



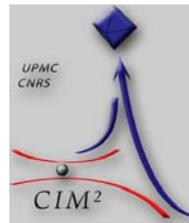
Colloque Energie
Nantes, 16 - 18 Novembre 2009

PR08-1.1-6

"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

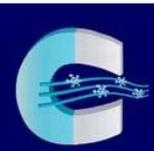
- 15 % de la consommation d'énergie électrique mondiale : climatisation bâtiments, véhicules, conservation (frigo, congèle), froid industriel ...
- Marché mondial de 39 Mds \$ (chiffre ADEME)

■ Enjeux environnementaux

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

→ 2 voies possibles :

- Autre fluide frigorigène (ammoniaque, CO₂...)
- 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

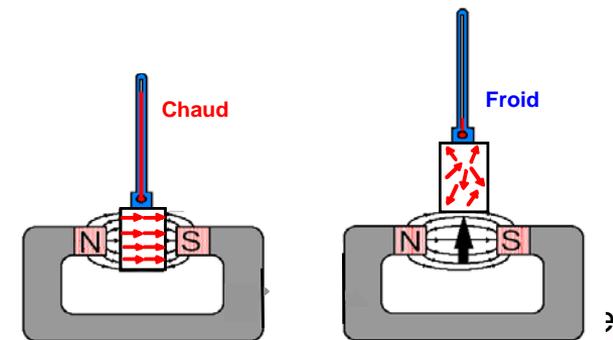
① EMC & réfrigération magnétique

■ historique

- découvert en 1881 par Warburg, expliqué en 1918 par Weiss & Piccard
- utilisé depuis les années 1930 pour atteindre ≈ 0 K
- technologies associées au monde de la cryogénie
- 1998 : 1^{er} démonstrateur pour la réfrigération à T_{ambiante}

■ propriété intrinsèque des matériaux magnétiques

aimantation \rightarrow échauffement
désaimantation \rightarrow refroidissement



Aimantation & désaimantation adiabatiques

① EMC & réfrigération magnétique

■ couplage magnétothermique

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

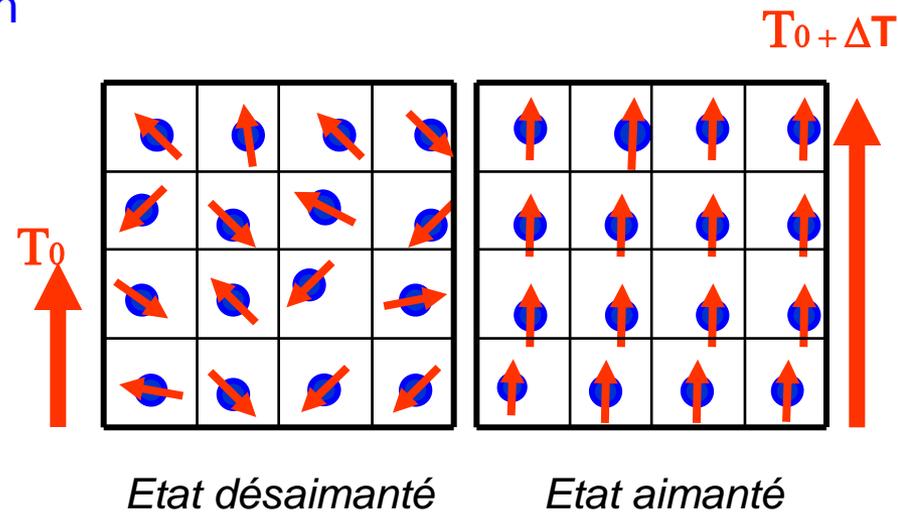
Processus adiabatique : $\Delta S = 0$

- aimantation :

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

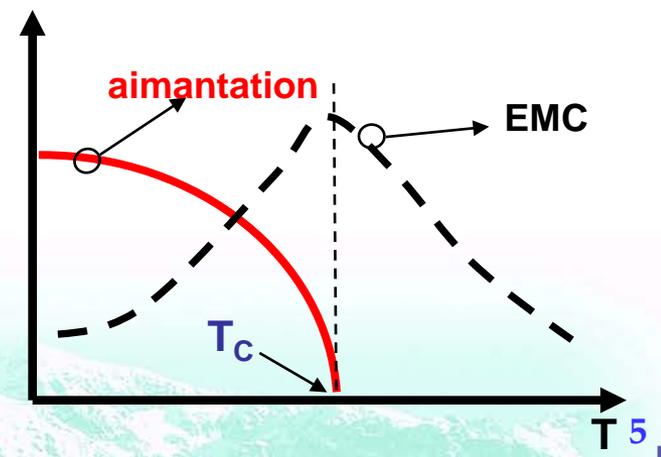
- désaimantation :

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



■ effet maximal autour de la température de transition

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



① EMC & réfrigération magnétique

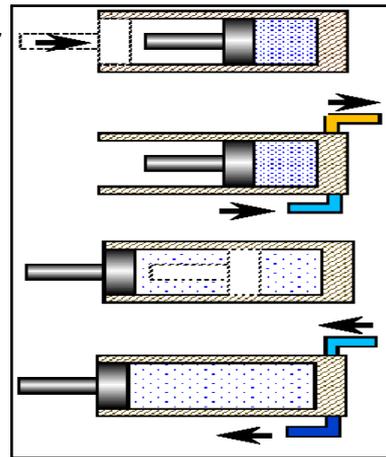
■ équivalence cycle magn. & cycle thermodyn.

*compression du gaz
échauffement*

*échange avec la
source chaude*

*détente du gaz
refroidissement*

*échange avec la
source froide*



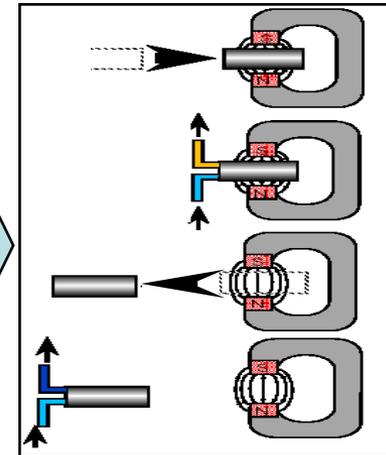
*Aimantation du
mat.*

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 ΔS & EMC par des mesures magnétiques dans le cas des matériaux à transition de phase du 1^{er} 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_{ambiante}
- ΔS_m élevé, large plage de T
- EMC ou ΔT élevé

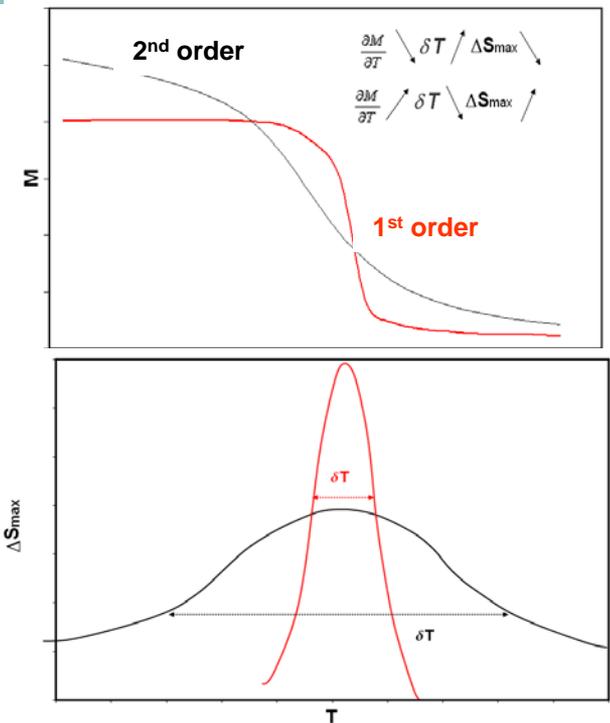
■ Matériau de référence : Gd

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

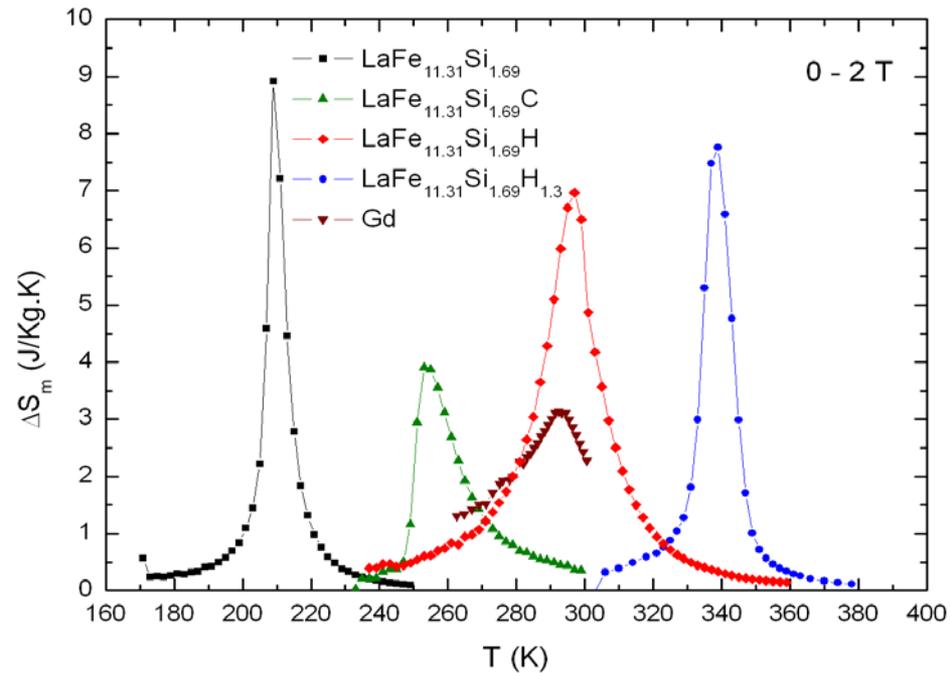
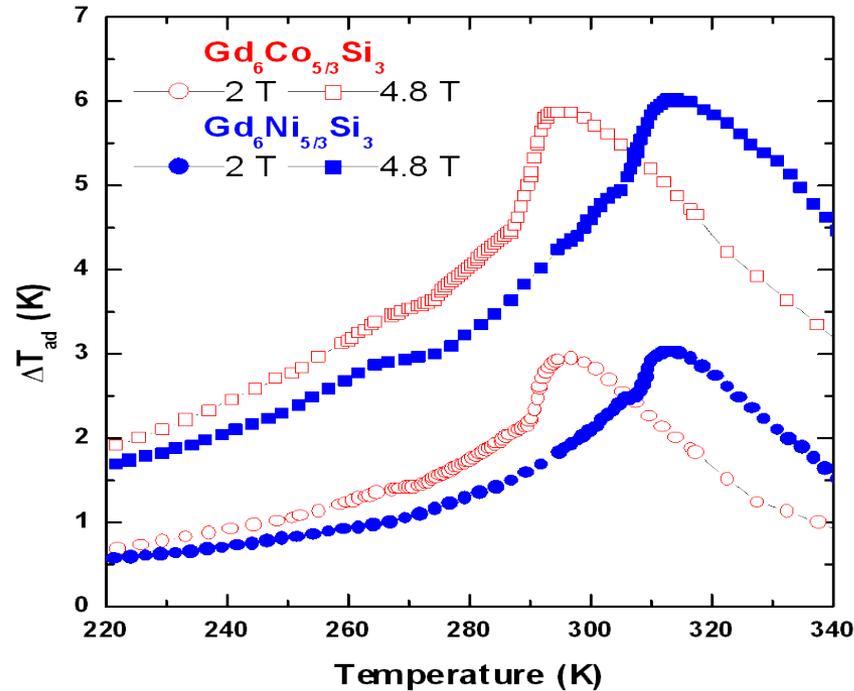
■ Plusieurs pistes explorées :

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 ,...



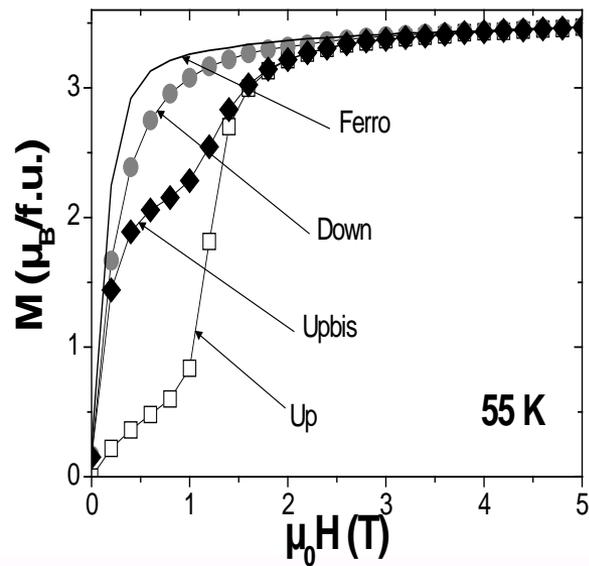
③ Résultats : matériaux



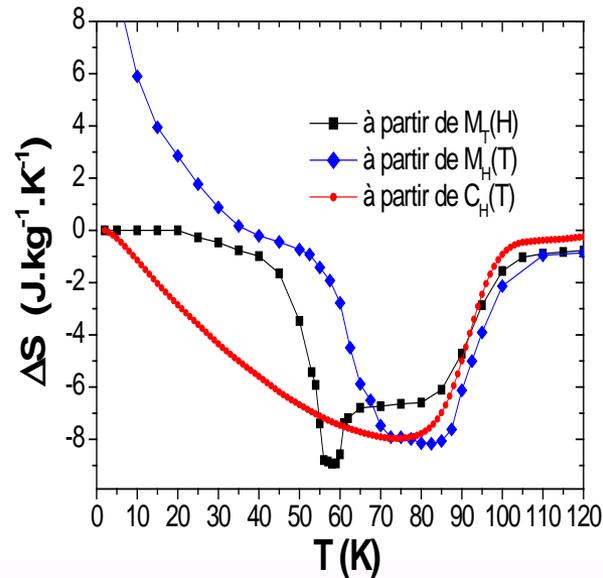
- composés ferromagnétiques comparables voire plus performants que le gadolinium
- température de Curie ajustable
- moins onéreux et moins oxydables que Gd

③ Résultats : métrologie magnétocalorique

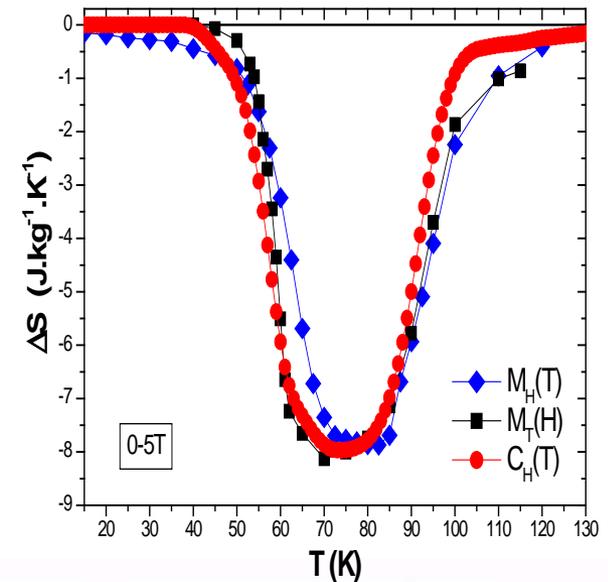
■ Nouvelle approche d'évaluation de ΔS pour les matériaux du 1^{er} ordre à partir des mesures indirectes, oxyde $\text{Eu}_{0.58}\text{Sr}_{0.42}\text{MnO}_3$



Courbes $M(H, T)$



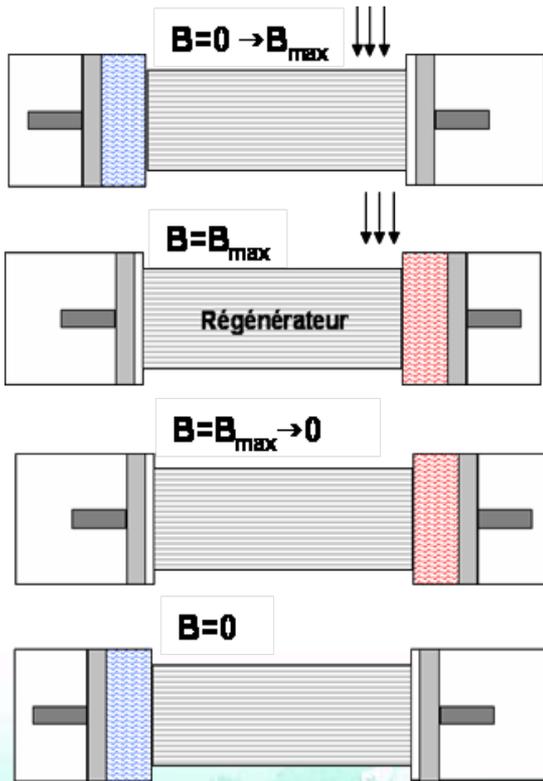
Méthodes standards



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

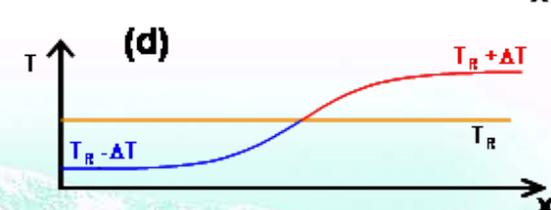
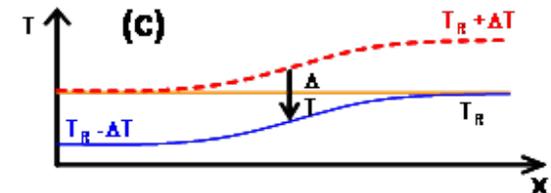
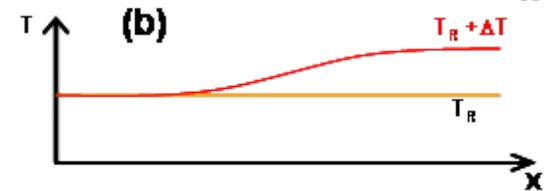
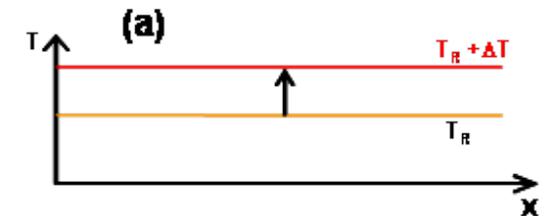


(a) **aimantation adiabatique :**
échauffement du matériau de ΔT_0 (EMC)

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

(c) **désaimantation adiabatique :**
refroidissement du matériau de ΔT_0

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



③ Résultats : bloc réfrigérant

■ Modélisation analytique

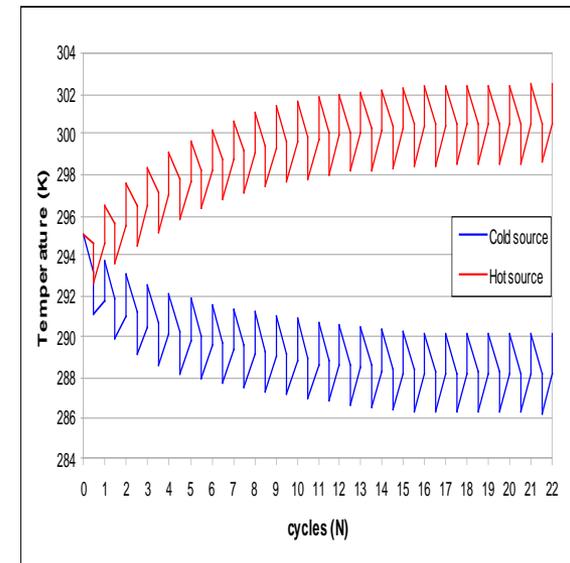
■ Modélisation numérique avec "FLUENT"

- 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

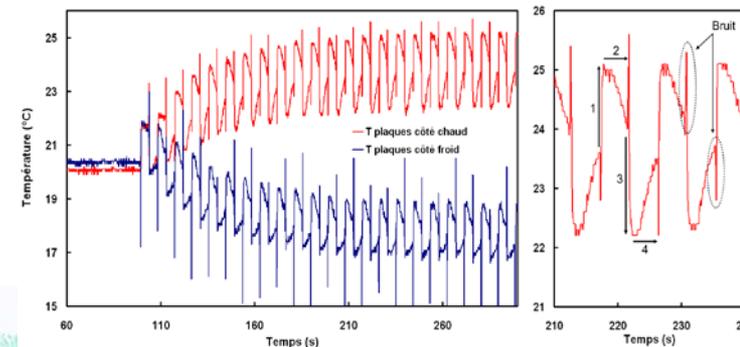
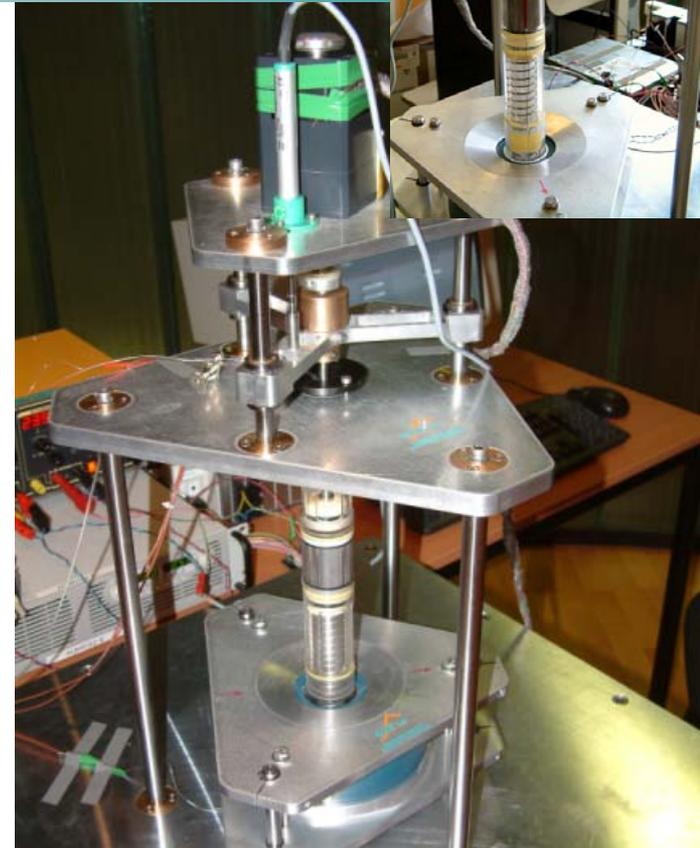


③ Résultats : bloc réfrigérant

■ Dispositif de tests du matériau dans un bloc réfrigérant

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

➔ 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!

