

Quelques exemples d'activités autour de l'intensification des échanges thermiques et de l'efficacité énergétique

Ph. Marty

Une collaboration :

- *LEGI (UJF/CNRS/G-INP)*
- *LETh (CEA-Grenoble)*
- *Institut Néel (CNRS)*

Plan de l'exposé

- ◆ Présentation des activités grenobloises
- ◆ Les échangeurs-réacteurs
 - Vers une prise en compte simultanée des échanges de masse et de chaleur
- ◆ Intensification des échanges diphasiques
 - Les échanges diphasiques en mini-canaux: exemple des PEMFC
 - L'effet du mouillage
 - Le problème récurrent de la distribution diphasique
- ◆ Nouveaux procédés pour le stockage de l'énergie
 - L'exemple des fours verriers
 - Le stockage massif de l'électricité
 - Le stockage de l'hydrogène

Objectifs:

- ◆ Intensification des transferts
- ◆ Développement de nouveaux procédés

Secteurs concernés:

- ◆ Industrie & Transports
- ◆ Habitat
- ◆ Solaire

Industrie & Transports

- ◆ **Développement d'échangeurs compacts innovants :**
 - Echangeurs à haute et très haute température
 - Nanofluides et nanostructuration
- ◆ **Echangeurs-multifonctionnels pour :**
 - Procédés chimiques continus,
 - Reformage d'H₂,
 - Biocarburants à partir de gaz (procédés GTL et BTL)
- ◆ **Composants thermiques pour l'automobile :**
 - Optimisation de la thermique moteur,
 - Echangeurs / automobile,
 - Thermique des batteries pour VL hybrides et électriques

Habitat

- ◆ **Systemes énergétiques dans l'habitat :**
 - Les systèmes énergétiques chaud/froid pour le bâtiment
 - Le contrôle/commande des installations

- ◆ **Composants thermiques dans l'habitat**
 - Les capteurs solaires thermiques
 - Le rafraîchissement solaire

Solaire

- ◆ **Centrale solaire à tour (cycle à gaz à HT) :**
 - Projet PEGASE en collaboration avec Promes
 - Développement et fabrication du récepteur
- ◆ **Centrale solaire autonome de petite puissance**
 - ◆ Capteurs solaires à faible couts
 - ◆ Stockage de la chaleur
 - ◆ Implantation de deux centrales prototypes de 5-10 kWe
- ◆ **Centrale solaire à concentrateur linéaire**
 - ◆ Etude d'implantation
 - ◆ Développement capteur Fresnel
 - ◆ Stockage de chaleur
 - ◆ Implantation d'une centrale prototype de 50 kWe
- ◆ **Centrale solaire à basse température**
 - ◆ Développement du capteur à Caloduc
 - ◆ Qualification expérimentale
 - ◆ Implantation d'une centrale pilote de 400 kWe



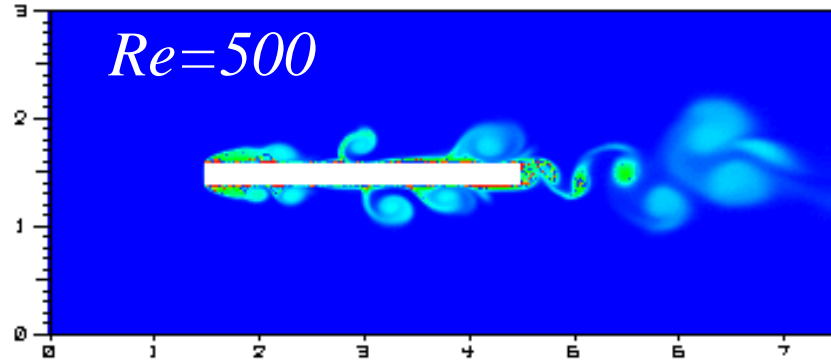
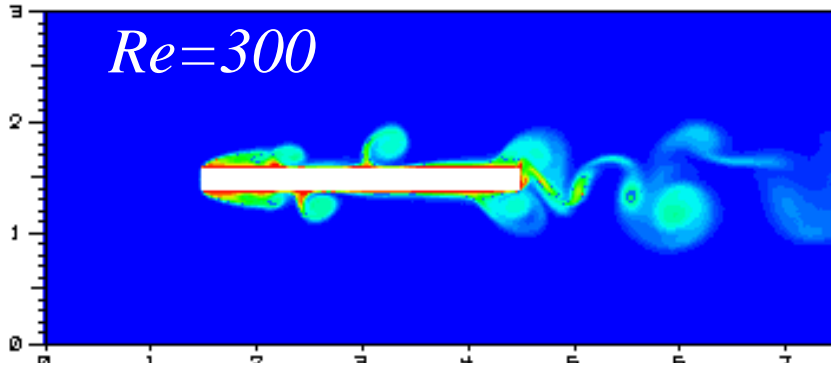
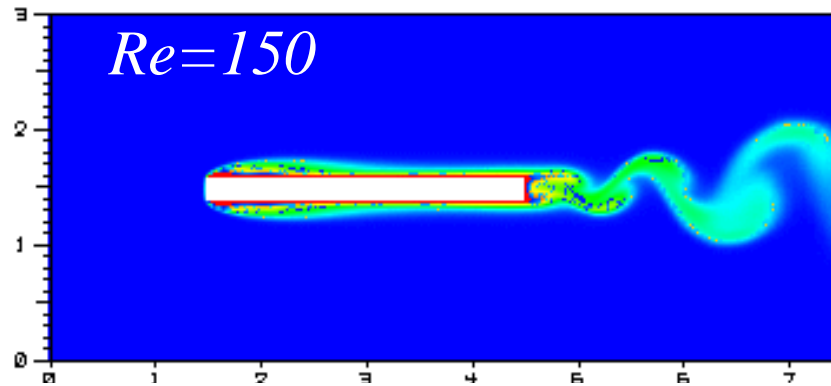
- ◆ Des tailles diverses:
de la maquette à échelle réduite ...



...à l'installation semi-industrielle

Des fluides multiples (réfrigérants, hydrocarbures, eau, CO₂)
Des températures variées (-30 °C, +1300 °C)

Des outils numériques adaptés



Fluent, TRIO
Prosim, Thermoptim

Les échangeurs-réacteurs

- ✧ Couplage réaction chimique / température
- ✧ Maîtrise des transferts de chaleur :
 - Contrôle de la température au sein du milieu réactionnel
 - Meilleures sélectivités
 - Renforcement de la sécurité
 - Cinétiques accélérées
- ✧ Echange de chaleur et réaction au sein du même appareil

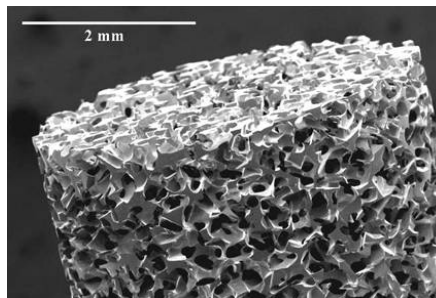
→ Concept
d'échangeur/réacteur

- ✦ Contrainte liée au **temps de séjour** :
 - Temps de séjour suffisant pour la chimie
 - Appareil le plus compact possible



Régime laminaire

Comment concilier régime laminaire avec écoulement piston et intensification des transferts ?

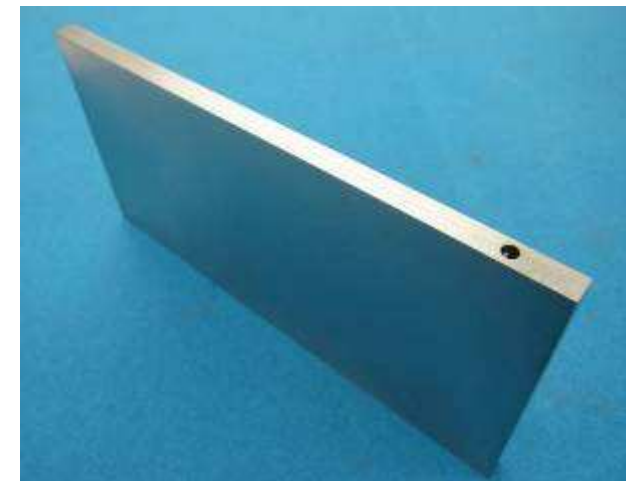
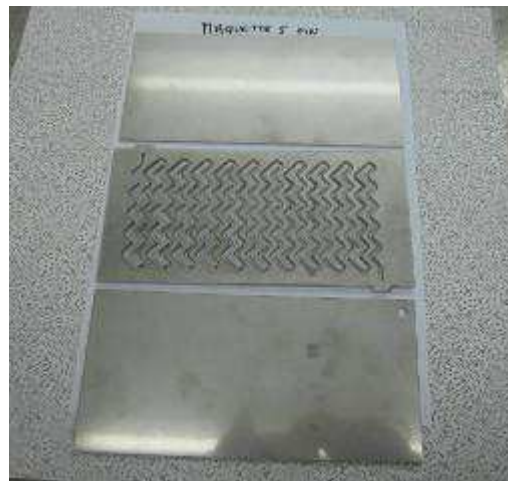
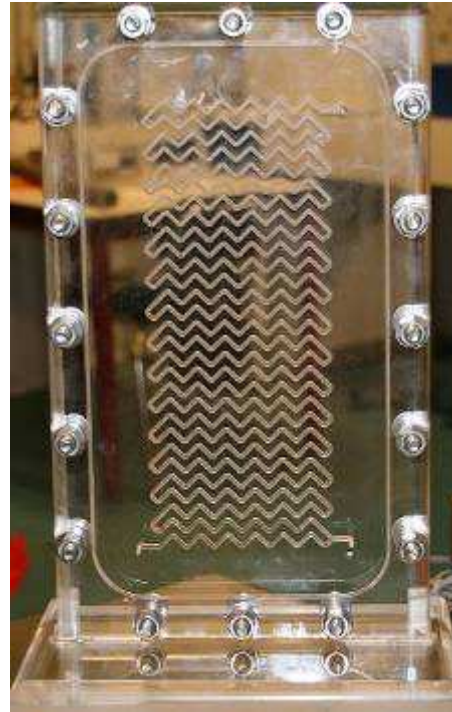


Structuration bidimensionnelle

De l'étude thermo-hydraulique ...

... au prototype

Collaboration:
LGC / ANR RAPIC



Structuration bidimensionnelle

- ⋄ Technologie validée expérimentalement et numériquement
 - Réaction homogène liquide exothermique
 - Modélisation numérique Fluent



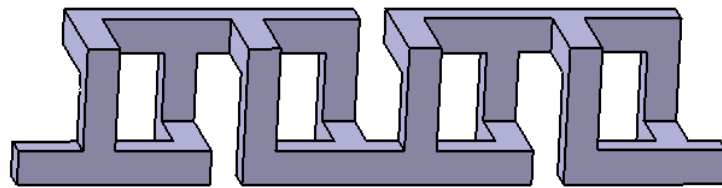
Structuration tri-dimensionnelle

- Intensification en régime laminaire ($Re < 500$)
 - Advection chaotique, transformation du boulanger
 - Fluides visqueux
- Réalisation de prototypes pilotes
 - Echelle 1-10 L/h
 - 2 modes de refroidissement possibles

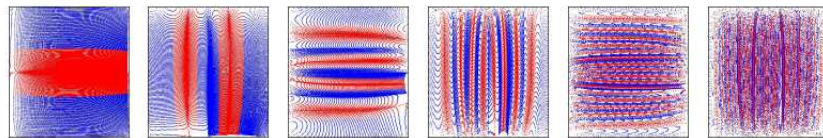
Collaboration:

LTN & Ecole Centrale de Lyon / Energie Extrapolis

Chen geometry



$l=0$



$l = 1$

$l = 2$

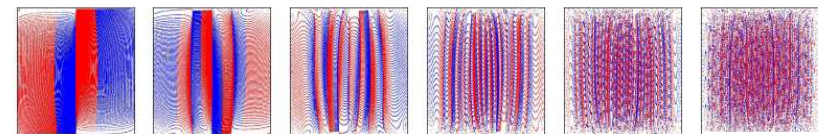
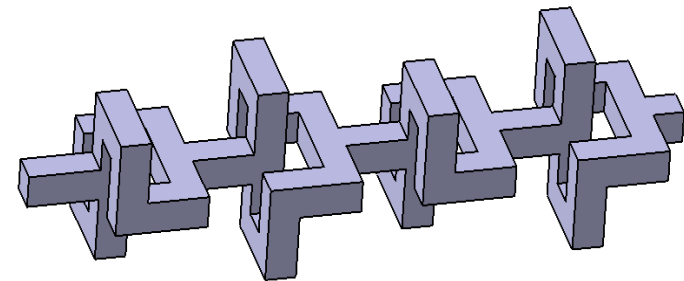
$l = 3$

$l = 4$

$l = 5$

$l = 6$

Gray geometry



$l = 1$

$l = 2$

$l = 3$

$l = 4$

$l = 5$

$l = 6$

l = number of elements

Intensification des échanges diphasiques: contexte des PEMFC

Moteur thermique (rendm^{nt}: 30 %)

Puissance arbre : 60 kW

Puissance à évacuer : 140 kW

85 KW à l'échappement

10 KW convection-raynm^{nt}

45 KW @ 105 °C

dans le circuit de refroid^{mt}

PEMFC (rendement 50 %) :

Puissance arbre : 60 kW

Auxiliaires (gestion des réactifs, etc...): 10 KW

70 KW @ 85 °C dans le circuit de refroid^{mt}

+ de puissance

- de potentiel d'échange

Des échangeurs multi-canaux de petit diamètre hydraulique

→ Rôle croissant de la tension superficielle

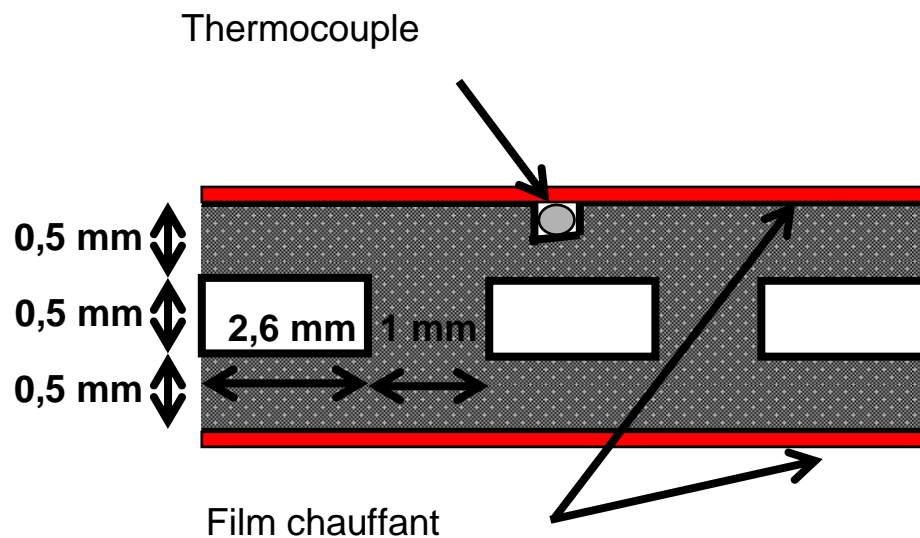
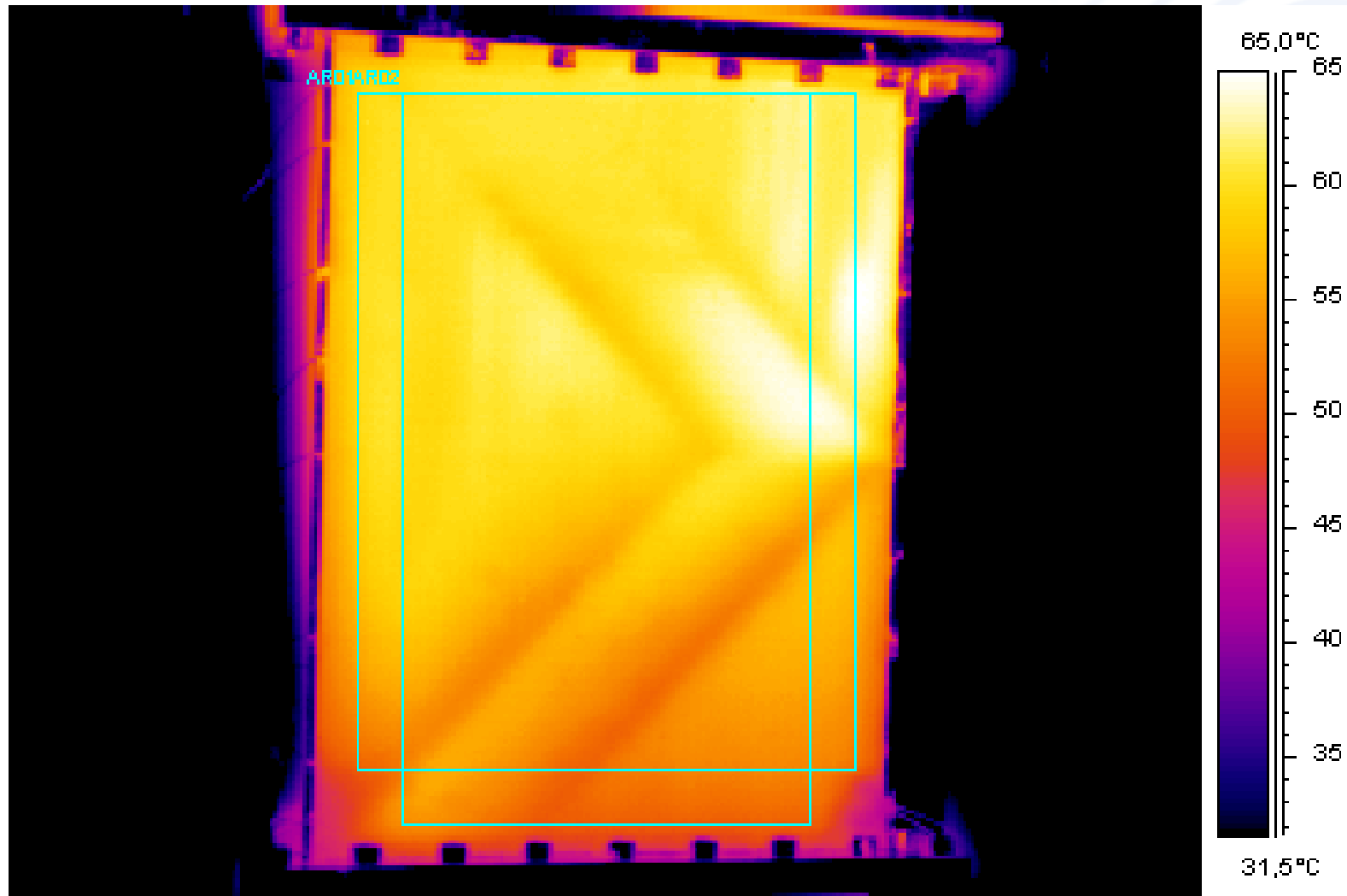
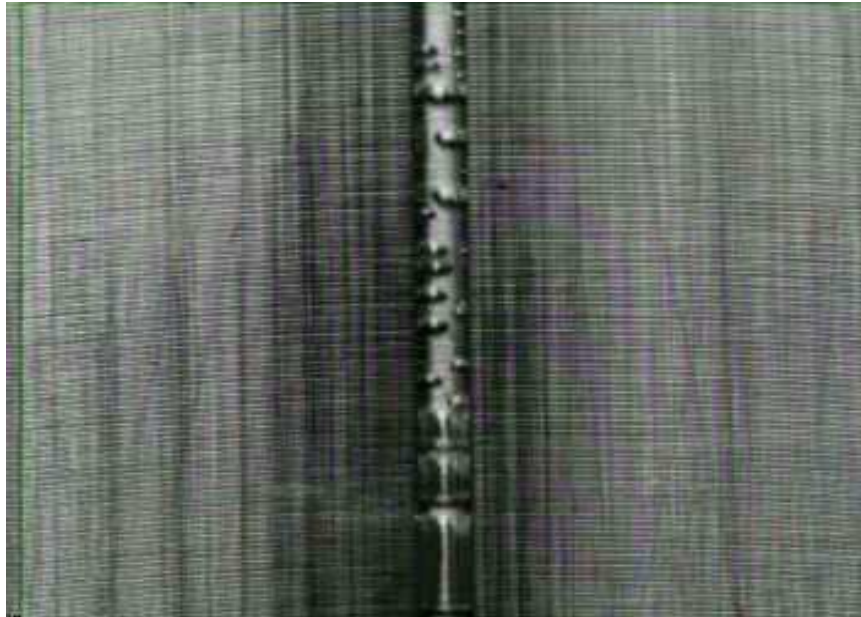


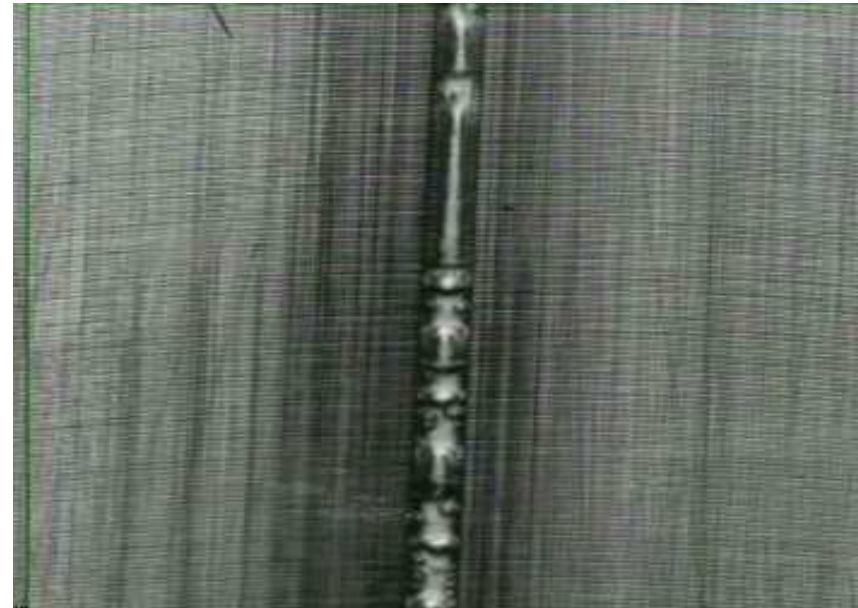
Illustration de l'efficacité du changement de phase



Visualisations des configurations d'écoulement



Régime à bulles

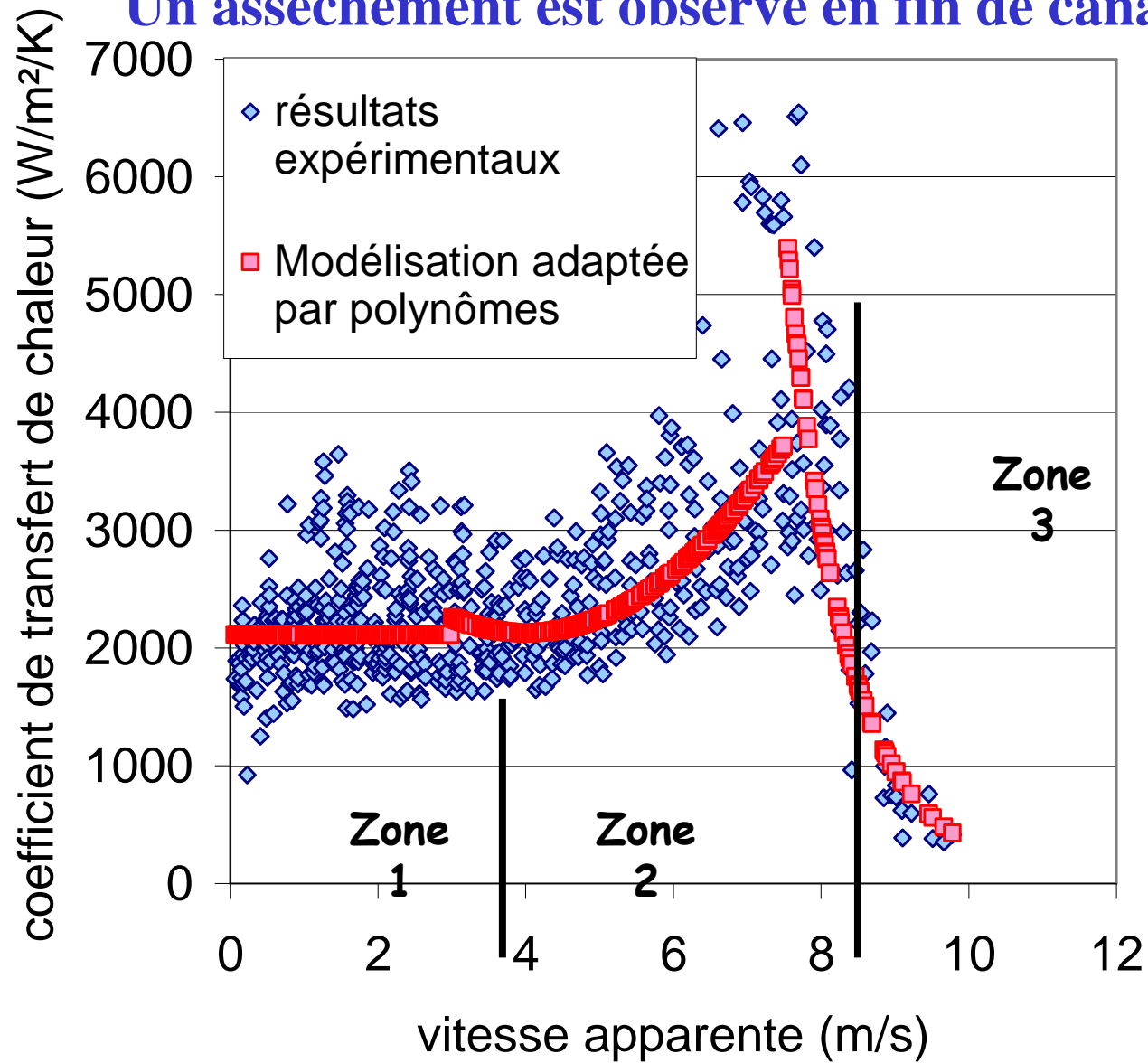


Régime à bouchons

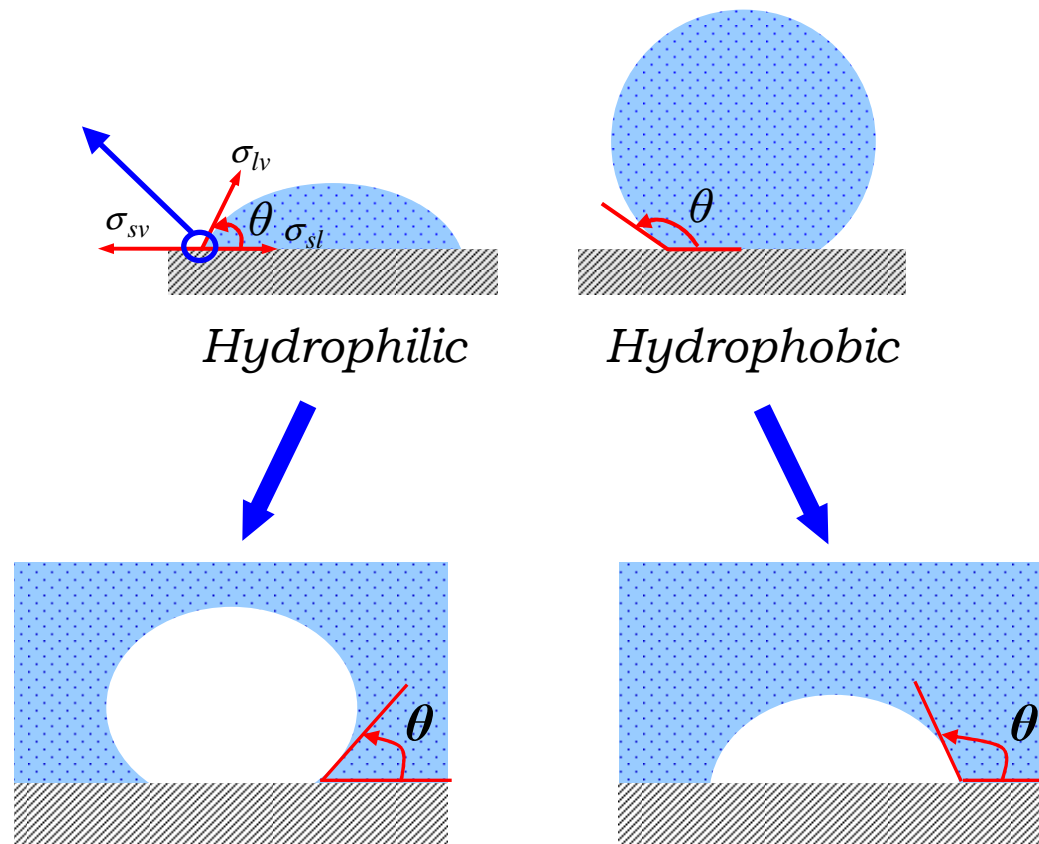


Illustration du régime à bouchons

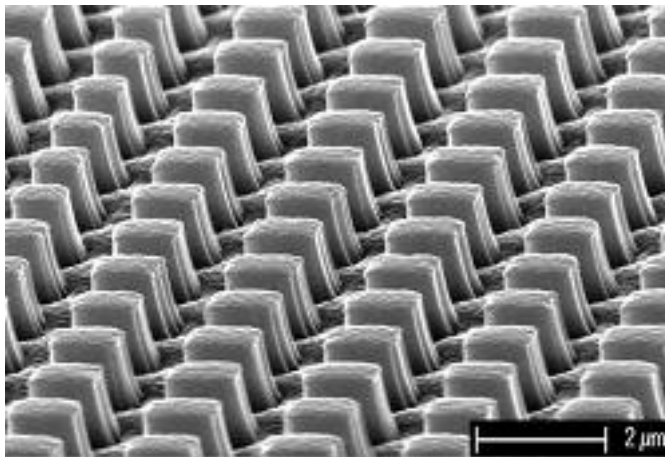
Un assèchement est observé en fin de canal



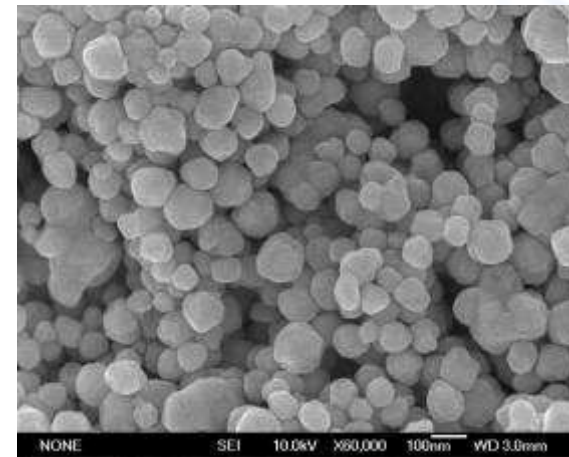
Influence du mouillage sur les transferts diphasiques



Méthode: création de surfaces micro- ou nano-structurées



Micro-structuring



Nanocoating

Experimental samples



22°
SiOx
deposition



31°
TiO₂
deposition



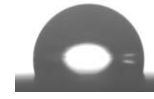
67°
Pt deposition



80°
Fe₂O₃
deposition



85°
Uncoated



104°
SiOC
deposition



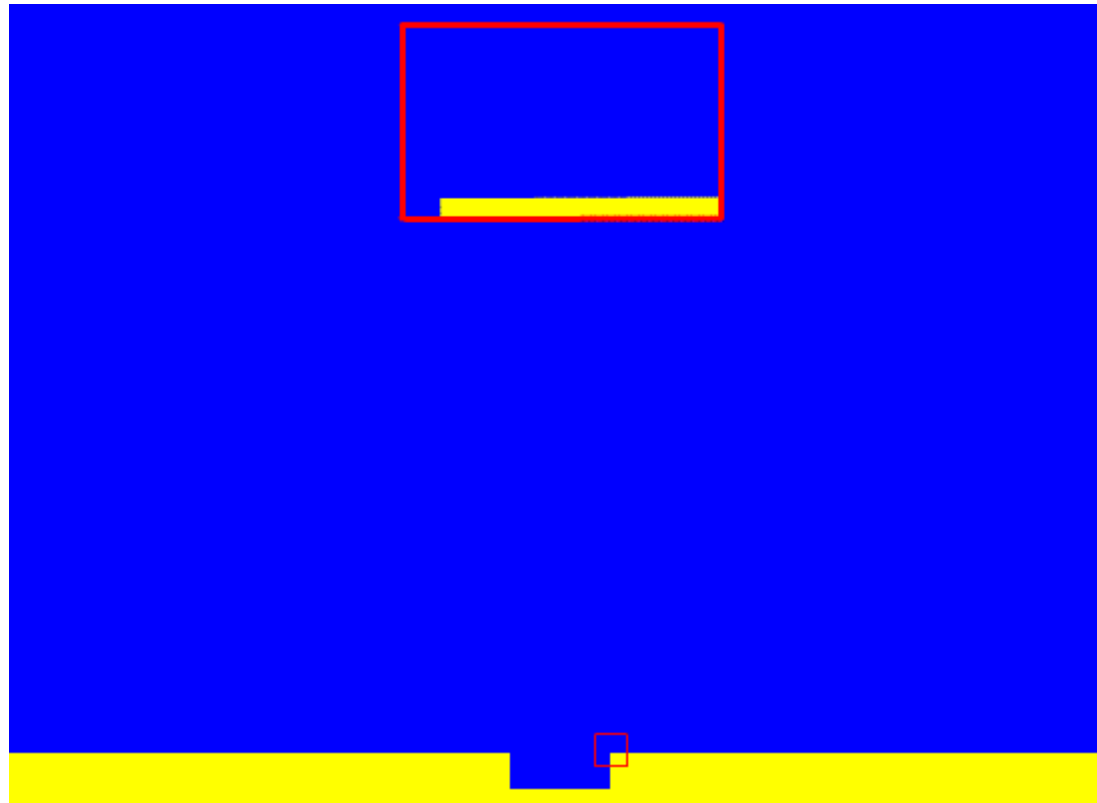
112°
Teflon
deposition

Hydrophilic

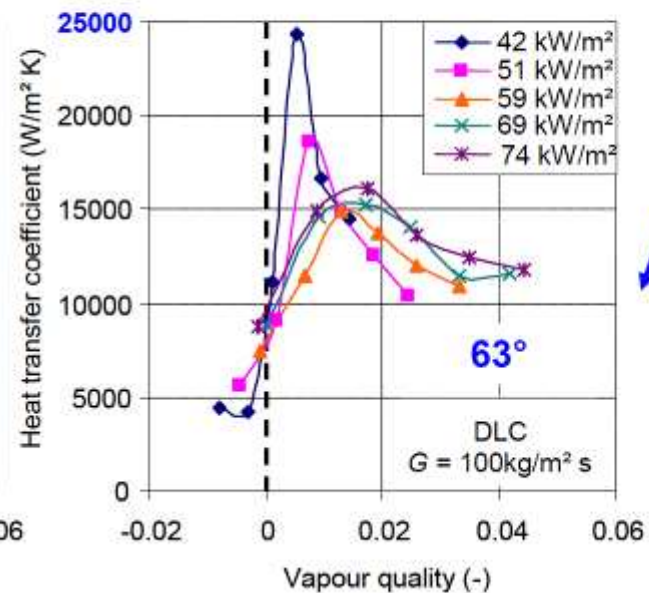
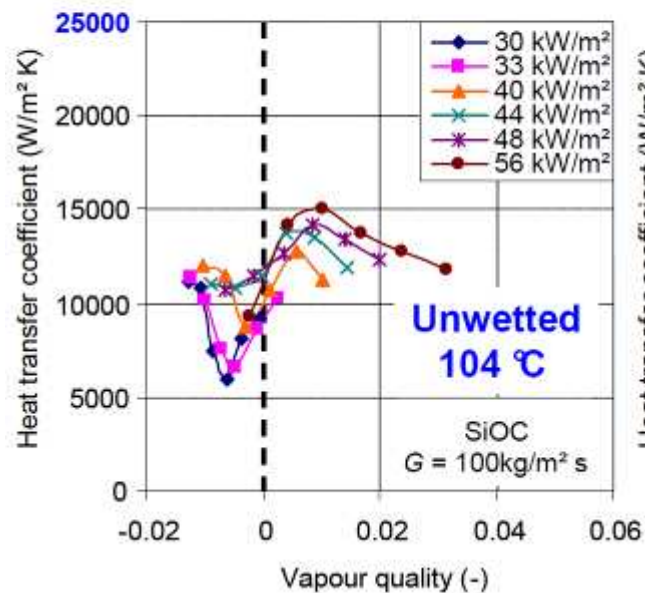
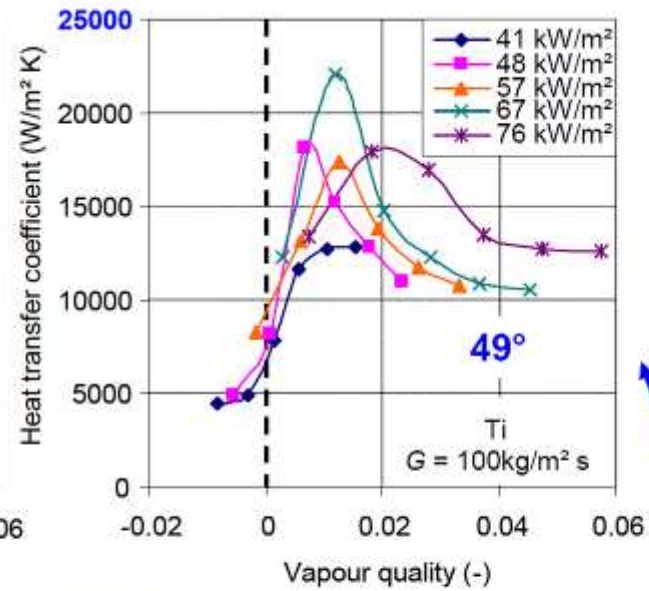
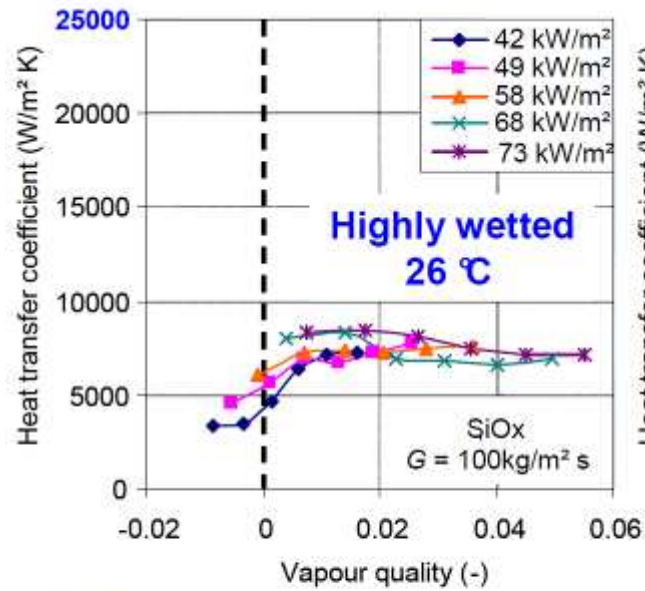
Hydrophobic

(PHAN *et al.*, IJHMT, 2009)

Ebullition en vase: Importance du micro-angle de contact



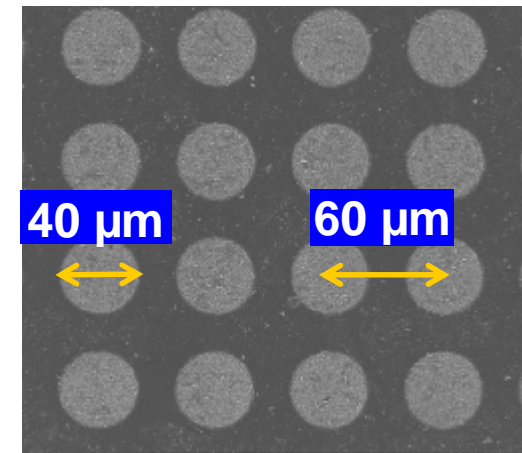
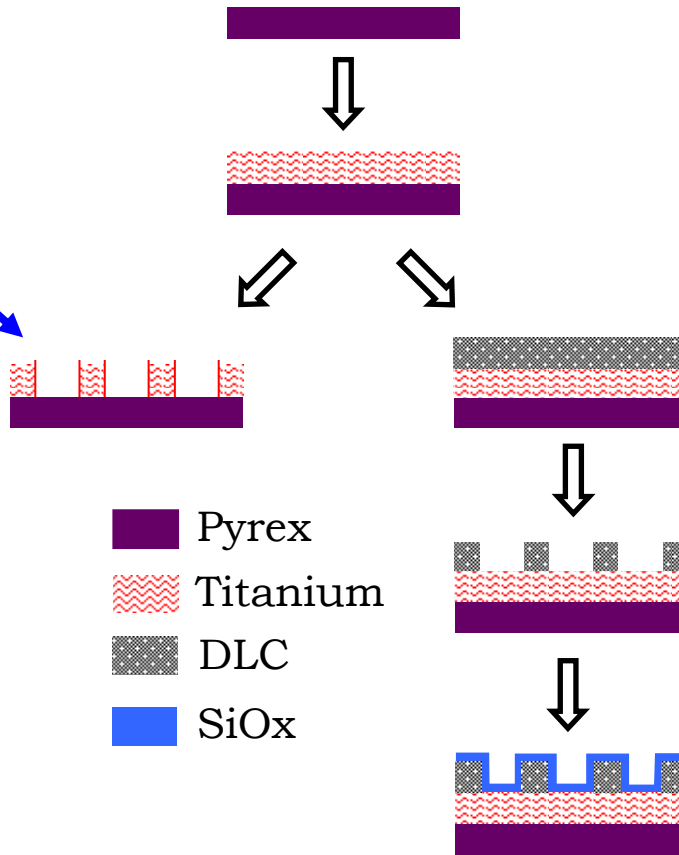
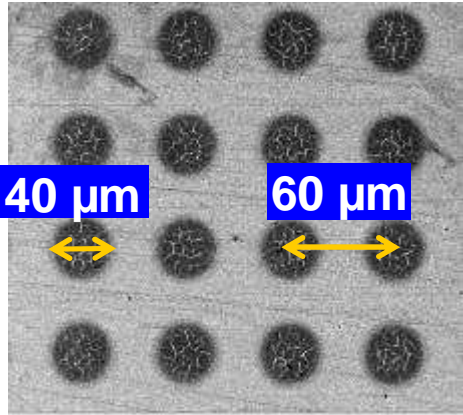
Flow boiling



Low wetted

Evolution vers des surfaces fonctionnalisées

μ -Ti : low wetted



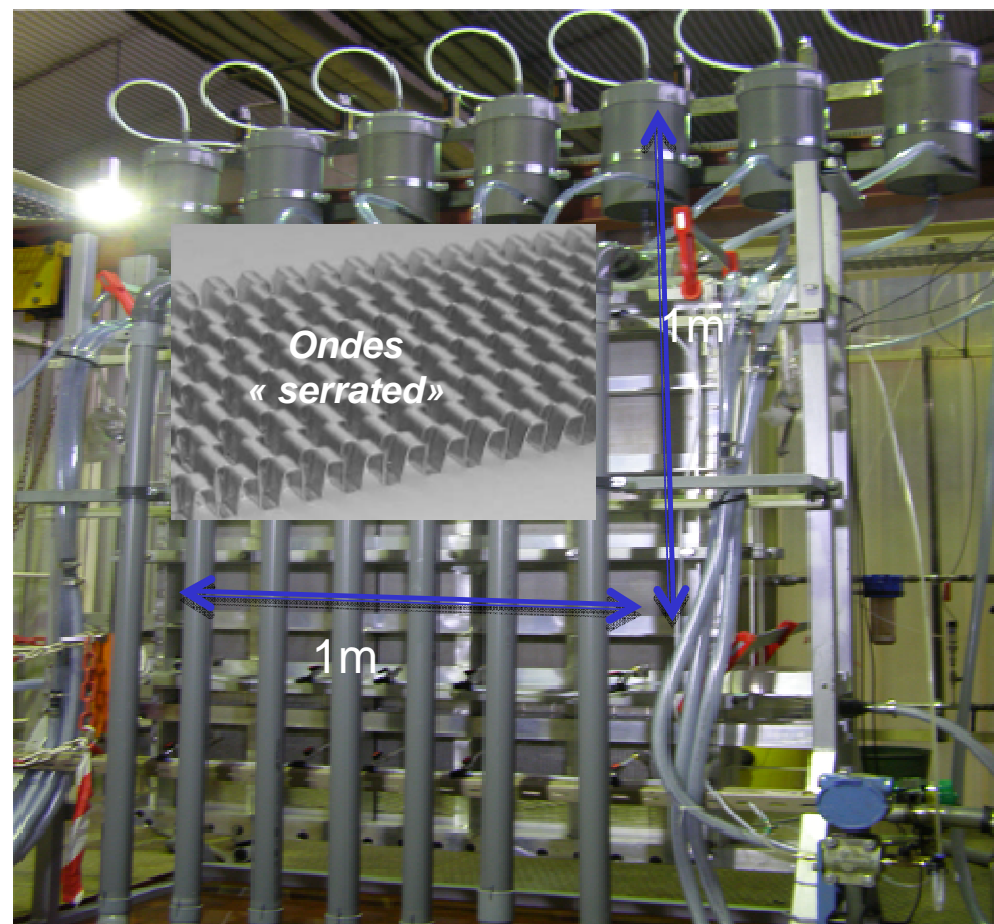
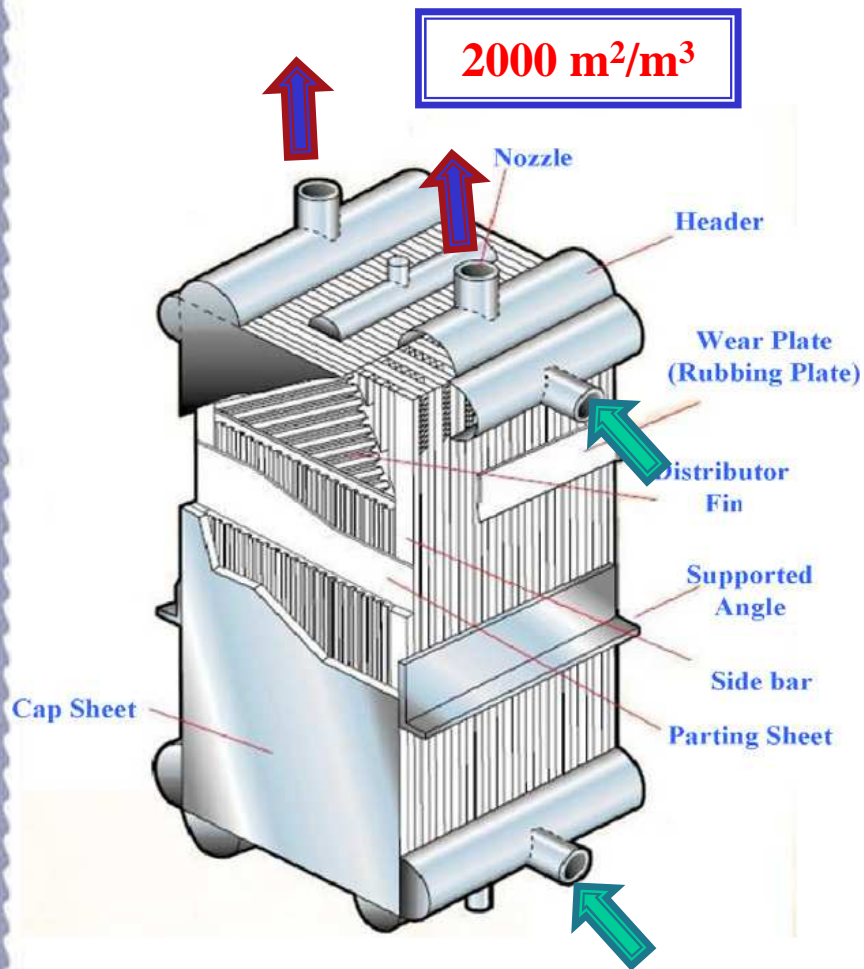
μ -SiOx : highly wetted

Le problème récurrent de la distribution diphasique

Echangeurs à plaques et ondes brasées

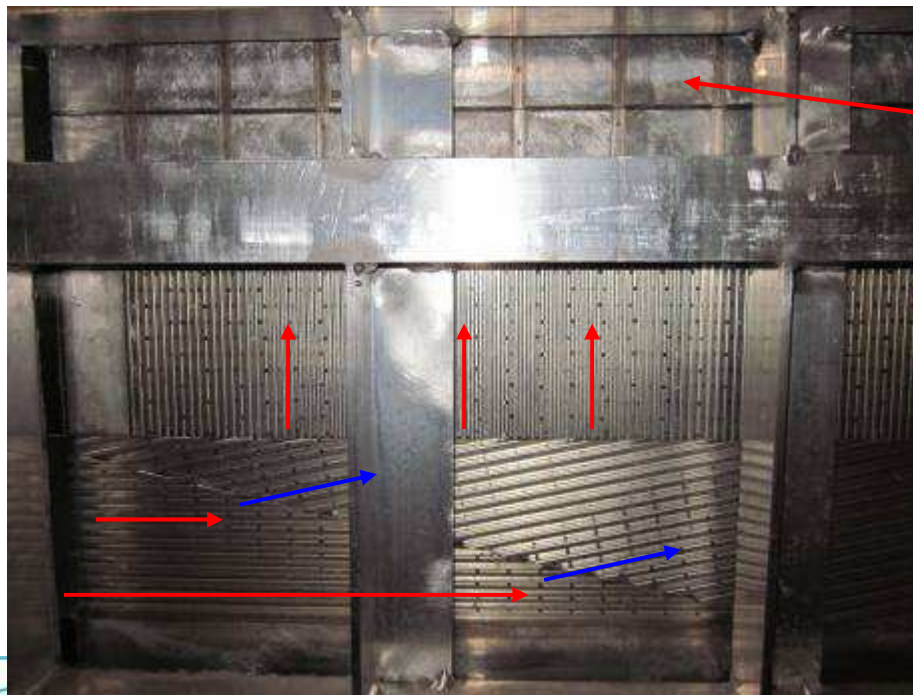
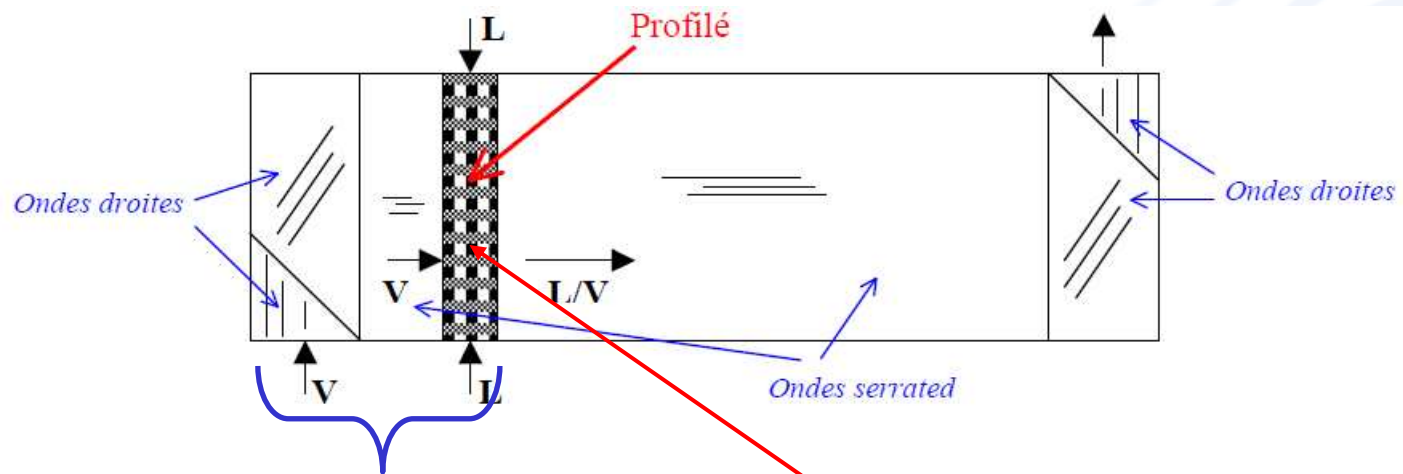
étude de la distribution diphasique

2000 m²/m³

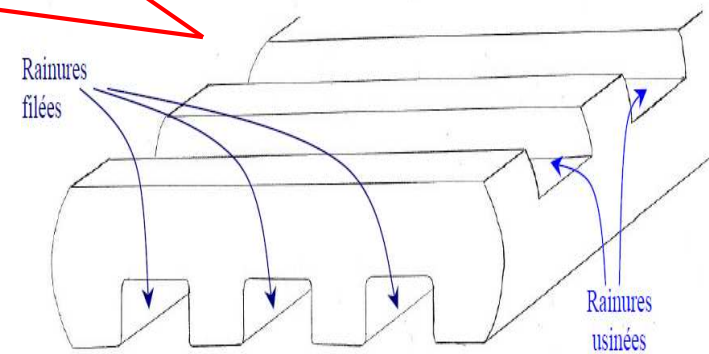


Collaboration:
Fives Cryo

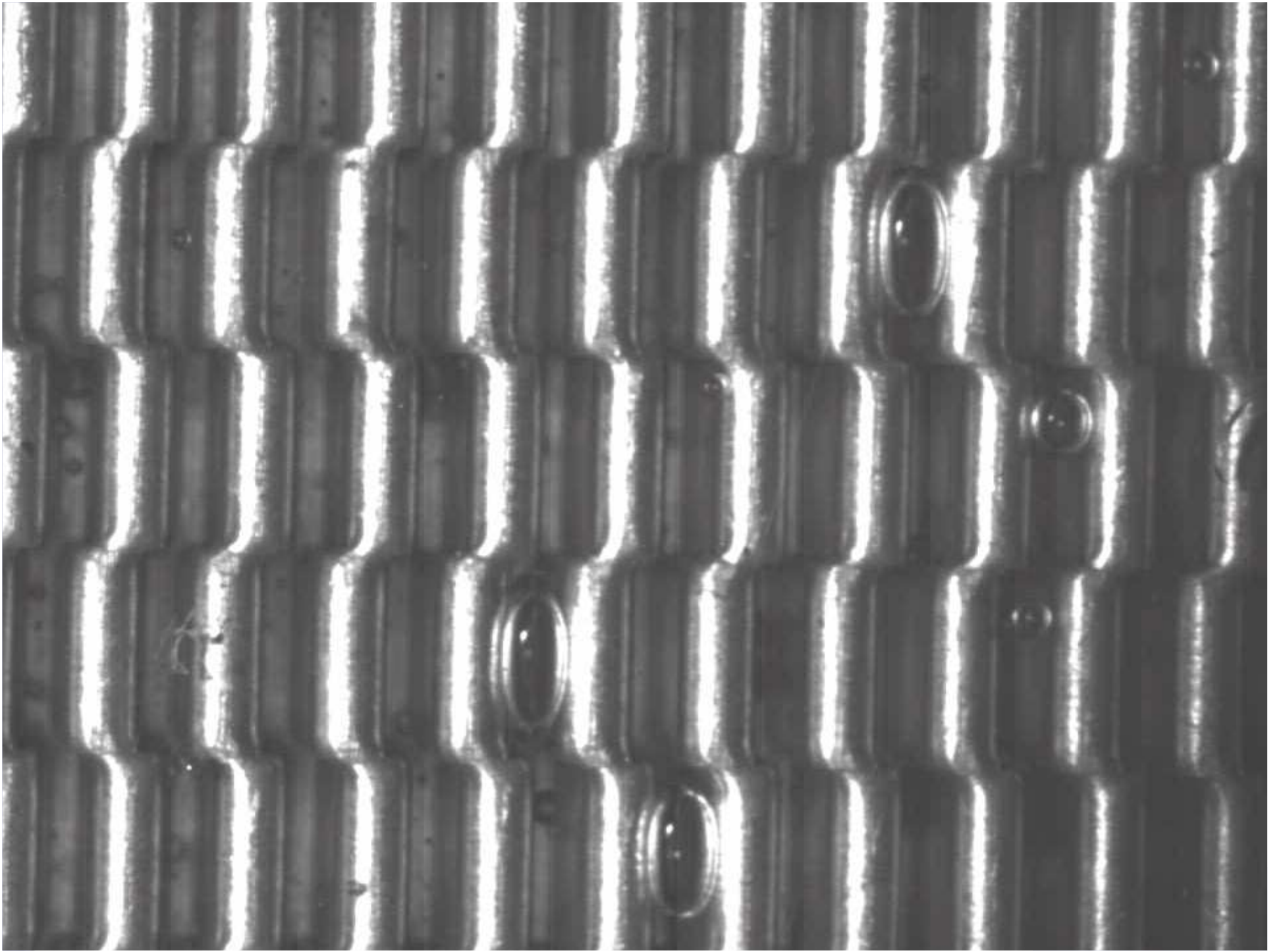
Schéma du distributeur diphasique



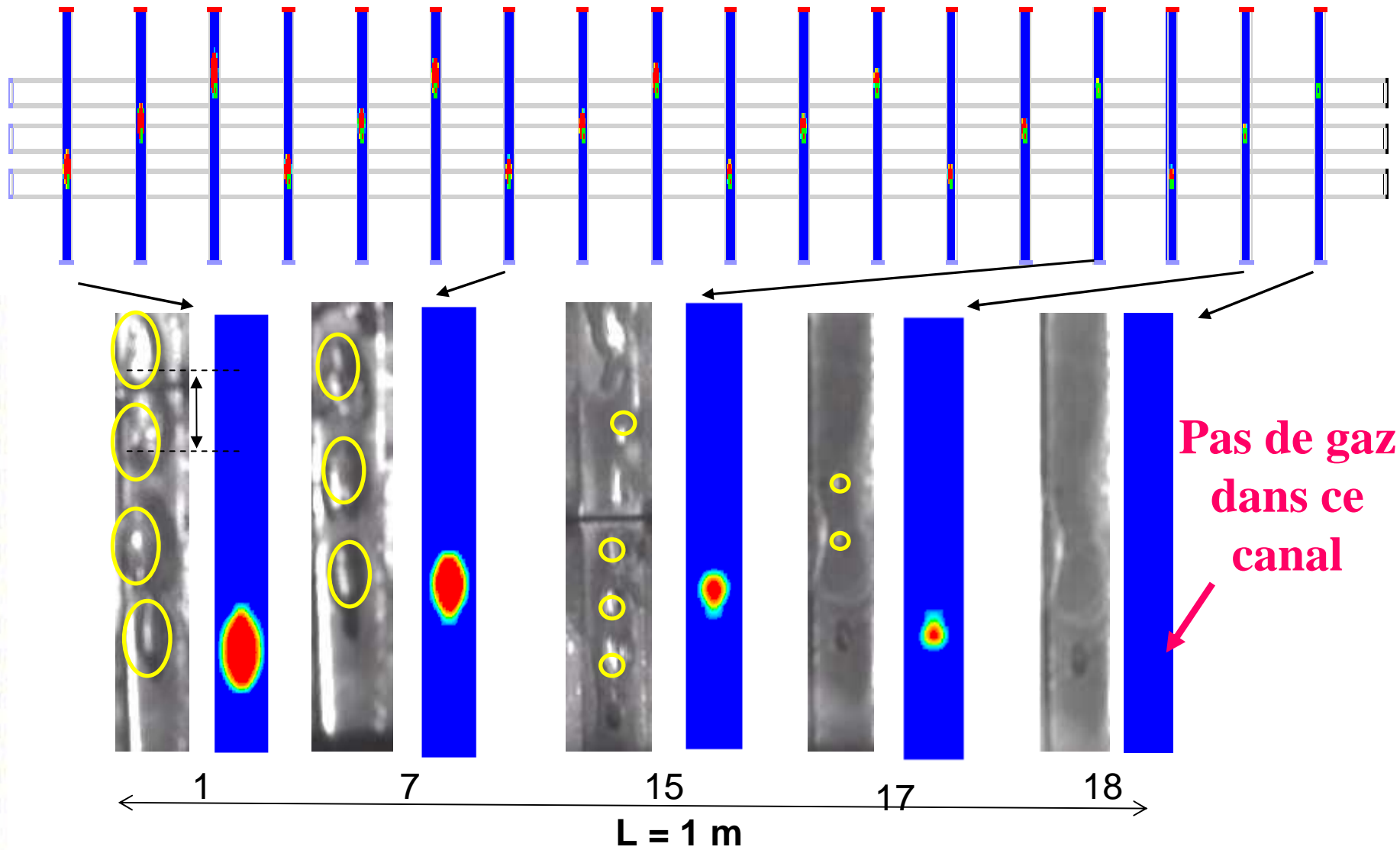
Sens de l'écoulement
→



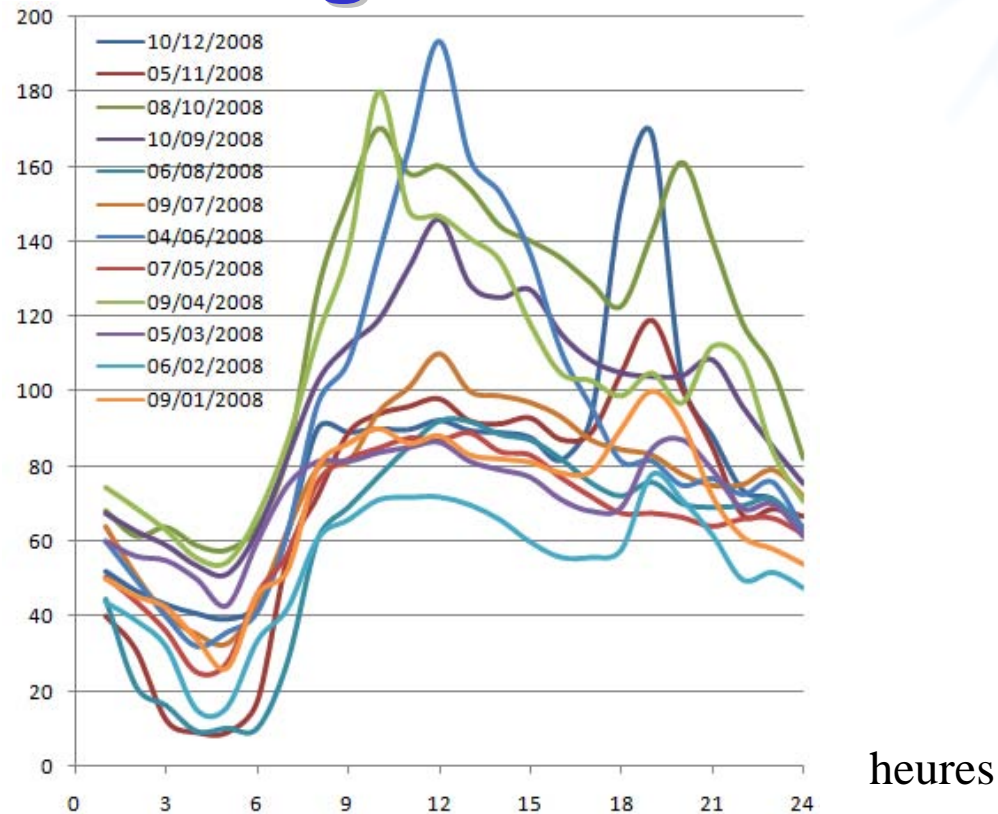
Croquis 3D du profilé de distribution diphasique



Comparaison expérience/simulation



Le stockage de la chaleur



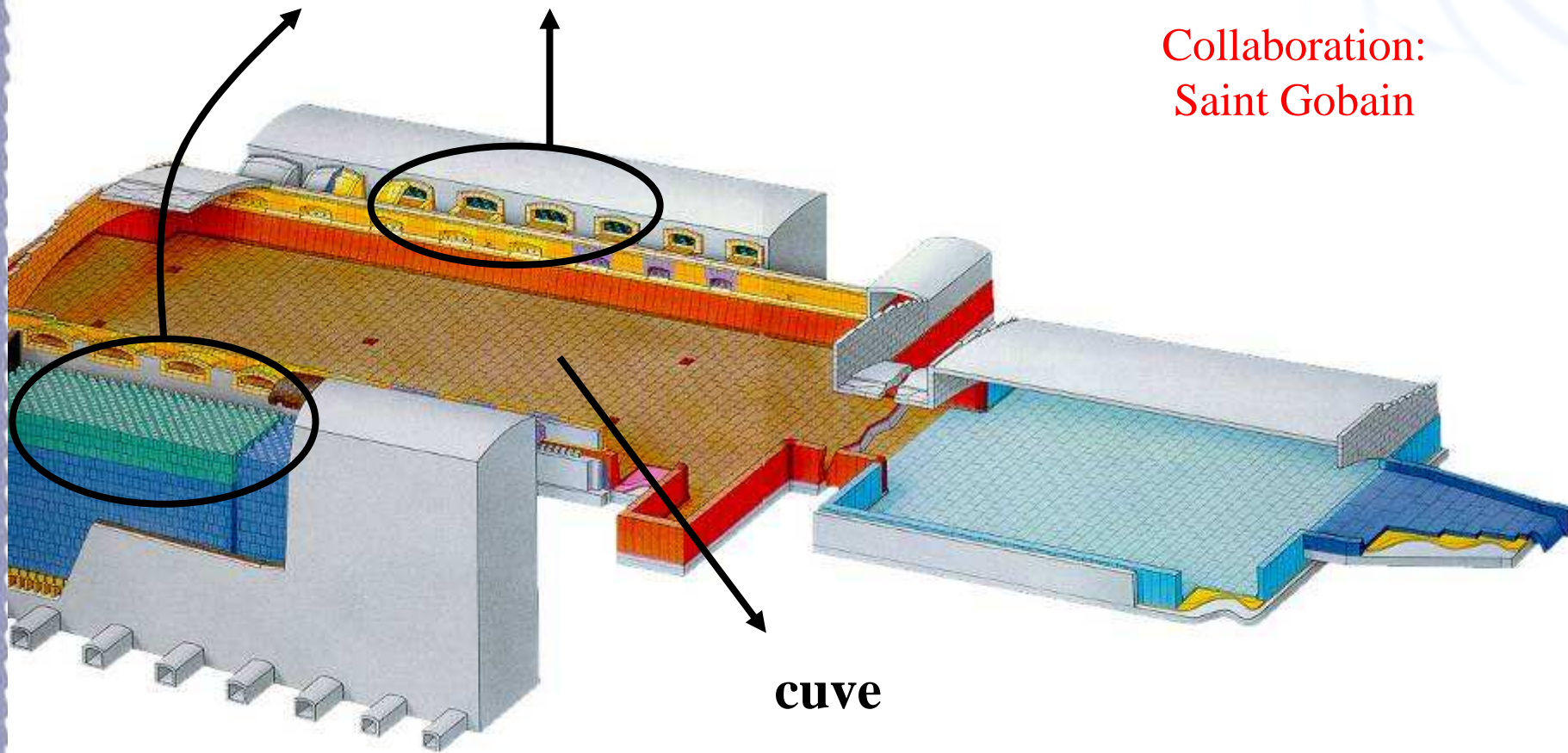
Evolution journalière du prix de l'énergie
(Prix Powernext en €/MWh)

- nécessité **d'économiser**
- mais aussi de **stocker**

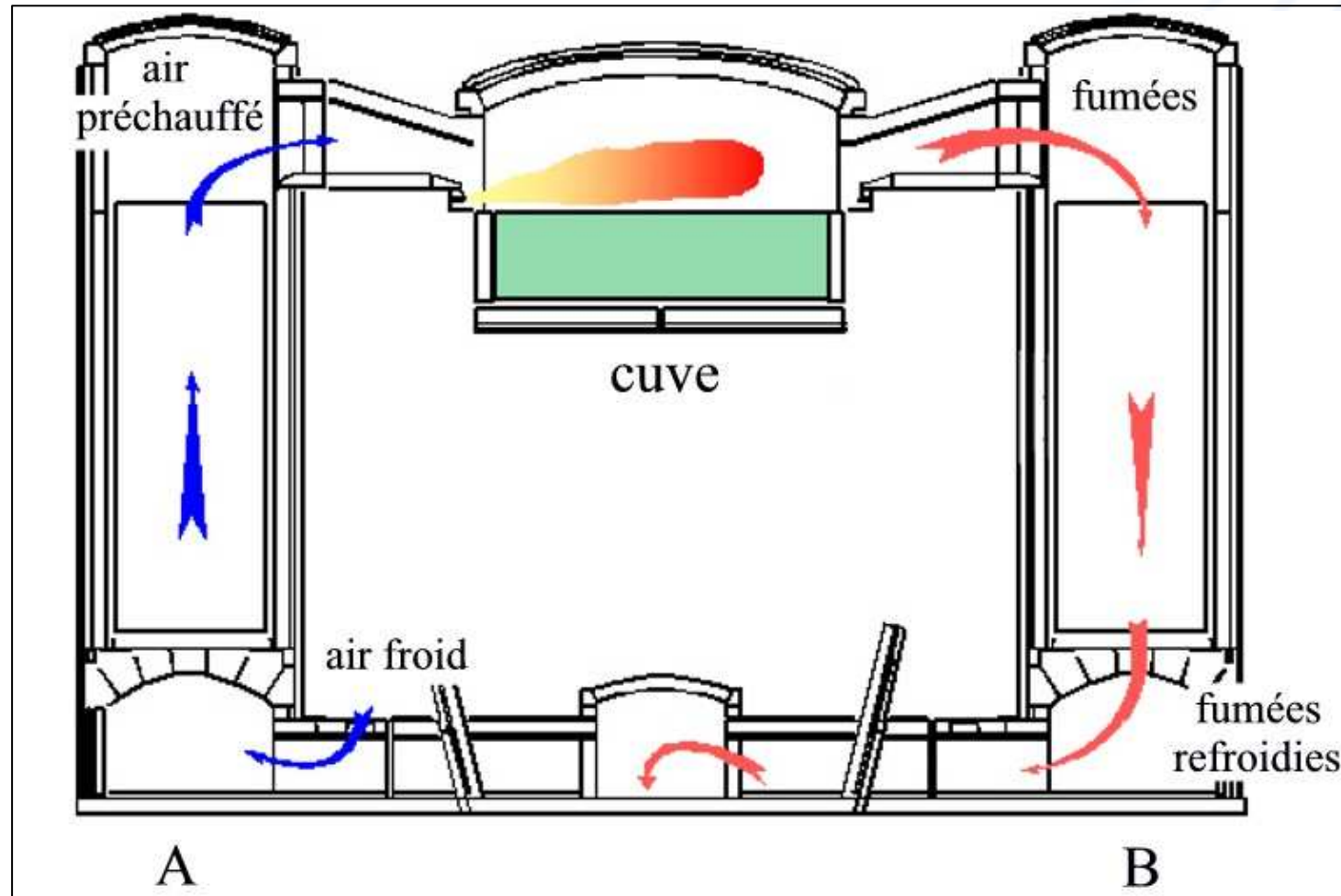
Les fours verriers: un stockage destiné à récupérer la chaleur sortante

Régénérateurs

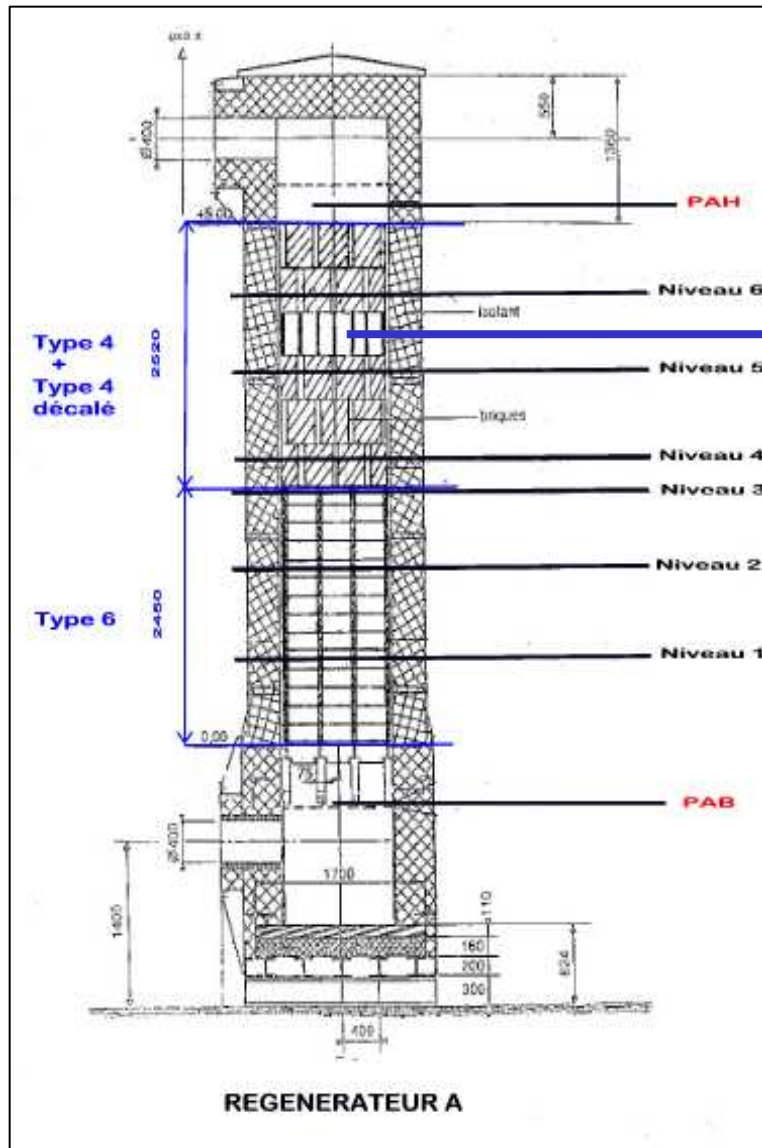
Collaboration:
Saint Gobain



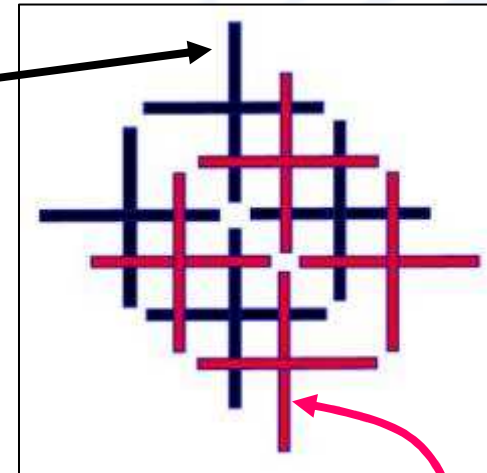
Le régénérateurs de fours verriers



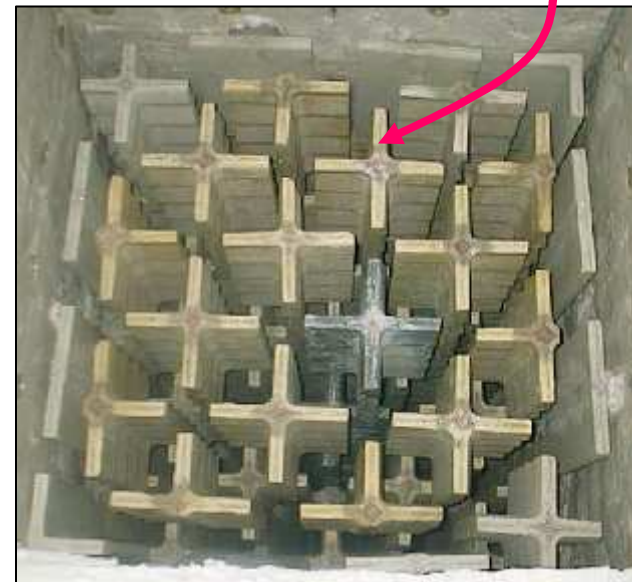
Fonctionnement **périodique** en deux phases: **fumées** et **air**.



Rang n



Rang n+1



Le Stockage massif d'électricité

Principe :

-en heures creuses (stockage):

Utiliser l'électricité pour transférer de la chaleur d'une enceinte froide vers une enceinte chaude (pompe à chaleur)

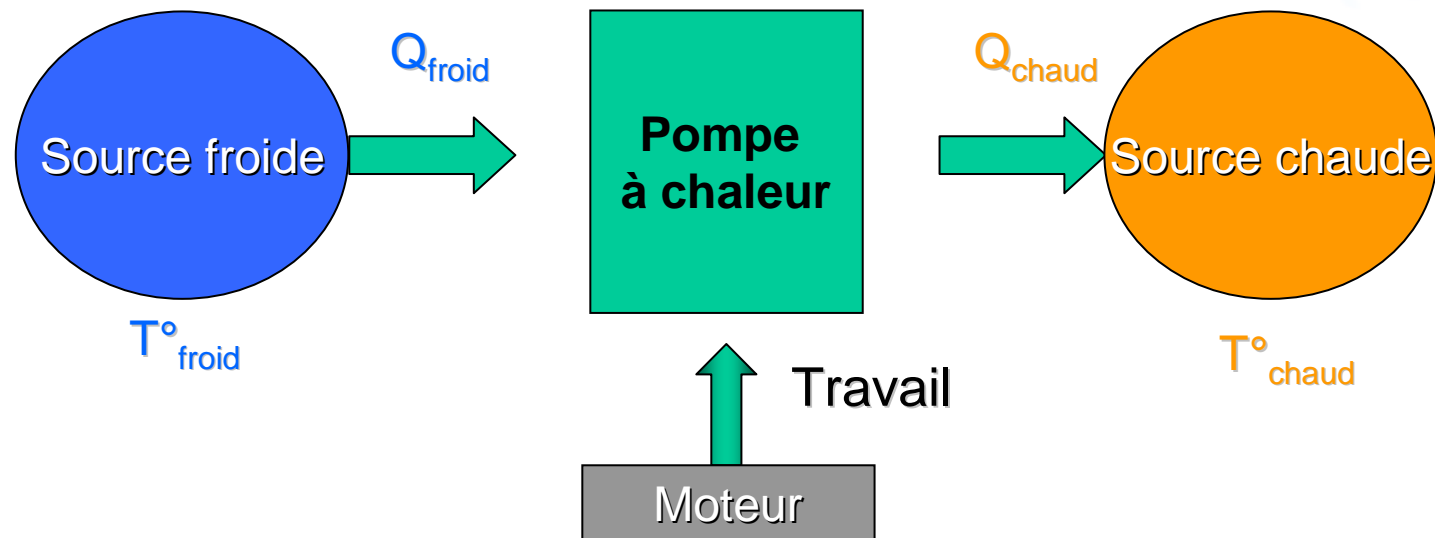
- en heures de pointe (déstockage) :

Récupérer cette énergie sous forme de travail pour la réinjecter sur le réseau élec.(moteur thermique)

Collaboration:

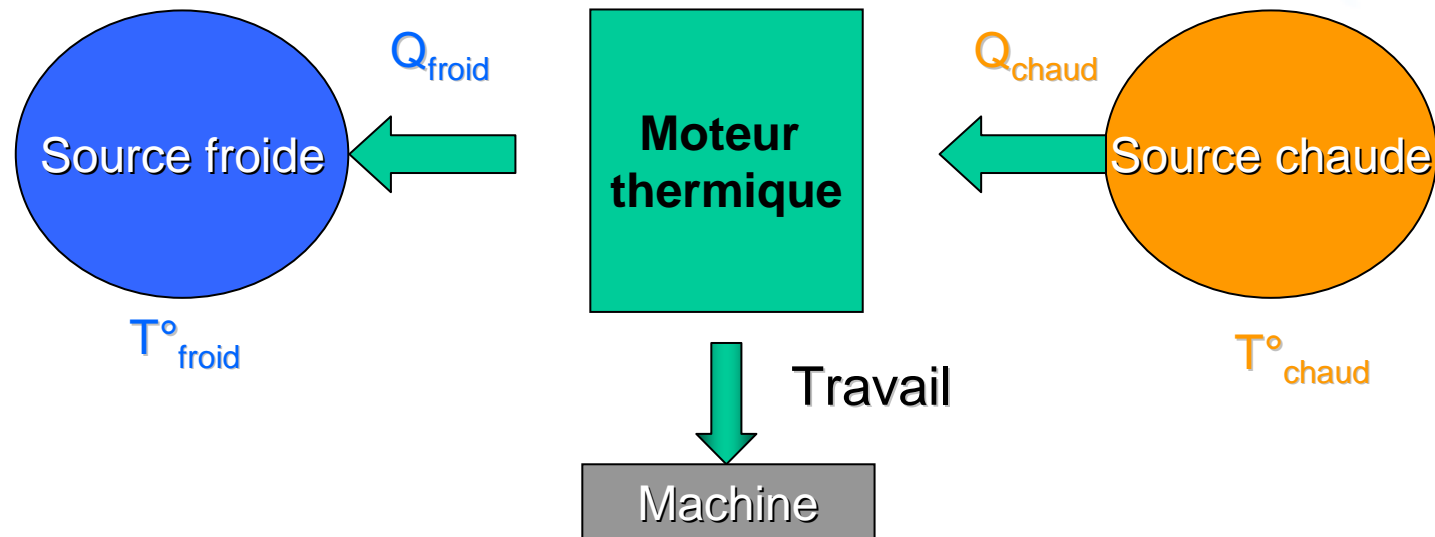
POWEO & SAIPEM / ANR SETHER

Pompe à chaleur (stockage)



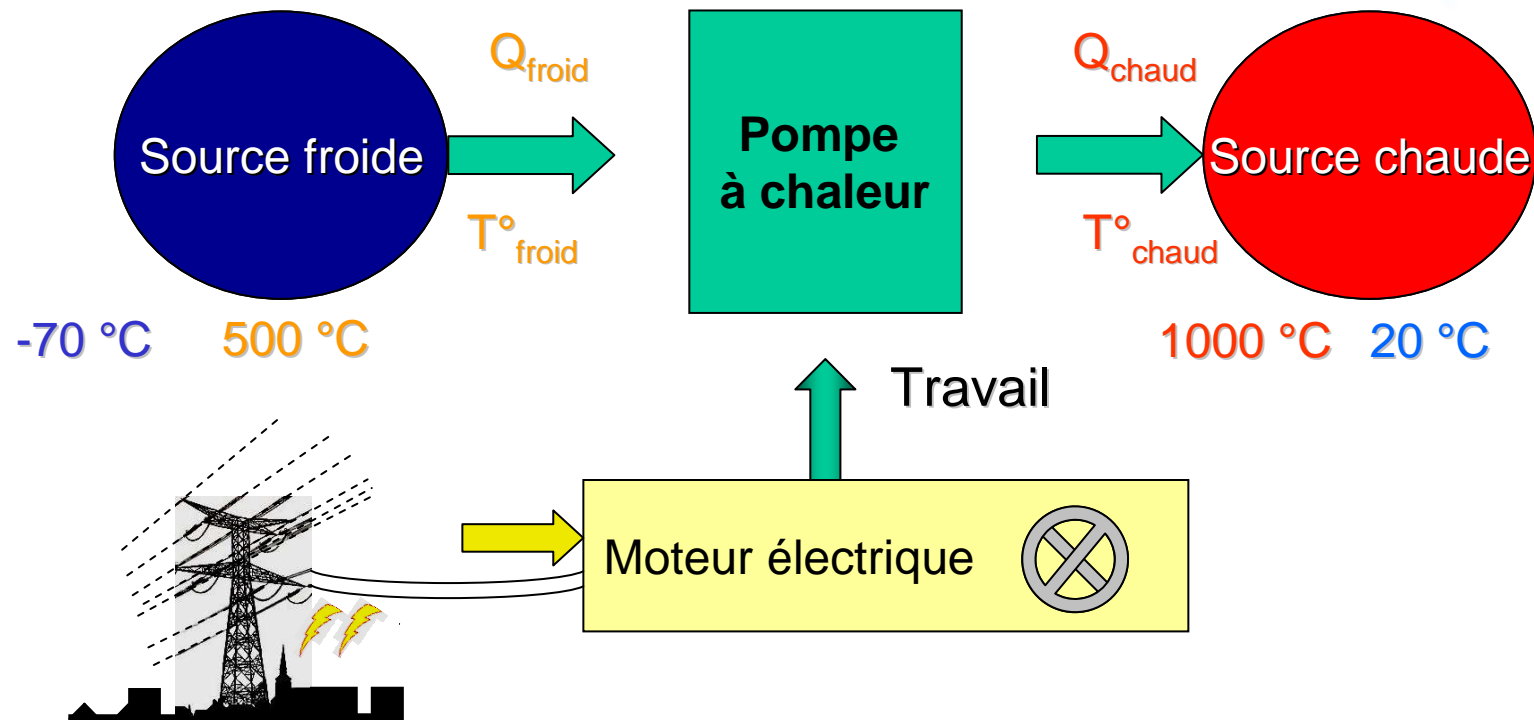
Rendement environ 300%

Moteur thermique (déstockage)

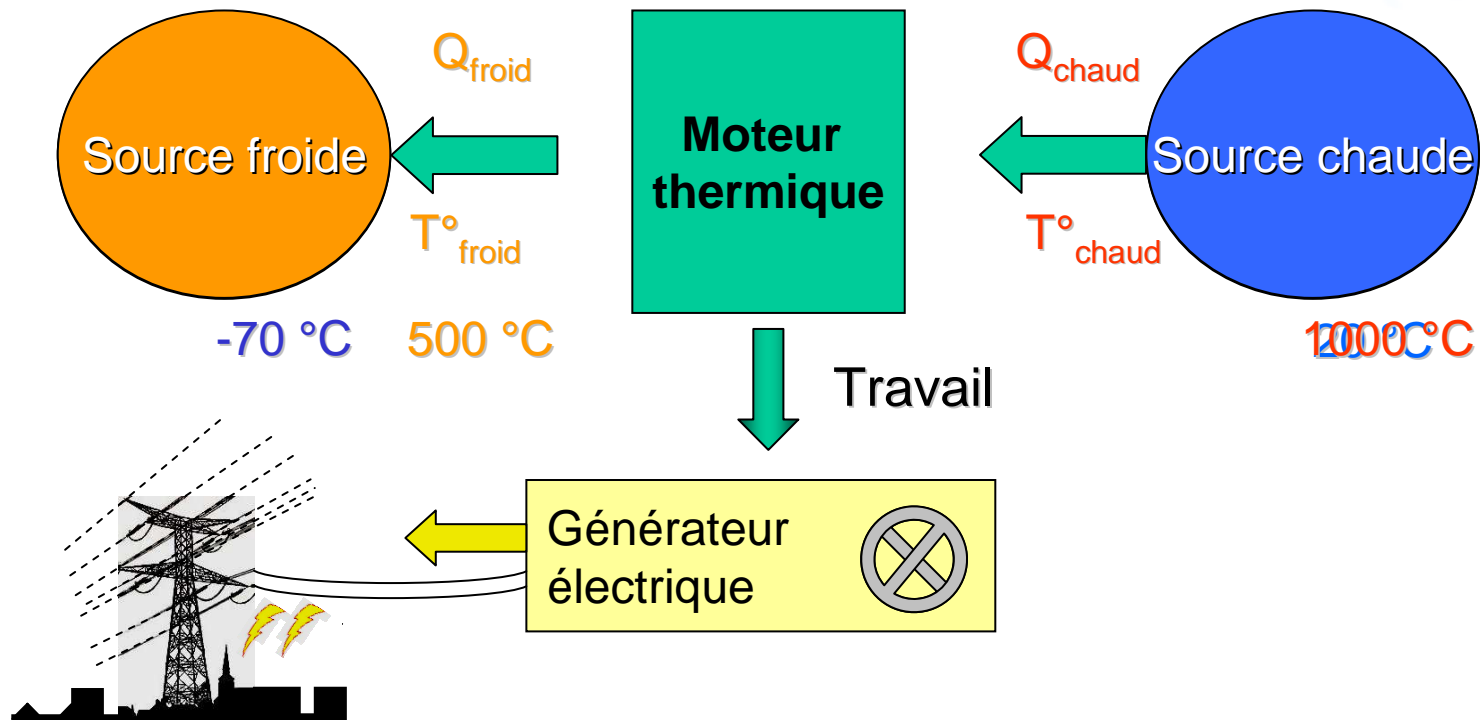


Rendement environ 25%

Phase de Stockage (pompe à chaleur)



Phase de Déstockage (moteur thermique)

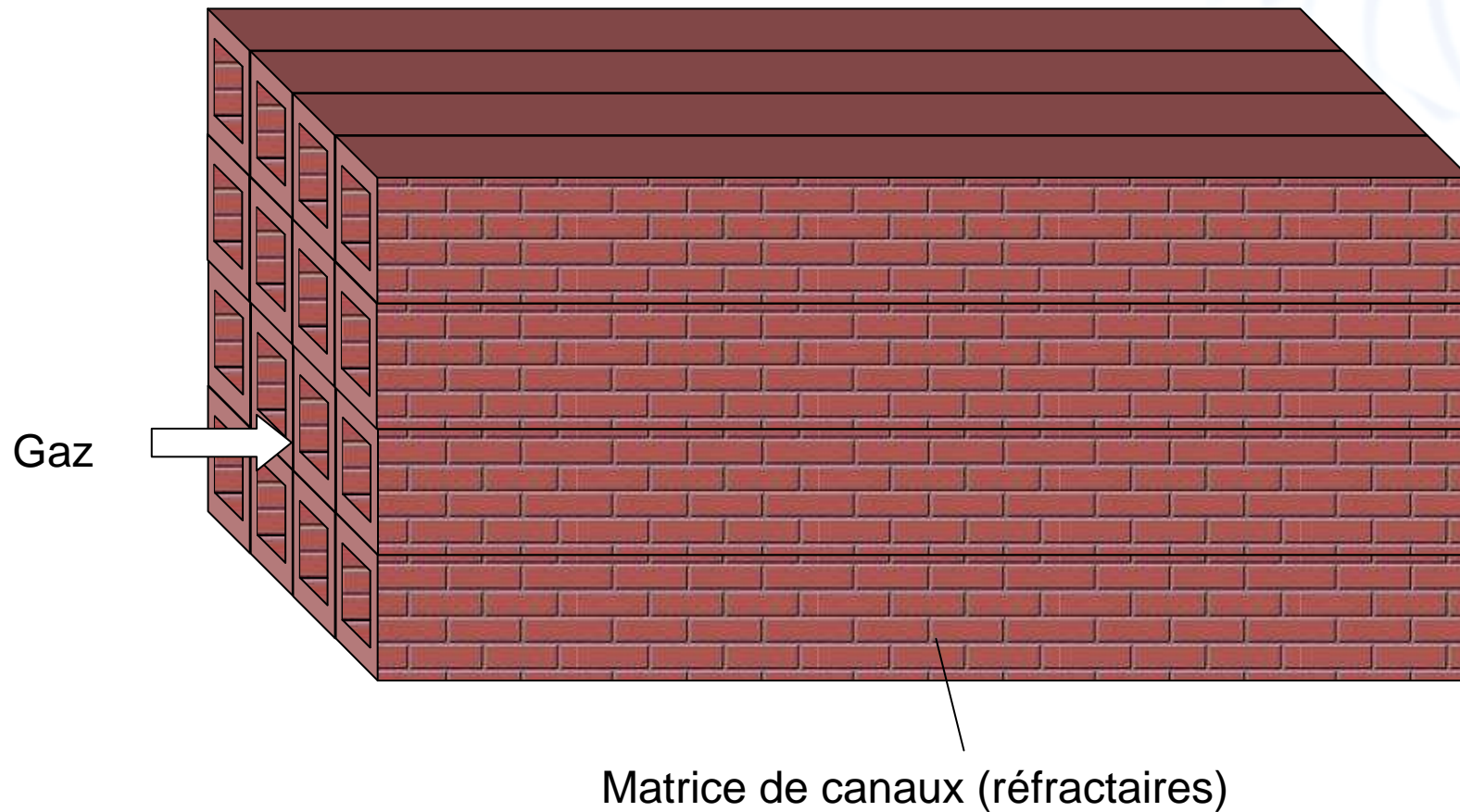


Rendement global

Stockage	Déstockage
PAC	Moteur thermique
COP = 300%	rendement = 25%
Rendement global	
70%	

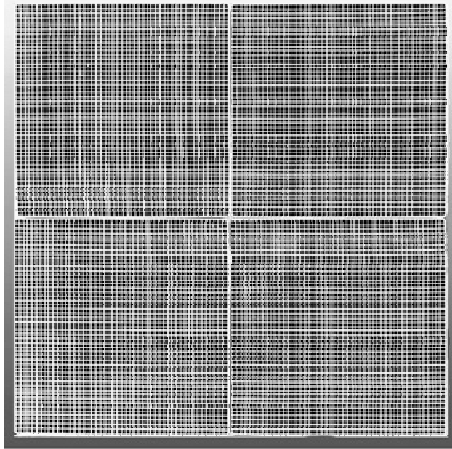
Quelles sont les sources chaude et froide ?
→ *des empilages réfractaires*

Les régénérateurs



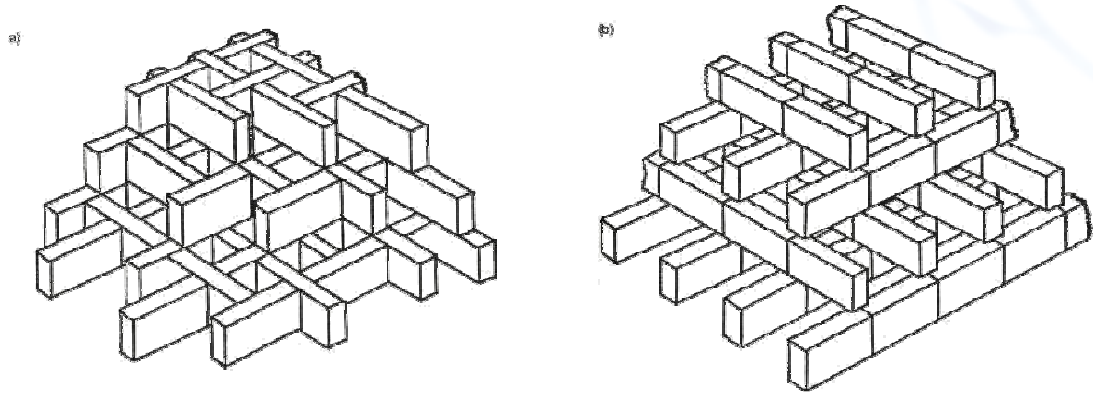
Exemples de matrices solides

Canaux

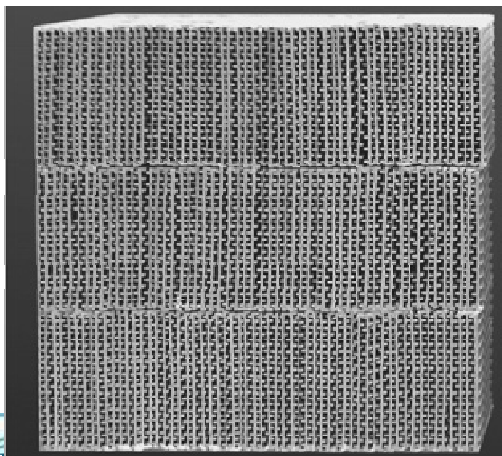


Panel A

Empilages



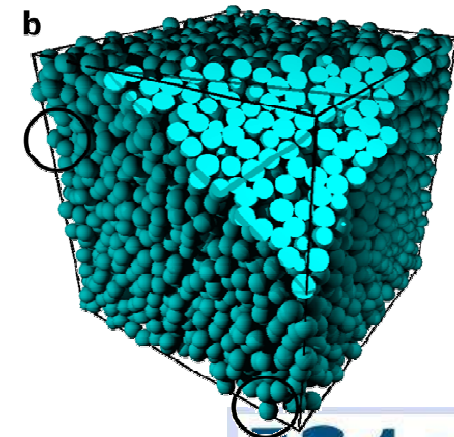
Briques



Panel B

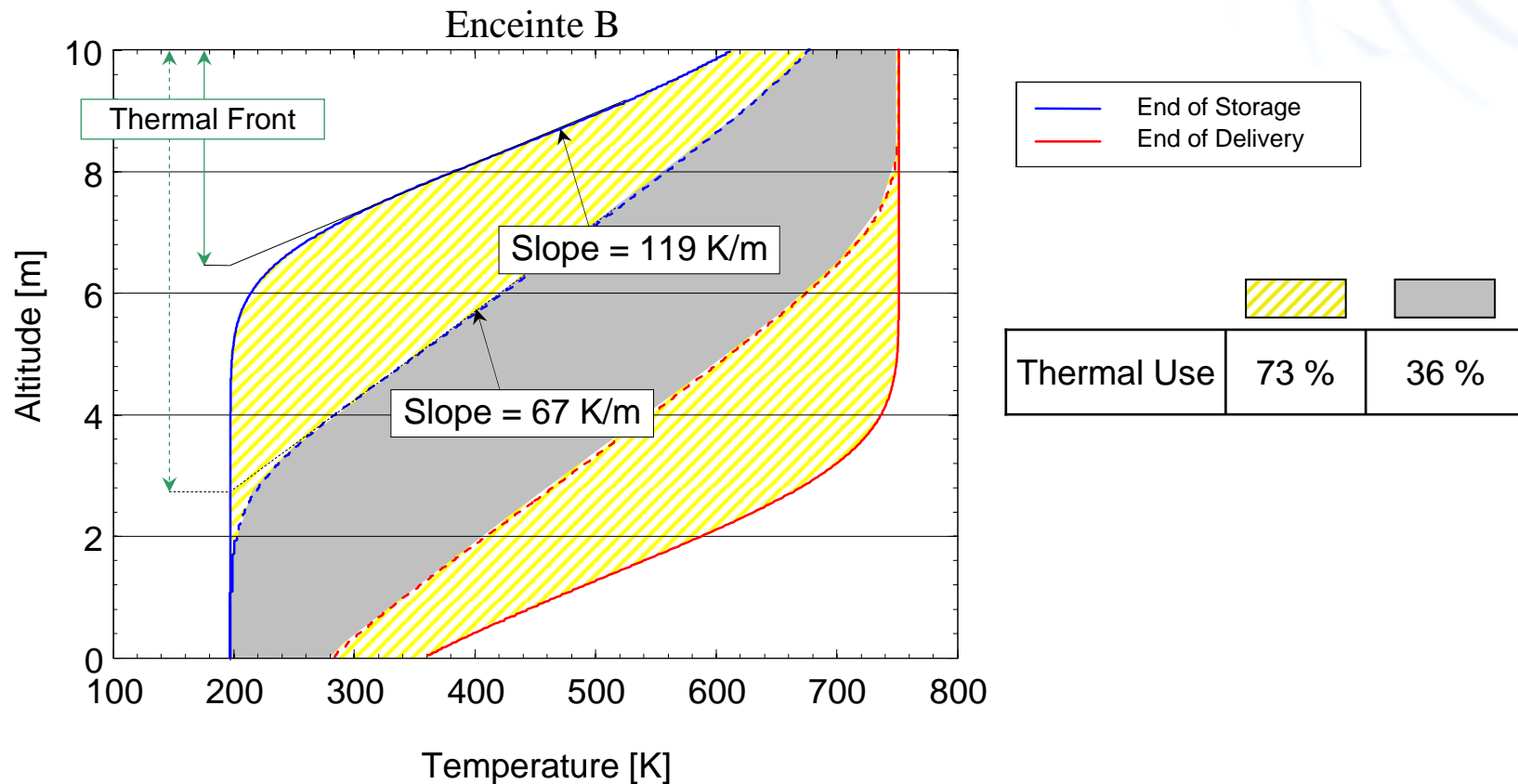


Graviers



Sphères

Allure des fronts thermiques dans les régénérateurs



Objectifs

- ◆ Grande capacité :
 - ◆ 600 MWh

- ◆ Puissance importante :
 - ◆ ~ 100 MW

- ◆ Viabilité économique :
 - ◆ Très bon rendement global (> 70 %)
 - ◆ Durée de vie importante (~20 ans)

Verroux technologiques

- ◆ **Turbomachines inhabituelles :**
 - ◆ Compresseur chaud
 - ◆ Turbine froide
 - ◆ Argon
 - ◆ Rapport de pression peu élevé

- ◆ **Régénérateurs :**
 - ◆ Echanges thermiques intenses
 - ◆ Faibles pertes de pression
 - ◆ Grande plage de température (-70°C, 1000°C)

Le stockage de l'hydrogène

Une solution pour stocker l'énergie de sources intermittentes (éolienne ou solaire par exemple)

Solution mature insatisfaisantes:

- Compression hyperbare délicate sur de gros volumes
- Stockage cryogénique : solution high-tech peu réaliste au niveau industriel

Stockage solide
sur hydrures de Mg



Hystory
(2006)



Nesshy
(2008)





Résistances
électriques

Tube refroidissant

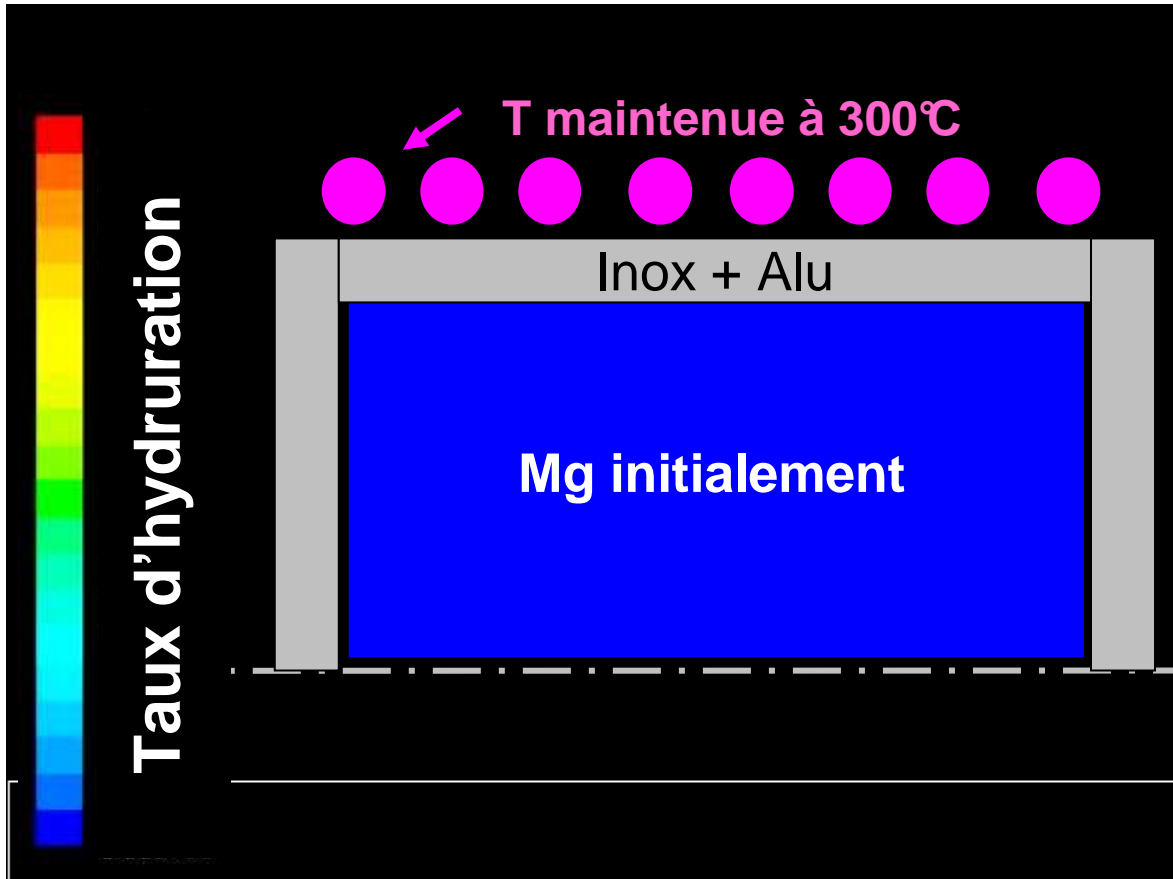
Ailette

Disques



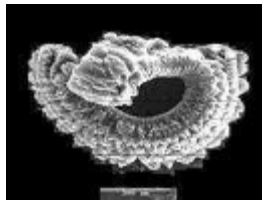
Réservoir à MgH_2

MgH_2

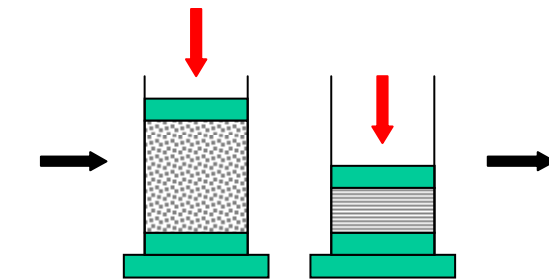


Mg

Amélioration de la conductivité thermique



Mélange MgH_2 +
Graphite Naturel
Expansé (GNE) 5 %m.



+

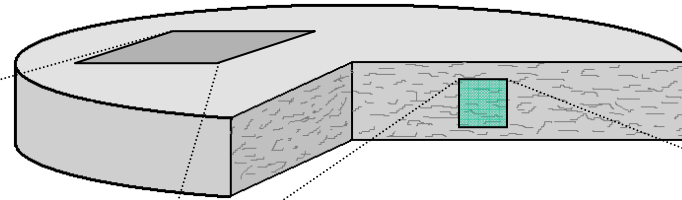
Compression
uniaxiale du
mélange (1 t/cm²)



Disques usinables
Faible réactivité à l'air

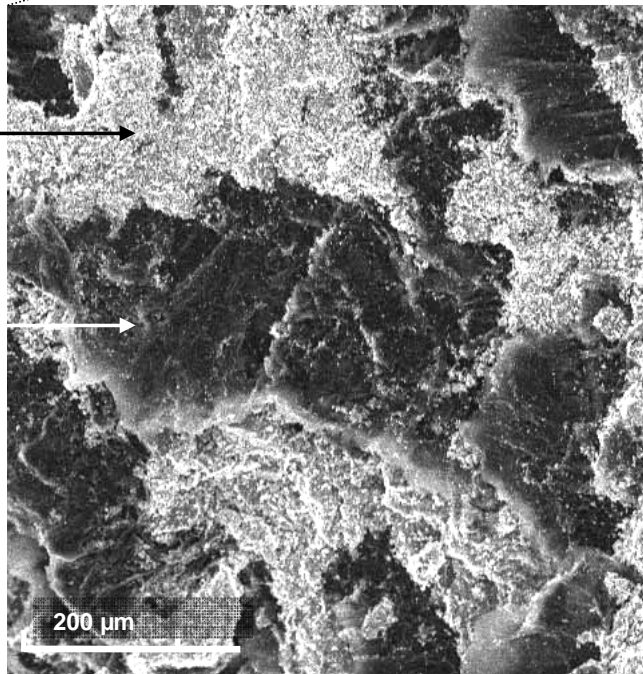
[Brevet F 0759689](#)

↓
Axe de
compression

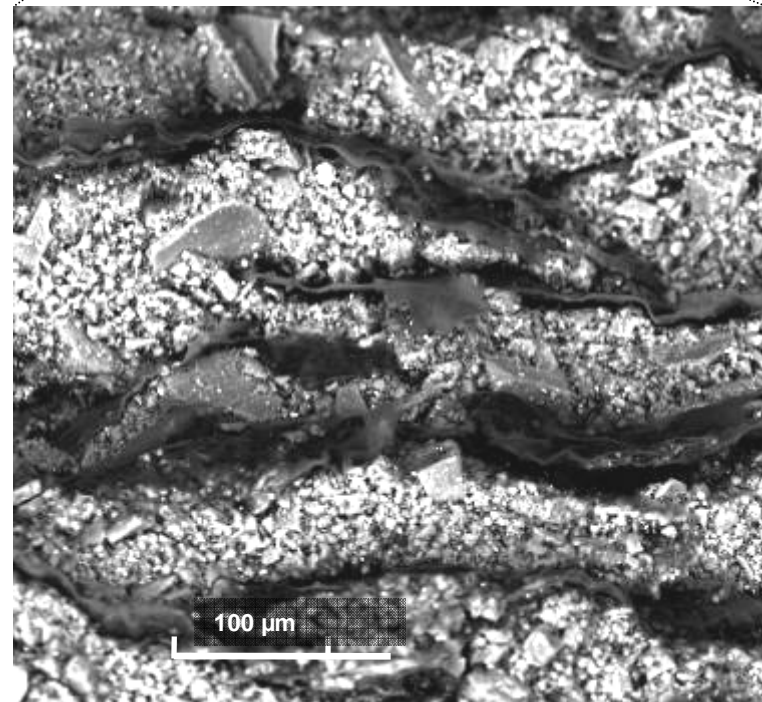


MgH₂

GNE

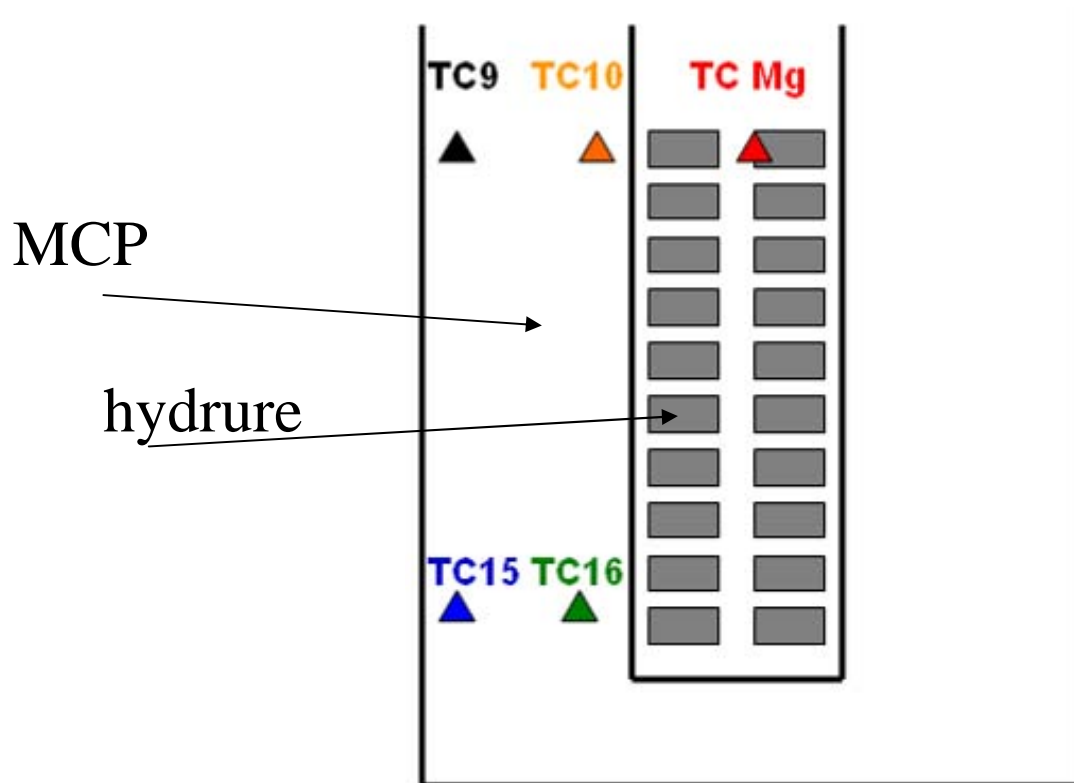


Dans le plan de compression

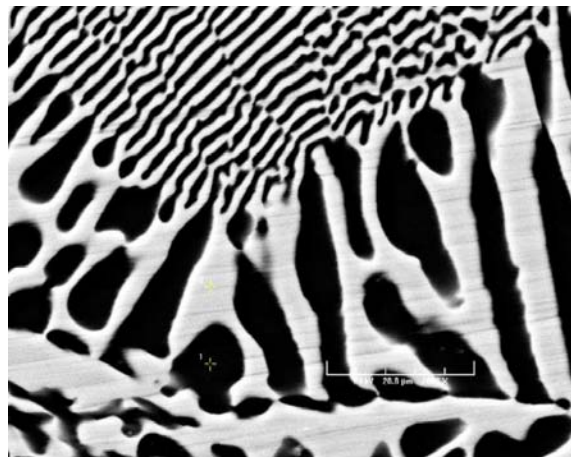
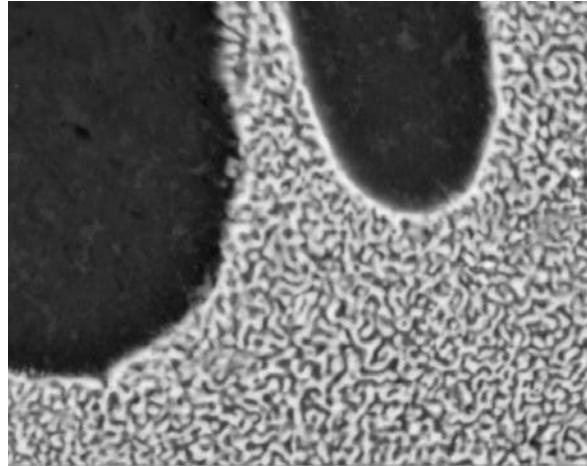


Dans l'axe de compression

récupération de l'énergie d'absorption dans un MCP



Nécessité d'identifier un MCP (cahier des charges contraignant)



Micrographies de MCP testés (et brevetés)

Réservoir de 10 kg d'hydrure de magnésium



Conclusion

- ◆ Les recherches sur les échangeurs sont souvent liées à une nouvelle application
- ◆ Beaucoup reste à faire sur les échanges diphasiques (assèchement, distribution,...)
- ◆ Montée « en puissance » des MCP
- ◆ ... et du stockage
- ◆ Développement rapide de la filière solaire