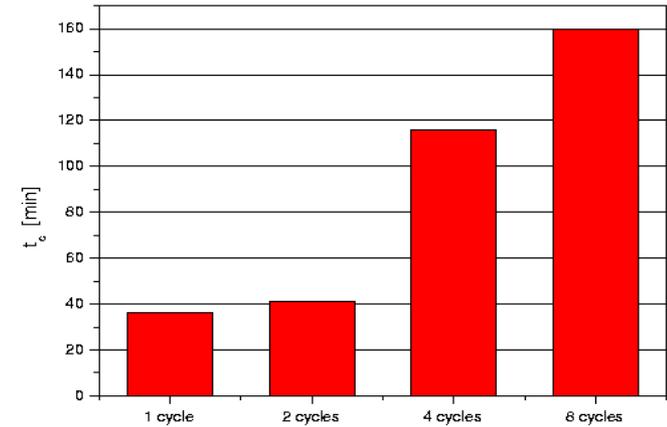
4 cycles



8 cycles



Flux de chaleur  $Q=6000\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$



Temps critiques  $t_c$  pour différents nombres de cycle



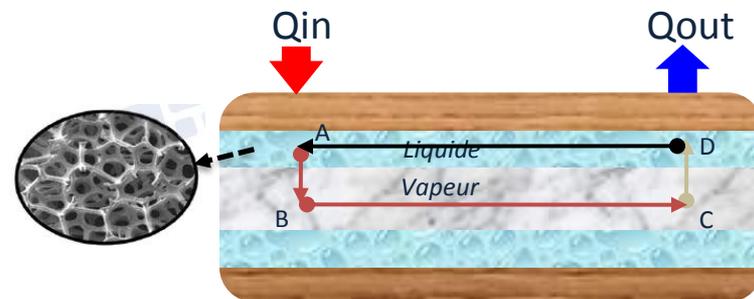
# Focus sur le refroidissement par changement de phase Liquide-Vapeur

## Principe de fonctionnement

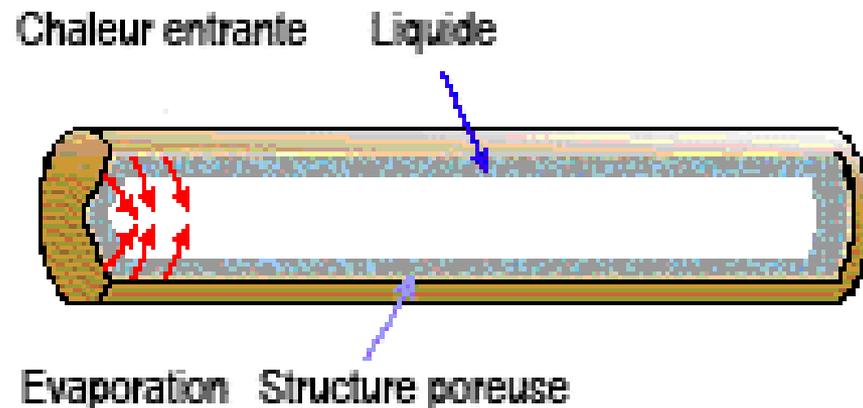
Caloduc : définition et fonctionnement

Transport thermique par cycle thermodynamique fermé :  
évaporation - condensation

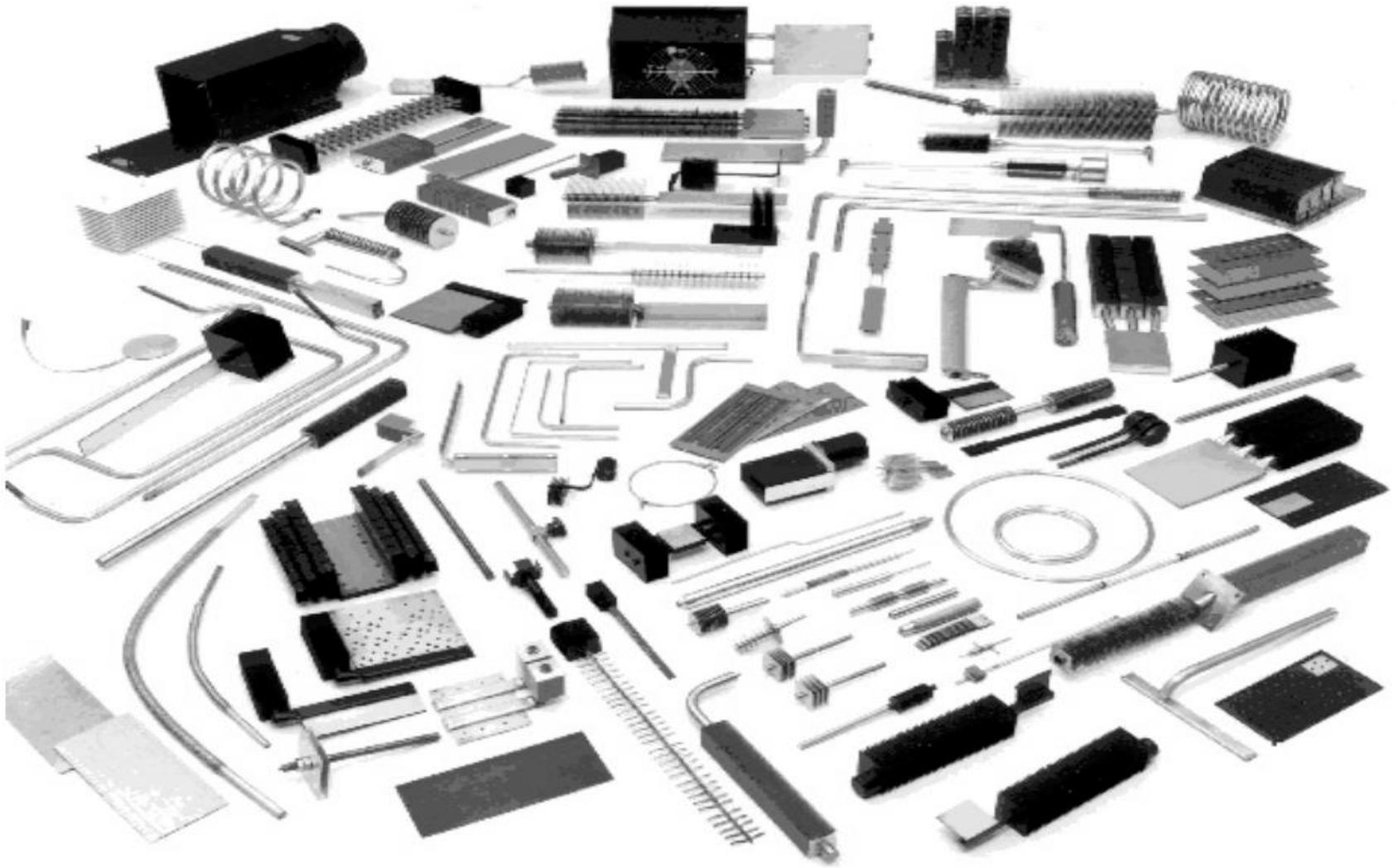
Intérêts : P dissipée  $\nearrow$  et  $\Delta T \searrow$ , element passif



L 60 cm x D 1 cm @ 200 W	$\Delta T$
Dissipateur Cu	2 550 C
Caloduc	0,5 C

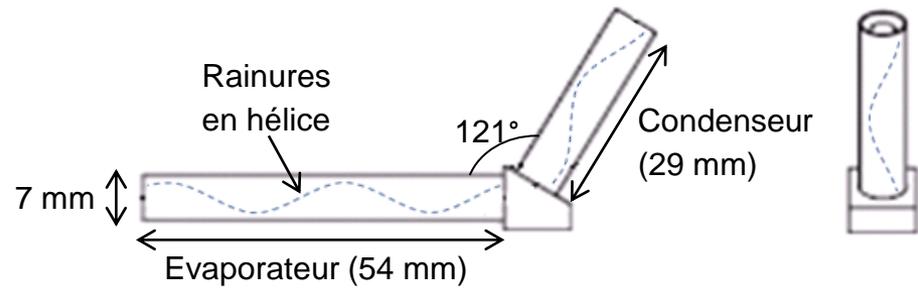
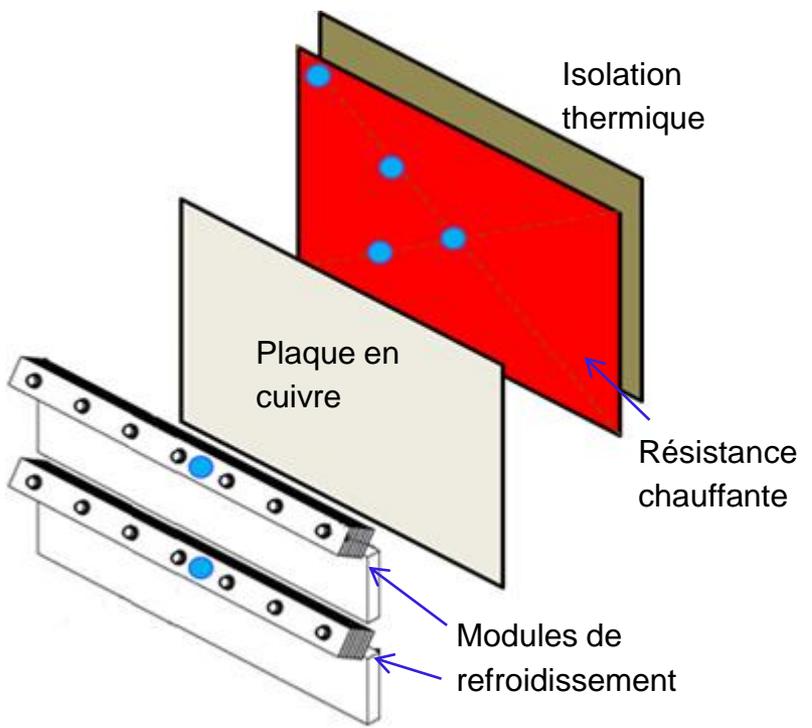
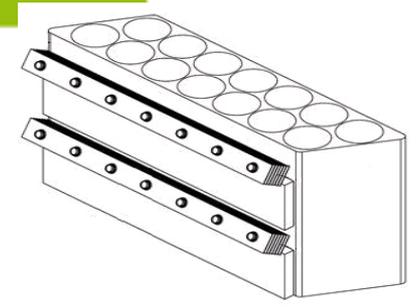


# Exemples de caloducs



# Les caloducs tubes pour les batteries Li-ion

- Modules de refroidissement
  - 4 modules de refroidissement à caloduc
  - 7 caloducs tubes coudés  
(cuivre, eau, rainures hélices)



- Moyens d'essai
  - 2 modules montés sur une plaque en cuivre
  - Résistance chauffante plate (5.5, 7.5, 12W/cellule)
  - Isolation thermique
  - Thermocouples



# Les caloducs tubes pour les batteries Li-ion

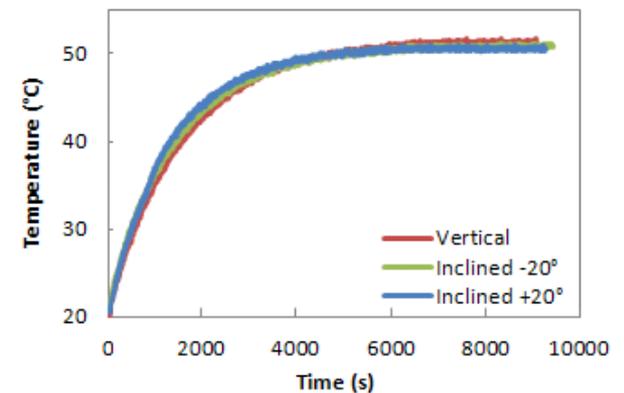
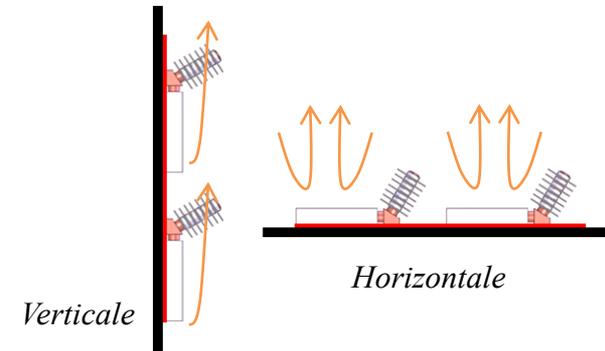
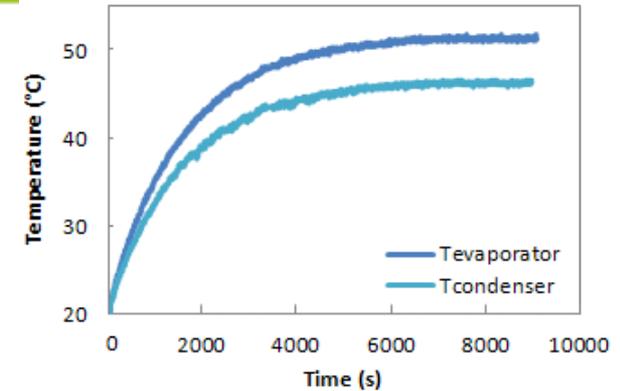
- Test en convection naturelle, 5.5W/cellule
- En position verticale  $\rightarrow T_{evp} > 50^\circ\text{C}$
- L'influence de la position

	Vertical $H_{free}$	Horizontal $H_{free}$
$T_{evp}$ ( $^\circ\text{C}$ )	51	61.5

$\rightarrow$  Faible performance des ailettes en position horizontale  
(Mouvement naturel d'air non favorable)

- L'influence de l'inclinaison

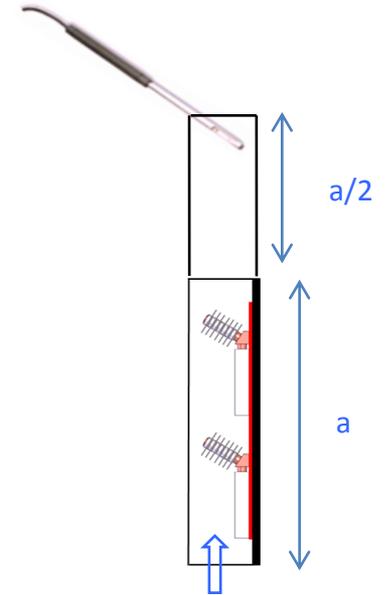
$\rightarrow$  Pas de dégradation lors des montées/descentes de route



# Les caloducs tubes pour les batteries Li-ion

- Ventilation par effet cheminée

	Puissance injectée (W/cellule)		
	5.5	7.5	12
Convection naturelle	51 °C	58 °C	71 °C
Effet cheminée	46 °C	53 °C	66 °C

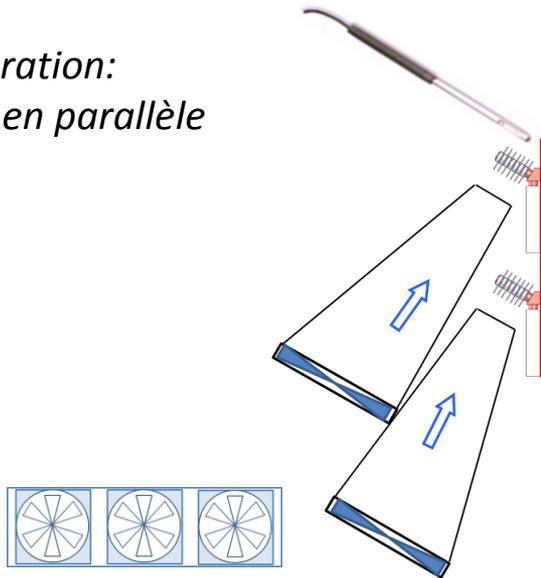


- L'effet cheminée améliore nettement l'évacuation au niveau des ailettes
- L'amélioration reste insuffisante pour maintenir  $T_{cell} < 50^\circ\text{C}$

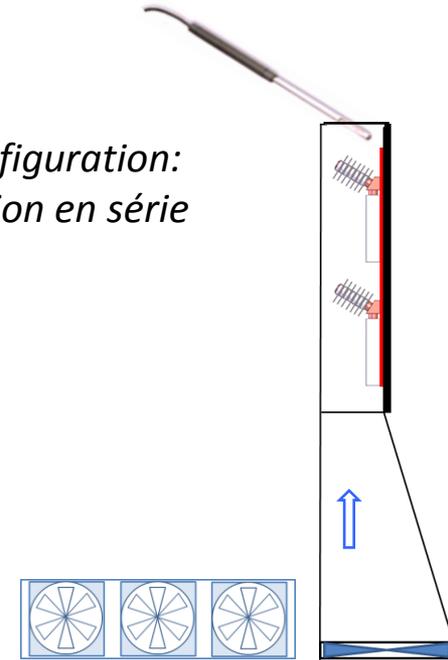
# Les caloducs tubes pour les batteries Li-ion

- Refroidissement par ventilation forcée

1<sup>ère</sup> configuration:  
ventilation en parallèle



2<sup>ème</sup> configuration:  
ventilation en série

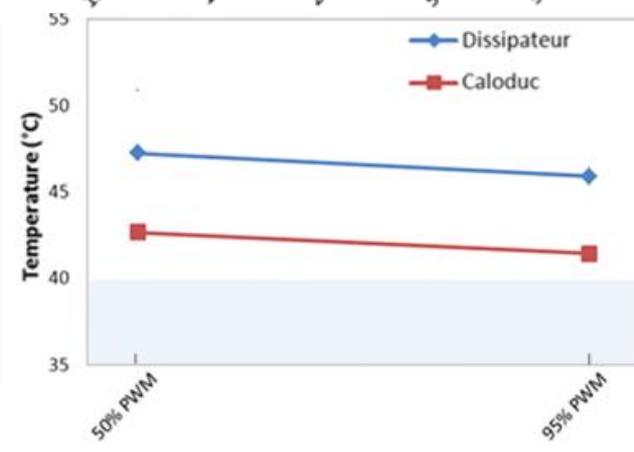
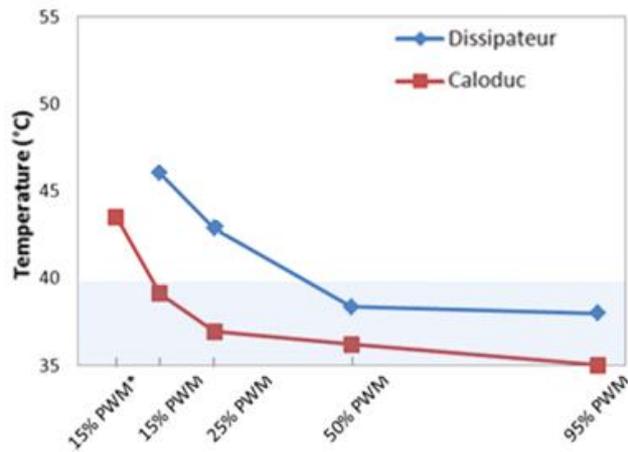
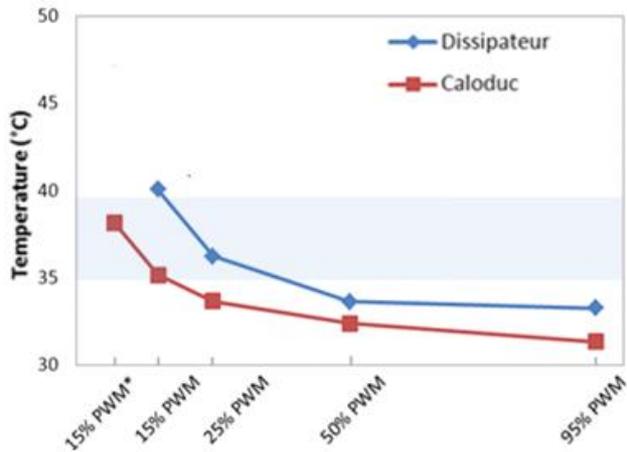
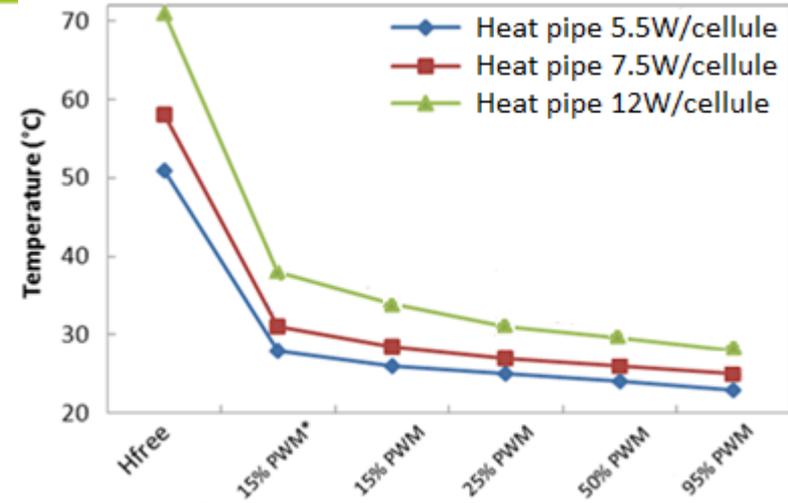


		Surface d'aspiration des ventilateurs	
		100%	50%
1 <sup>ère</sup> configuration	V <sub>air</sub>	1.5 m/s	0.5 m/s
	T <sub>evaporator</sub>	29 °C	32 °C
	T <sub>cell_max</sub>	34.15 °C	37.18 °C
2 <sup>ème</sup> configuration	V <sub>air</sub>	1.2 m/s	0.5 m/s
	T <sub>evaporator</sub>	28.5 °C	31 °C
	T <sub>cell_max</sub>	33.64 °C	36.17 °C

→ La 2<sup>ème</sup> configuration est plus favorable  
Elle se rapproche plus des conditions  
d'intégration (espace confiné)

# Les caloducs tubes pour les batteries Li-ion

- Refroidissement par ventilation forcée
- L'influence de la ventilation (2<sup>ème</sup> configuration)
- Comparaison avec le stockeur refroidi par air

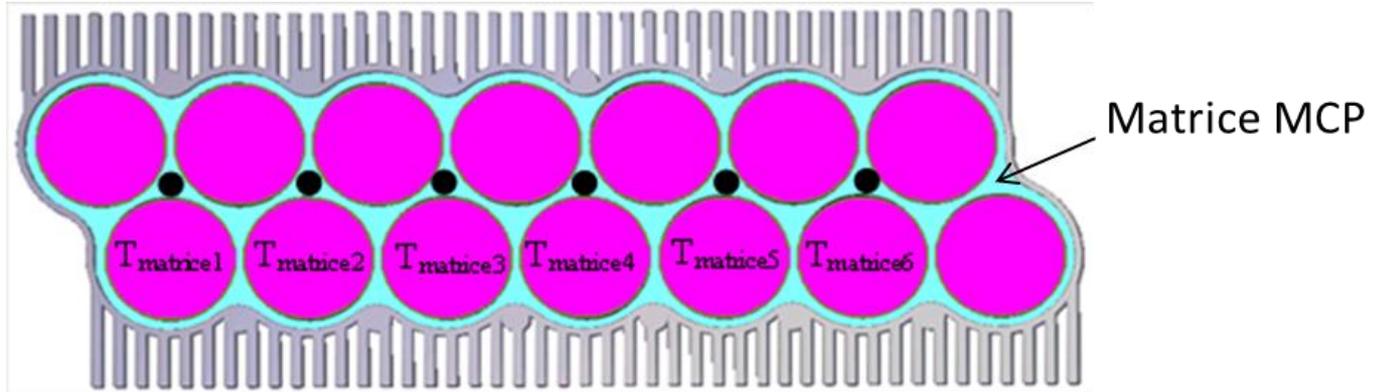


→ Le caloduc refroidit la batterie de manière efficace

à moindre consommation énergétique

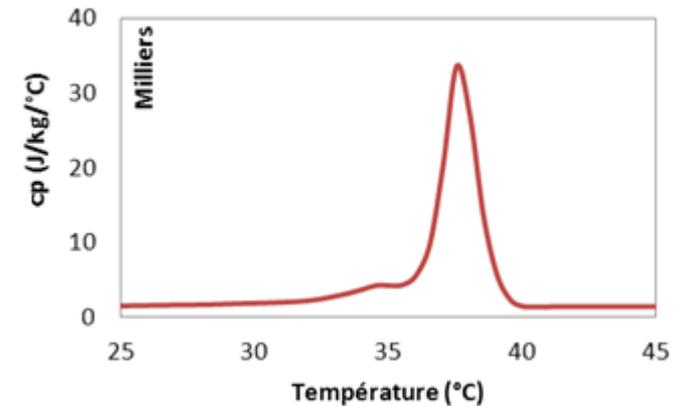
# Refroidissement combiné MCP-Dissipateur

- Le stockeur refroidi par MCP



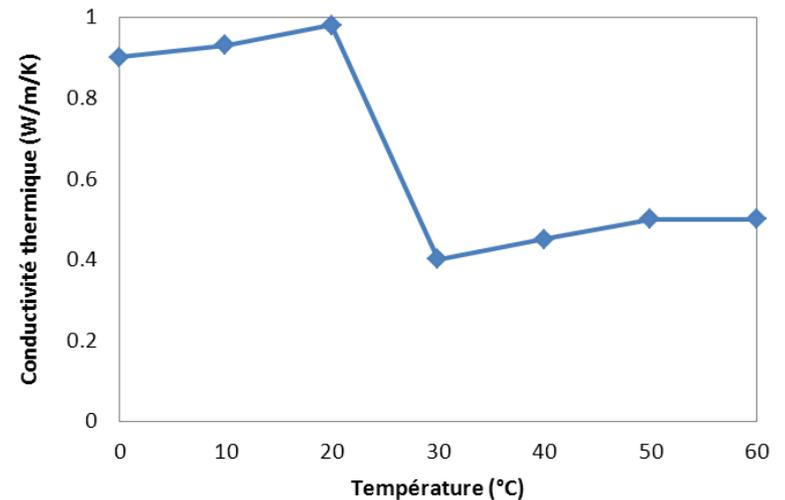
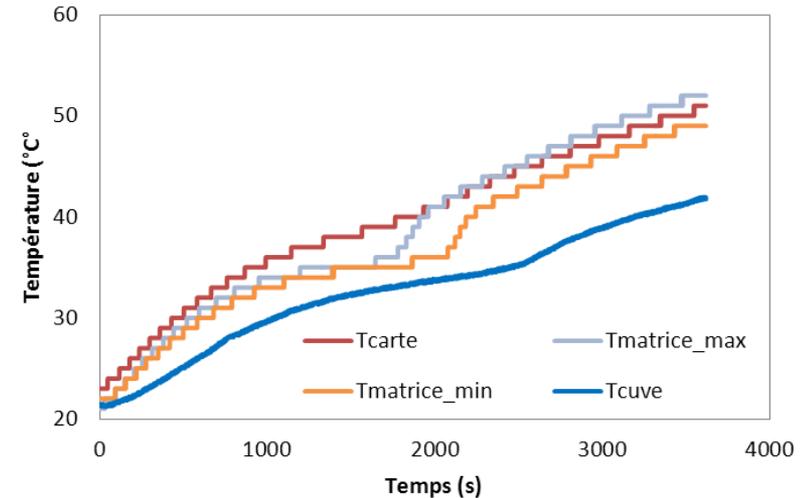
- Formulation MCP-silicone

$T_{\text{fusion}}$	$\sim 35\text{ }^{\circ}\text{C}$
Capacité thermique apparente	$c_p=f(T)$
Conductivité thermique	$\sim 1\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$
Isolation électrique	++
Vieillessement	6000 cycles



# Refroidissement combiné MCP-Dissipateur

- Test en convection naturelle
    - Stagnation de  $T_{\text{matrice}}$  à 35°C
    - Le gradient de température  $\Delta T_{\text{matrice-cuve}}$  augmente suite à la fusion du MCP
- $\lambda_{\text{MCP}}$  se dégrade fortement suite à la fusion



# Refroidissement combiné MCP-Dissipateur

## ➤ Convection forcée

- La performance thermique du pack MCP est plus faible que celle du pack résiné.

→ *Mauvais interface thermique*

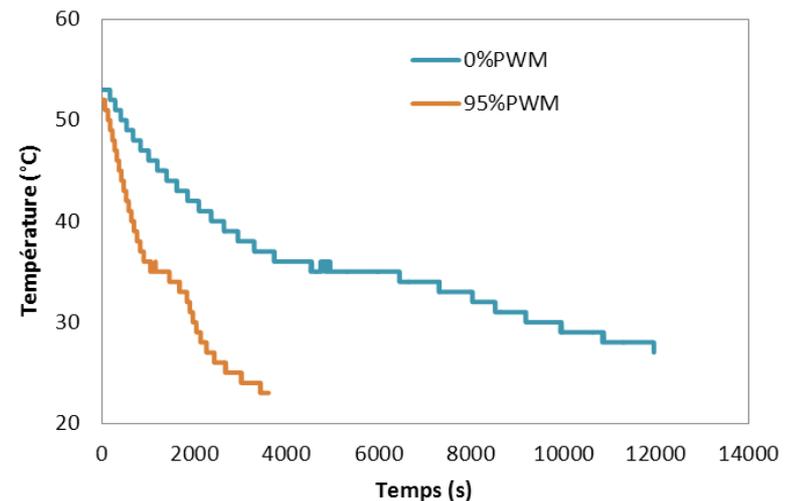
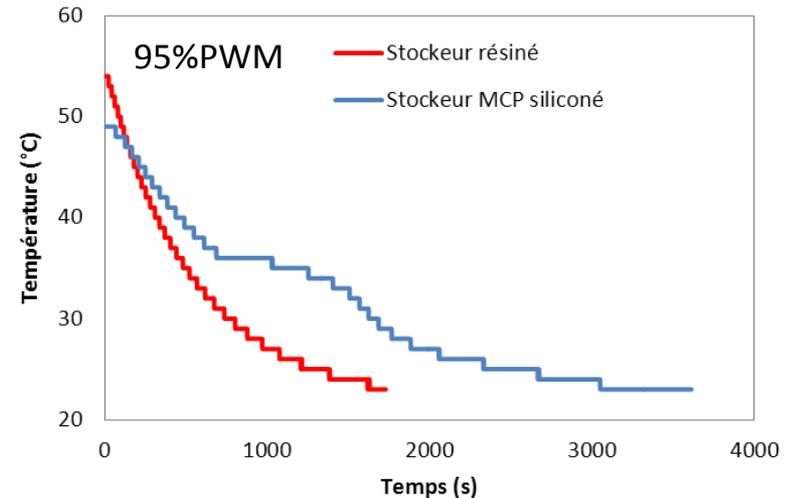
*(L'évacuation de la chaleur avec l'ambient est limitée)*

Puissance	PWM (%)	Tcarte* (°C)	
		MCP	Résine
1 <sup>er</sup> niveaux de puissance	15	>52	40
	25	>52	35
	50	38	32
	95	37	31
2 <sup>ème</sup> niveaux de puissance	15	>52	44
	25	>52	41
	50	43	37
	95	44	36
3 <sup>ème</sup> niveaux de puissance	25	>52	>52
	50	>52	43
	95	>52	42

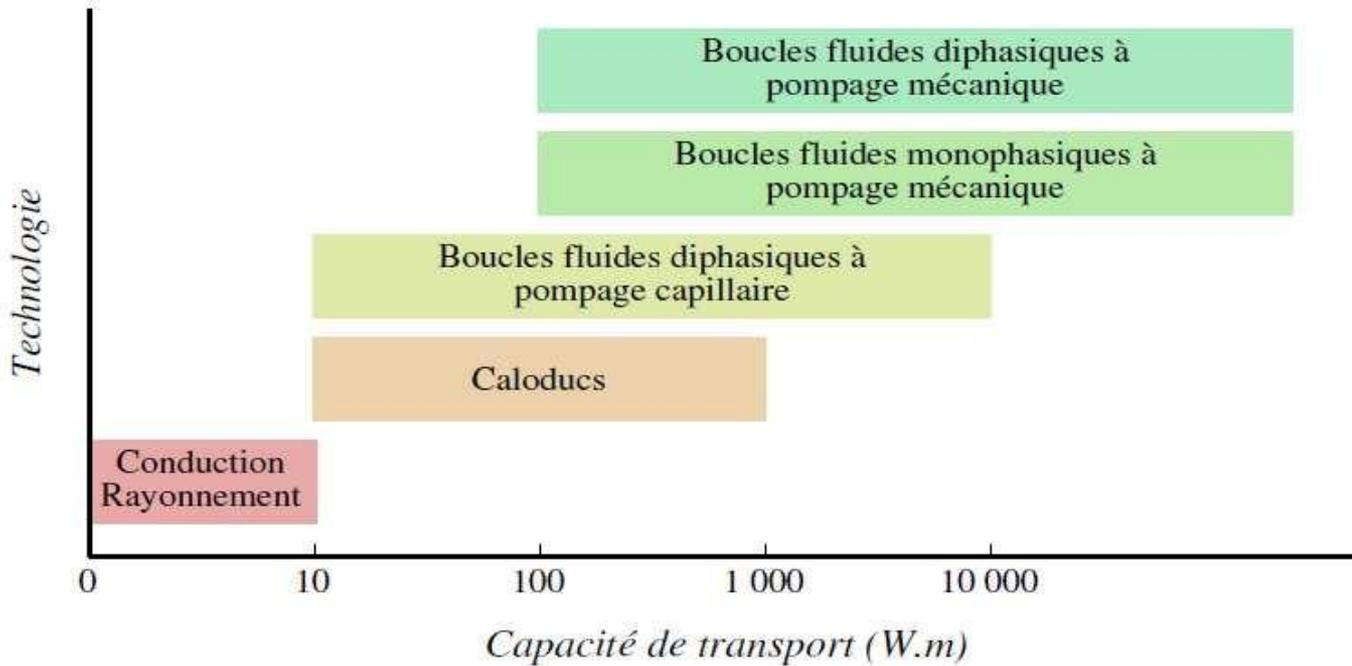
(\*) : à l'équilibre thermique

# Refroidissement combiné MCP-Dissipateur

- Restitution de la chaleur
- La restitution du pack MCP est 2 fois plus longue que pour le pack résiné
- La restitution en convection naturelle nécessite jusqu'à 4h.

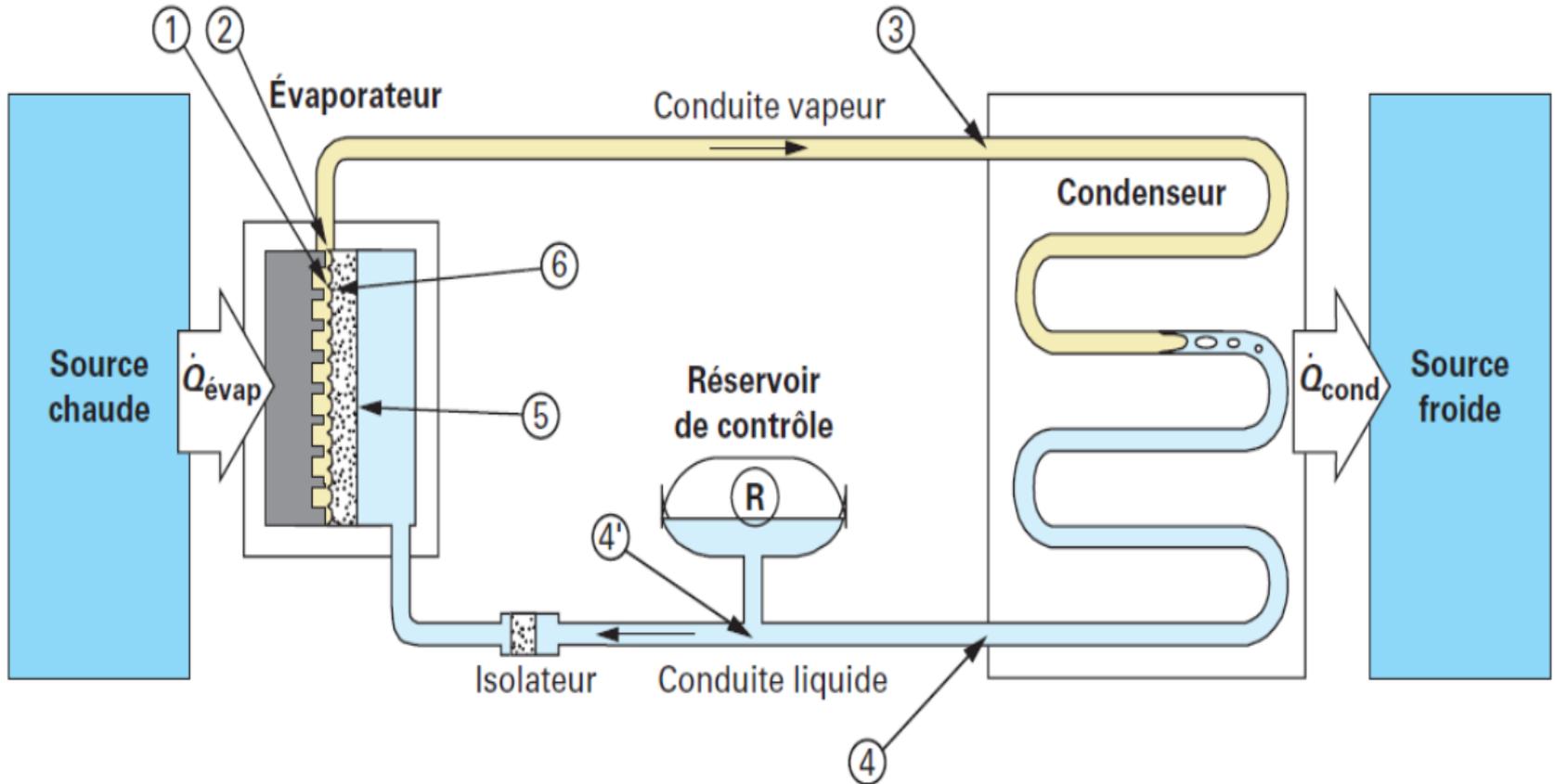


# Refroidissement par boucle diphasique à pompage capillaire



# Refroidissement par boucle diphasique à pompage capillaire

## Principe de fonctionnement



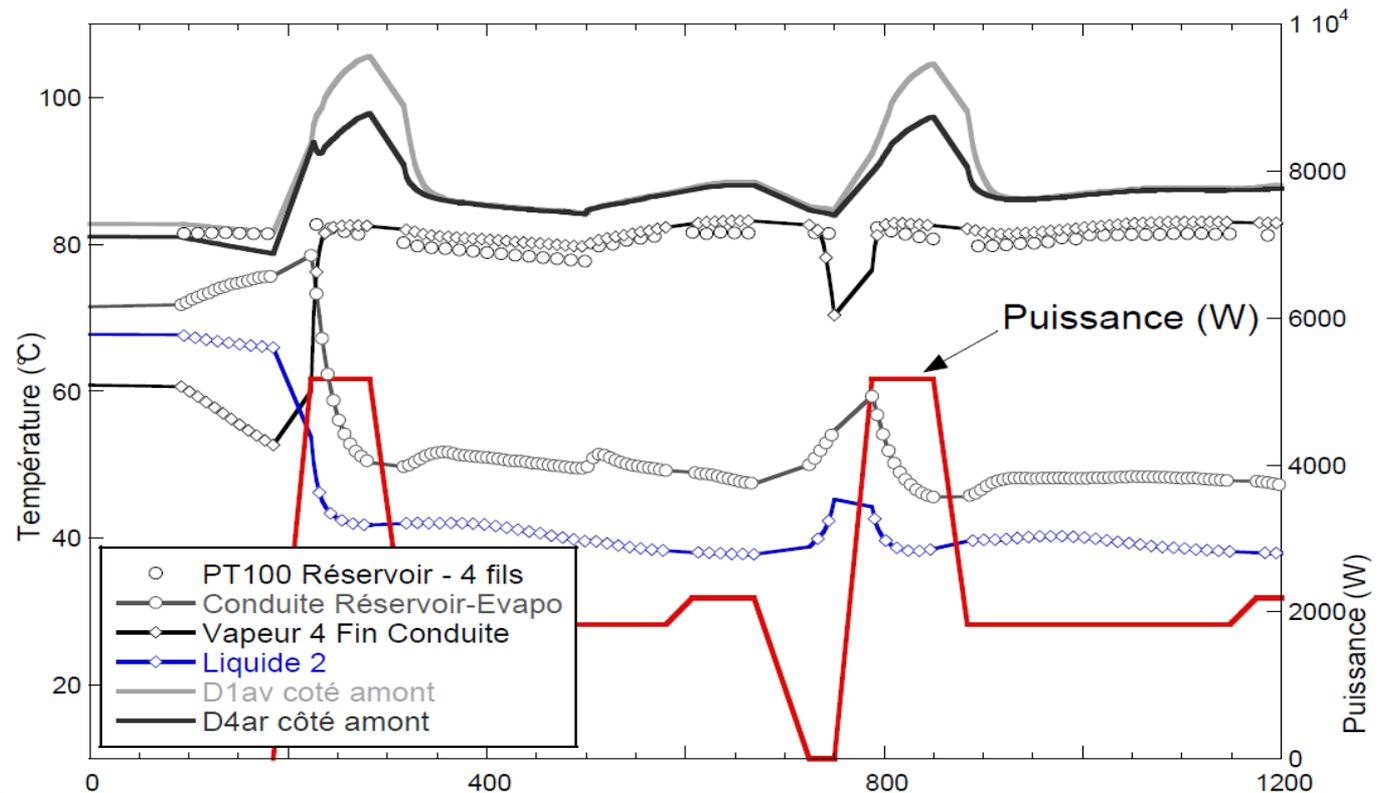
## Refroidissement par boucle diphasique à pompage capillaire



**Test d'une CPLIP sur une rame du métro parisien (RATP)**

# Refroidissement par boucle diphasique à pompage capillaire

Comportement transitoire de la boucle soumise à des cycles de traction, densité=18 W/cm<sup>2</sup>, Malgré l'importance de la puissance appliquée apportée à la boucle, les températures de diffuseurs restent toujours inférieures à 106 °C.



# Refroidissement par boucle diphasique à pompage capillaire

Fabricant	Versions	Flux (W)	densité de flux max (W/cm <sup>2</sup> )	Longueur (m)	Domaine d'application
EHP & EADS astrium	mini-LHP	10 – 200	15	< 1	Spatial / Aéronautique
	LHP CPLIP	15–1500 100 - 6000	15 45	1–5 1-5	Spatial Ferroviaire
Swales Aerospace & ATK	mini-LHP	0 – 200	15	< 1	Spatial
	LHP	15 - 1500	15	1 < L < 5	Spatial
Thermacore	mini-LHPCP	25 – 200	< 15	3	Aéronautique
	LHPCP	875	15	3	Aéronautique
ACT	mini-LHP	0 – 200	15	3	Aéronautique
	LHP	50 - 5000	30	3	Aéronautique

# Moyens expérimentaux

Caméra infrarouges

Systèmes Laser pour les mesures dans les écoulements

Prototypes de caloducs

Souffleries

Banc de test de machines tournantes

# Outils de simulation

Code « Maison » SAME Simulation Aeérothermique des Machines Electriques

Couplage à des algorithmes d'optimisation : Génétiques, VNS, PSO....

Code de simulation Volume Finis