



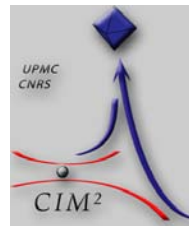
Colloque Energie  
Nantes, 16 - 18 Novembre 2009

PRO8-1.1-6

## "FROID MAGNETIQUE"

**Vincent Hardy (CRISMAT)**

**Bernard Chevalier (ICMCB), Cyrille Train (CIM2),  
Daniel Fruchart (Institut Néel) & Afef Lebouc (G2Elab)**



# Contexte de l'étude

## ■ Contexte de la production de froid

- 15 % de la consommation d'énergie électrique mondiale : climatisation bâtiments, véhicules, conservation (frigo, congèle), froid industriel ...
- Marché mondial de 39 Mds \$ (chiffre ADEME)

## ■ Enjeux environnementaux

- impact sur l'environnement (effet de serre)
- efficacité énergétique limitée

## → 2 voies possibles :

- Autre fluide frigorigène (ammoniaque, CO<sub>2</sub>...)
- Rupture technologique : thermoélectricité, thermoacoustique, réfrigération magnétique



# Plan de l'exposé

---

- ① EMC & réfrigération magnétique
- ② Objectifs du projet "Froid magnétique"
- ③ Principaux résultats à mi-parcours
- ④ Perspectives

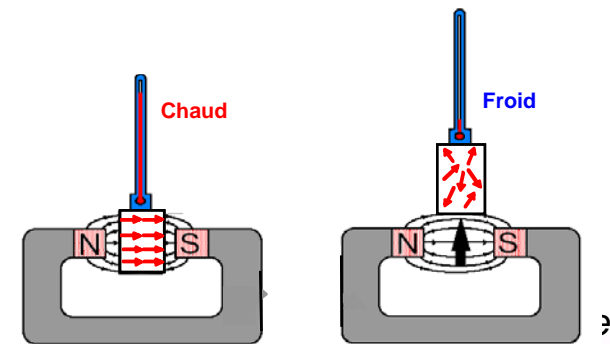
# ① EMC & réfrigération magnétique

## ■ historique

- découvert en 1881 par Warburg, expliqué en 1918 par Weiss & Piccard
- utilisé depuis les années 1930 pour atteindre  $\approx 0$  K
- technologies associées au monde de la cryogénie
- 1998 : 1<sup>er</sup> démonstrateur pour la réfrigération à  $T_{\text{ambiante}}$

## ■ propriété intrinsèque des matériaux magnétiques

aimantation  $\rightarrow$  échauffement  
désaimantation  $\rightarrow$  refroidissement



*Aimantation & désaimantation  
adiabatiques*

# ① EMC & réfrigération magnétique

## ■ couplage magnétothermique

$$S = S_{\text{magn.}} + S_{\text{réseau}} + \cancel{S_{\text{électron}}}$$

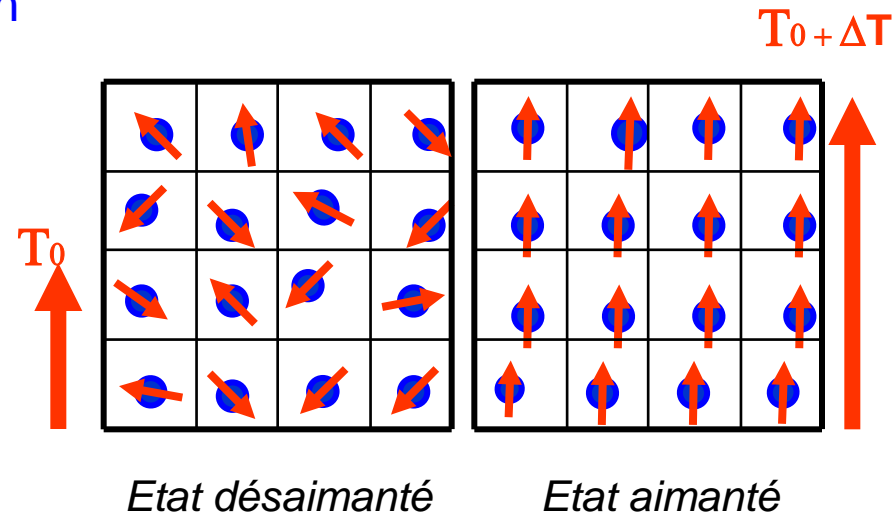
Processus adiabatique :  $\Delta S = 0$

- aimantation :

$$\Delta S_{\text{magn}} \searrow \Leftrightarrow \Delta S_{\text{réseau}} \nearrow \Leftrightarrow T \nearrow$$

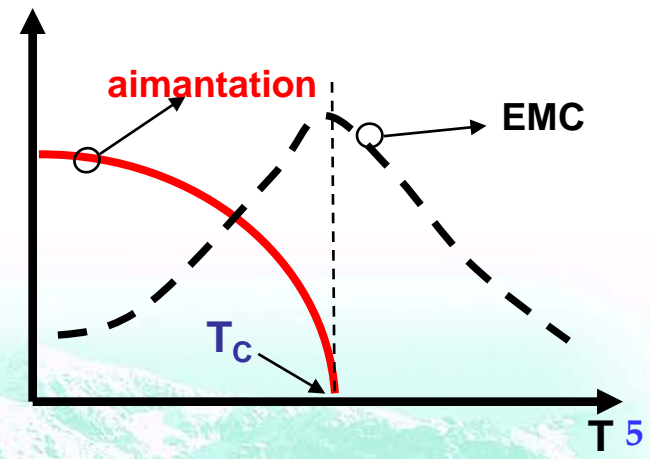
- désaimantation :

$$\Delta S_{\text{magn}} \nearrow \Leftrightarrow \Delta S_{\text{réseau}} \searrow \Leftrightarrow T \searrow$$



## ■ effet maximal autour de la température de transition

## ■ matériaux à EMC géant à $T_{\text{amb.}}$



# ① EMC & réfrigération magnétique

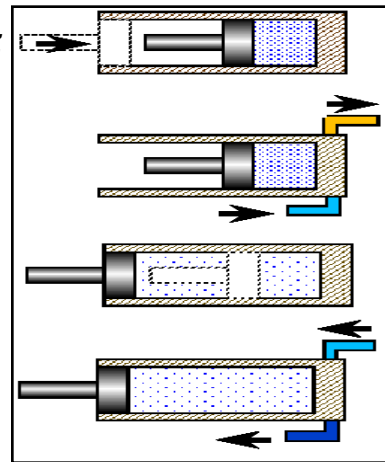
## ■ équivalence cycle magn. & cycle thermodyn.

*compression du gaz  
échauffement*

*échange avec la  
source chaude*

*détente du gaz  
refroidissement*

*échange avec la  
source froide*



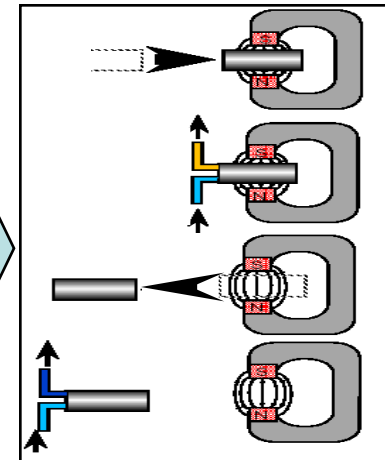
*Aimantation du  
mat.*

*échauffement*

*échange avec la  
source chaude*

*Désaimantation  
refroidissement*

*échange avec la  
source froide*



## ■ applications & avantages

- réfrigération, climatisation, refroidissement
- haut rendement :  $COP_{\text{magn.}} = 2 COP_{\text{thermodyn.}}$
- pas de gaz à effet de serre



## ② Objectifs du projet

- Recherche & caractérisation structurale de nouveaux matériaux à EMC géant :  
intermétalliques, oxydes & composés moléculaires
- Métrologie des grandeurs de base :  
détermination de  $\Delta S$  & EMC par des mesures magnétiques dans le cas des matériaux à transition de phase du 1<sup>er</sup> ordre
- Comportement global en fonctionnement “réfrigération” :  
étude du matériau dans un bloc réfrigérant et mise en œuvre du cycle AMRR “Active magnetic regenerative refrigeration cycle”

# ③ Résultats : matériaux

## ■ Critère de performance

- $T_c$  proche de  $T_{\text{ambiante}}$
- $\Delta S_m$  élevé, large plage de  $T$
- EMC ou  $\Delta T$  élevé

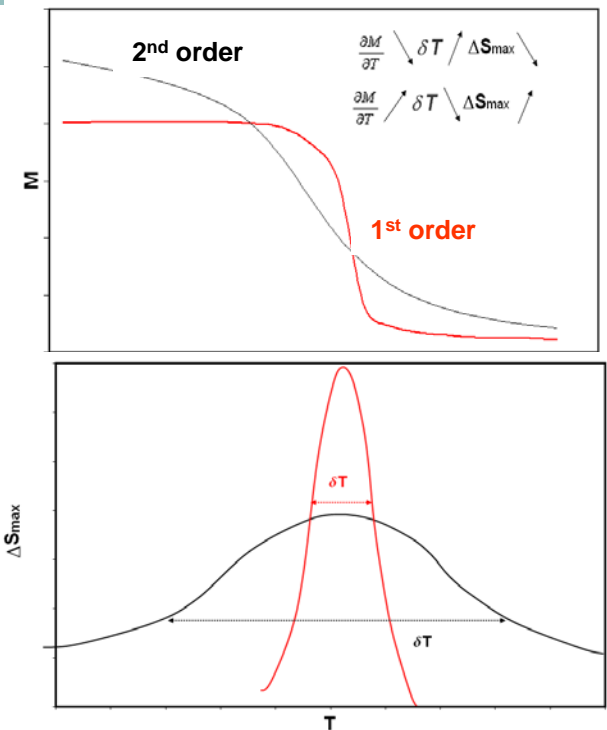
## ■ Matériau de référence : Gd

$$T_c = 294\text{K}, \Delta S_m = 2.5 \text{ J/kgKT}, \Delta T = 2.2 \text{ K/T}$$

## ■ Plusieurs pistes explorées :

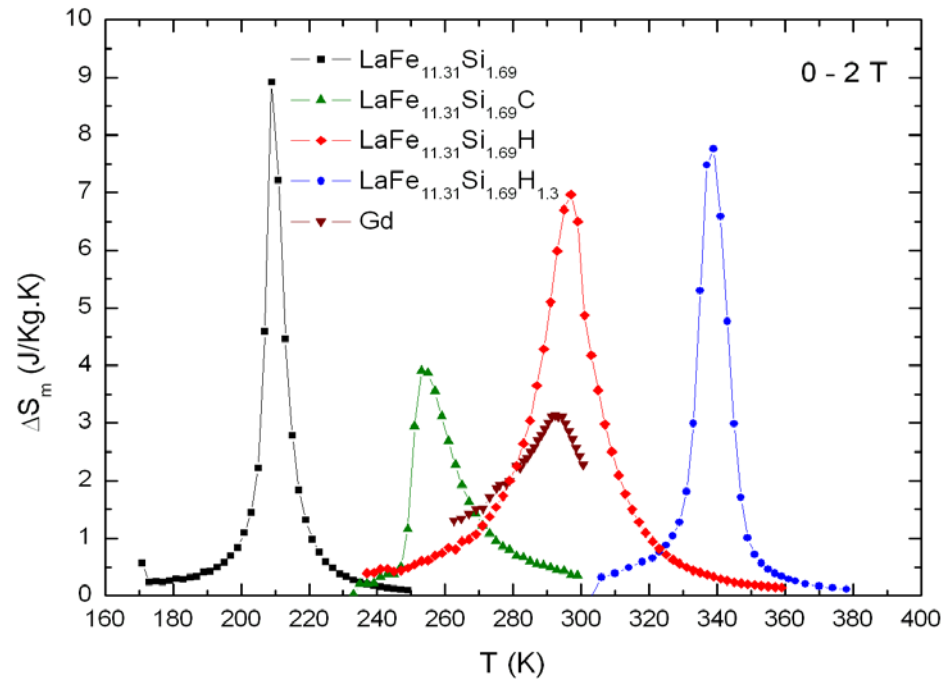
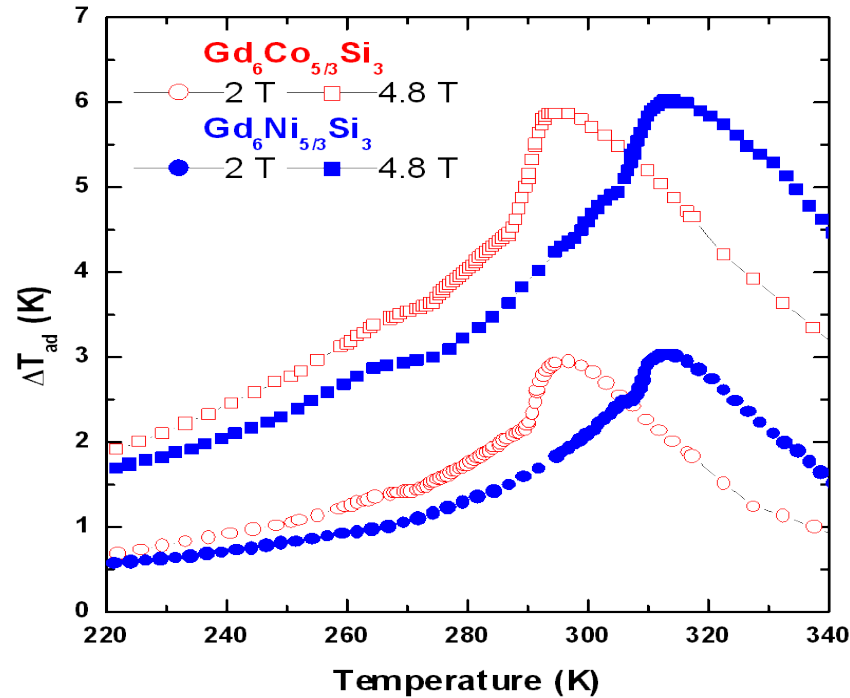
intermétalliques : GdCoSi, GdNiSi, LaFeSi, LaFeSiH, oxydes : EuO, PrCaCoO, EuSrMnO, Composés moléculaires : PBA, matériaux nanostructurés

→ étude fondamentale, étude de faisabilité, mise en évidence des problèmes de synthèse, ajustement de  $T_c$ ,...





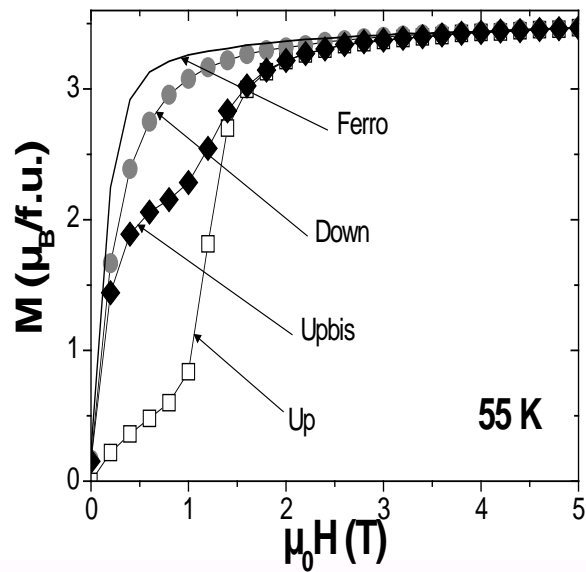
### ③ Résultats : matériaux



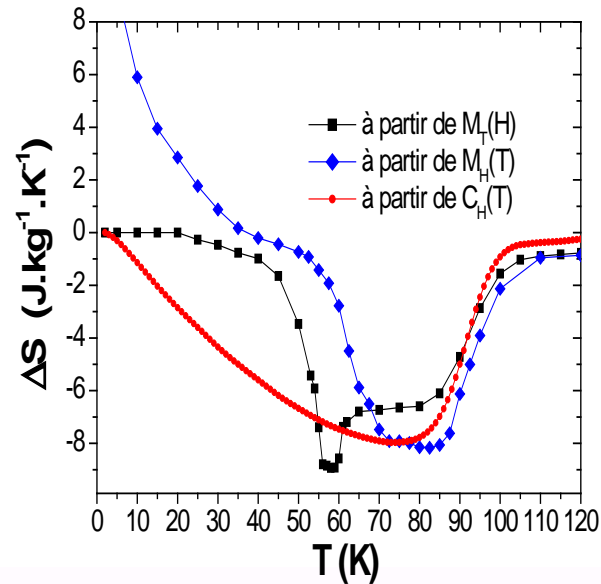
- composés ferromagnétiques comparables voire plus performants que le gadolinium
- température de Curie ajustable
- moins onéreux et moins oxydables que Gd

# ③ Résultats : métrologie magnétocalorique

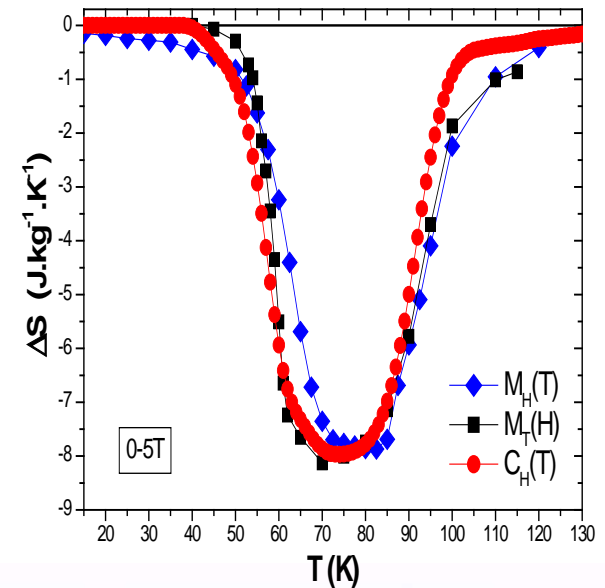
■ Nouvelle approche d'évaluation de  $\Delta S$  pour les matériaux du 1<sup>er</sup> ordre à partir des mesures indirectes, oxyde  $\text{Eu}_{0.58}\text{Sr}_{0.42}\text{MnO}_3$



Courbes  $M(H, T)$



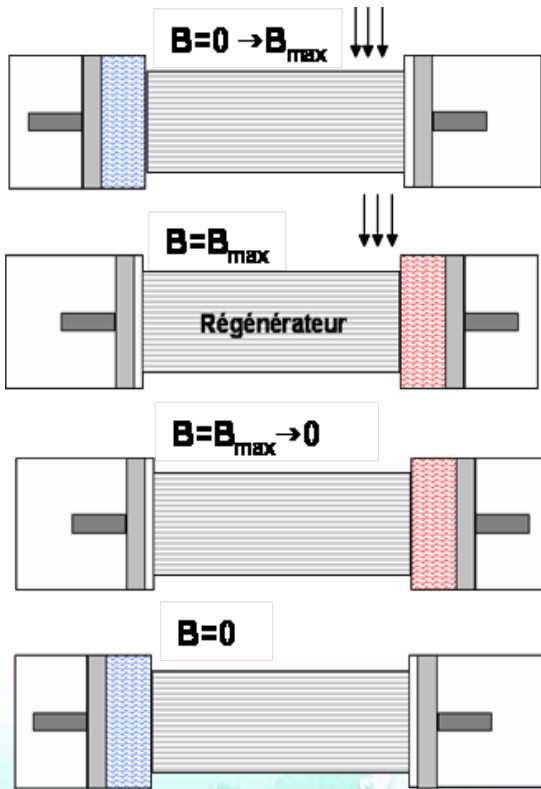
Méthodes standards



Nouvelle méthode

# ③ Résultats : bloc réfrigérant

■ **Cycle AMRR** : cycle spécifique permettant d'atteindre avec des matériaux à EMC modeste des écarts de températures élevés entre la source chaude et la source froide

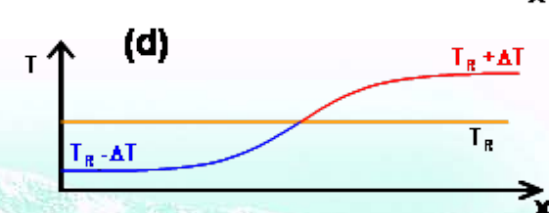
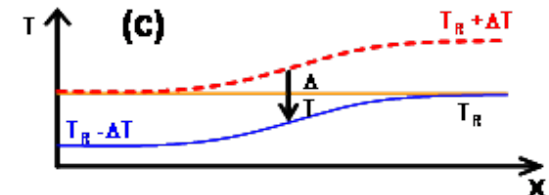
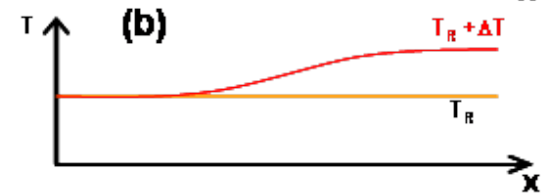
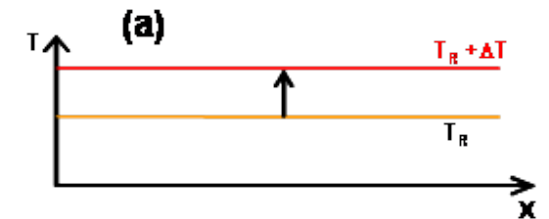


(a) **aimantation adiabatique :**  
échauffement du matériau de  $\Delta T_0$  (EMC)

(b) **circulation du fluide :**  
échange avec le matériau  
gradient de température

(c) **désaimantation adiabatique :**  
refroidissement du matériau de  $\Delta T_0$

(d) **circulation du fluide en sens inverse :**  
amplification du gradient



# ③ Résultats : bloc réfrigérant

## ■ Modélisation analytique

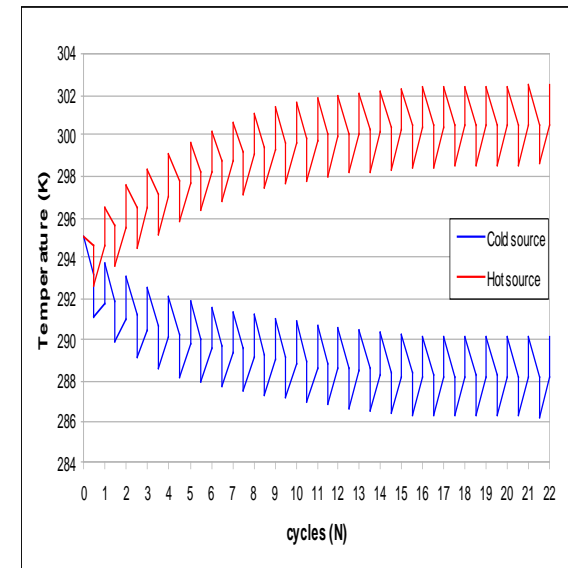
## ■ Modélisation numérique avec "FLUENT"

- régénérateur en plaques
- outil spécifique mettant en œuvre des fonctions utilisateurs pour gérer les différentes étapes du cycle

→ bonne représentation du comportement & de l'établissement du gradient

→ des informations sur le coefficient d'échange, profil de vitesse, ...

→ modèle de référence pour tester & valider les modèles analytiques en cours d'étude

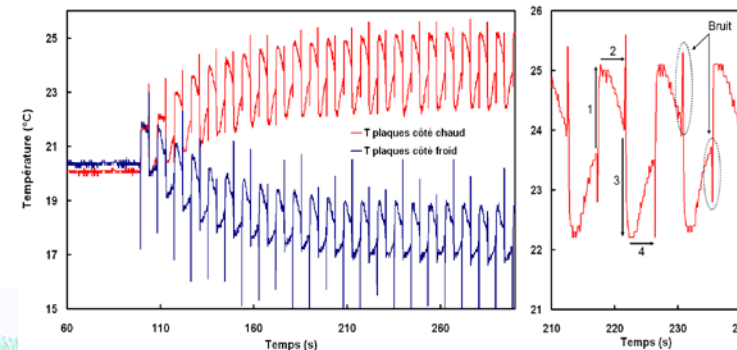
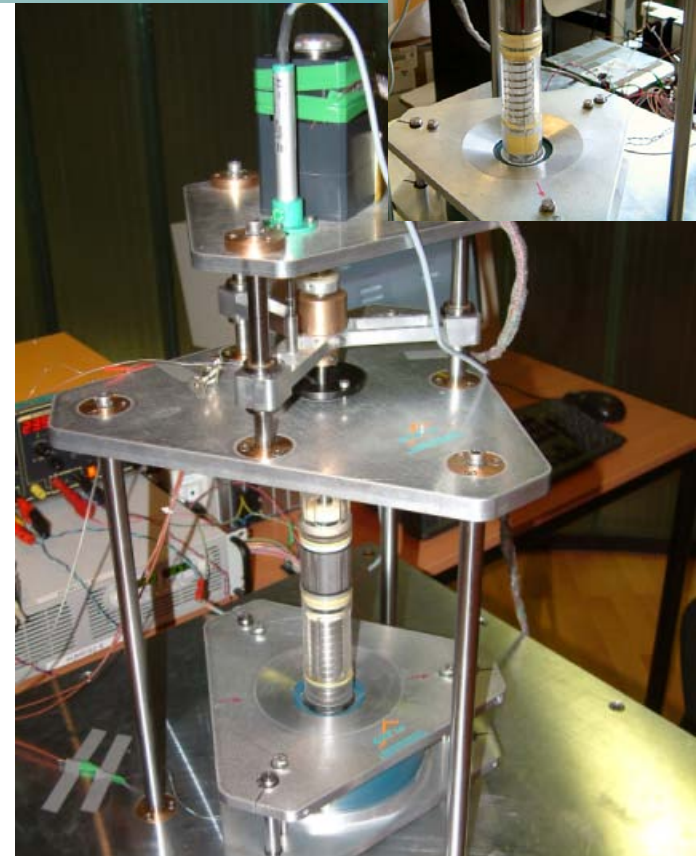


## ③ Résultats : bloc réfrigérant

### ■ Dispositif de tests du matériau dans un bloc réfrigérant

- structure basée sur le premier démonstrateur
- robustesse & répétabilité améliorées
- plage de réglage élargie
- ➔  $\Delta T \# 7 \text{ °C}$  pour un EMC =  $1.5 \text{ °C}$

➔ analyser le cycle & optimiser ses paramètres, valider les modèles, tester & évaluer différents blocs réfrigérants : matériau & forme



## ④ Perspectives

- Poursuite les travaux actuels sur les matériaux à EMC géant
- Caractérisation par méthode calorimétrique directe & comparaison avec la méthode indirecte
- Test de quelques matériaux dans le démonstrateur PrSrMnO , GdNiSi, FeSiLaH
  - élaboration d'une quantité suffisante : 100 à 200 g
  - mise en œuvre & réalisation du bloc réfrigérant
- Modélisation analytique & numérique, comparaison avec l'expérience



Colloque Energie  
Nantes, 16 - 18 Novembre 2009

*Merci de votre attention!*

