

Approche multi-physique et multi-échelle d'un régénérateur magnéto-thermique actif

Sergiu LIONTE*, Carmen VASILE, Monica SIROUX

Institut National des Sciences Appliquées (INSA), Strasbourg, 24 Boulevard de la Victoire, 67084, Strasbourg, France

* (auteur correspondant : sergiu.lionte@insa-strasbourg.fr)

Résumé - L'objet de notre étude est la compréhension du comportement d'un régénérateur magnétique actif (AMR) afin d'optimiser le fonctionnement d'un système de réfrigération magnétique. La modélisation du fonctionnement du modèle numérique de l'AMR est basée sur une approche multi-physique (magnétisme, transfert de chaleur et fluide) et multi-échelle. Une modélisation numérique des transferts thermiques au sein de l'AMR a été mise en place permettant ainsi d'étudier le comportement du cycle d'AMR en régime permanent et transitoire.

Nomenclature

RM	Réfrigération magnétique	S	Entropie, $J \cdot K^{-1}$
AMR	Régénérateur magnétique actif	T	Température, K ou $^{\circ}C$
EMC	Effet magnétocalorique	t	Temps, s
MMC	Matériaux magnétocaloriques	Q	Quantité de chaleur, enthalpie, J
CHEX	Echangeur de chaleur froid	L	Longueur, m
HHEX	Echangeur de chaleur chaud	l	Largeur, m

Indices et exposants

ad	adiabatique	e_s	Epaisseur partie solide, m
s	solide	e_f	Epaisseur partie fluide, m
f	fluide	H	Champ magnétique, T
mag	magnétisation	u	Vitesse moyenne du fluide, $m \cdot s^{-1}$
demag	démagnétisation	p	Pression, Pa
M	magnétique	c_p	Chaleur spécifique, $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
R	réseau		
E	électronique		

Symboles grecs

λ	Conductivité thermique, $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
μ	Viscosité dynamique, $Pa \cdot s$
ρ	Masse volumique, $kg \cdot m^{-3}$
Δ	Différence, variation

1. Introduction

L'appauvrissement de la couche d'ozone continue malgré toutes les mesures prises pour protéger l'environnement et l'atmosphère convenues dans la Convention de Vienne (1985), le Protocole de Montréal (1987) et dans le protocole de Kyoto (1997). Les CFCs et les HCFCs ont été interdits en raison de leur contribution à la destruction de la couche d'ozone stratosphérique. Leurs remplaçants, les HFCs ont un grand potentiel de réchauffement global et donc une contribution directe non négligeable au réchauffement climatique dans le cas de fuites inévitables dans l'atmosphère.

Pour remplacer la technologie de compression de gaz, les scientifiques ont commencé ces dernières années à explorer de nouvelles technologies pour le refroidissement comme le

refroidissement par absorption, par adsorption, le refroidissement thermo-électrique, le refroidissement thermo-acoustique et la réfrigération magnétique.

2. La théorie de la réfrigération magnétique

La réfrigération magnétique (RM) a été utilisée depuis des décennies pour obtenir des températures très basses (< 4 K) mais les développements récents en science des matériaux ont fait de la RM un candidat pour la réfrigération autour de la température ambiante [1]. C'est une technologie émergente qui exploite l'effet magnétocalorique (EMC). L'EMC est un effet intrinsèque aux matériaux magnétiques qui se traduit par une variation instantanée et réversible de leur température ou d'entropie sous l'effet d'une variation de champ magnétique. Quelques matériaux magnétiques, qui présentent un beaucoup plus grand EMC, s'appellent matériaux magnétocaloriques (MMC).

L'EMC représente la réponse thermique d'un matériau lorsqu'il est placé dans un champ magnétique. Il peut être quantifié comme le changement réversible de la température du matériau (ΔT_{ad}) sous l'influence d'un champ magnétique variable dans un processus adiabatique, ou le changement réversible de l'entropie magnétique (ΔS_m) dans un processus isotherme. La relation entre les deux propriétés est illustrée dans la figure 1.

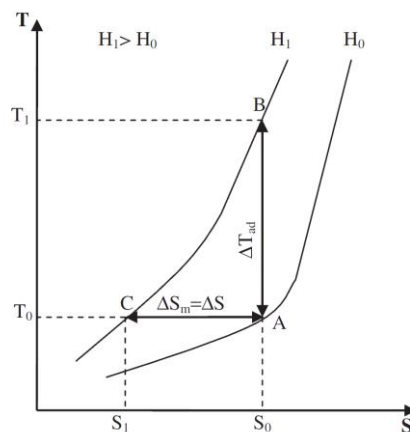


Figure 1 : Variation de la température et de l'entropie d'un matériau en fonction du champ magnétique appliqué, figure adaptée de [2].

L'application d'un champ magnétique peut provoquer un changement adiabatique de température dans le système ($\Delta T_{ad} = T_1 - T_0$) ou à un changement isotherme d'entropie magnétique ($\Delta S_m = S_1 - S_0$). La première se produit lorsque l'entropie est maintenue constante, tant que la seconde s'est produite lorsque la température est maintenue constante. Les deux ΔT_{ad} et ΔS_m sont des valeurs caractéristiques de l'effet magnétocalorique, en fonction de la température initiale T_0 et de la valeur de variation du champ magnétique.

3. Le régénérateur magnétique actif: l'approche multi-échelle de la RM

Un régénérateur est un lit poreux de matériaux magnétocaloriques, qui est utilisé pour le transfert de chaleur vers et à partir d'un fluide en mouvement, dans un processus cyclique, afin d'obtenir des différences plus importantes de température entre l'échangeur de chaleur froid (CHEX) et l'échangeur de chaleur chaud (HHEX). Le régénérateur magnétique actif

(AMR) est un dispositif qui combine plusieurs phénomènes physiques, chacun à une échelle différente.

3.1. Approche micro-échelle

L'approche micro-échelle au sein du régénérateur est représentée par l'effet magnétocalorique, qui se passe au niveau des spins des électrons des atomes du matériau magnétocalorique. A pression constante l'entropie totale du MMC peut être décomposée comme: l'entropie magnétique spécifique aux degrés de liberté du système de spins S_M , l'entropie du réseau cristallin (lattice) provenant de la vibration du réseau S_R , et l'entropie électronique spécifique provenant de la vibration des électrons du matériau, S_E .

$$S(H,T) = S_M(H,T) + S_R(H,T) + S_E(H,T) \quad (1)$$

Lors de l'application d'un champ magnétique en conditions adiabatiques dans un échantillon ferromagnétique, comme indiqué en figure 2, l'entropie totale reste constante durant le processus d'aimantation. Ainsi, lorsque l'entropie magnétique est réduite, l'entropie du réseau cristallin et l'entropie électronique augmentent afin de compenser les vibrations des spins des électrons et les connexions du réseau. Cela provoque une augmentation de la température (ΔT_{ad}) qui dépend de l'intensité du champ magnétique appliqué. Lorsque le champ externe est retiré, les spins reviennent à leur alignement initial en capturant l'énergie du réseau, ce qui réduit l'entropie thermique et l'échantillon revient à sa température initiale.

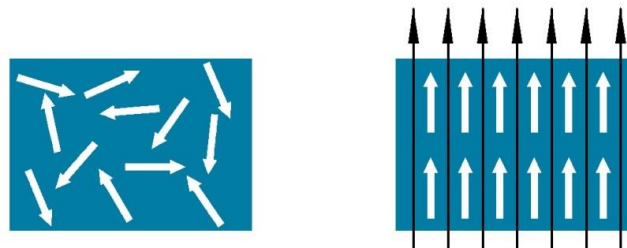


Figure 2 : Action du champ magnétique sur l'alignement des spins des électrons d'un solide magnétique : a) sans champ magnétique et b) avec champ magnétique

3.2. Approche mini-échelle

J.A. Barclay et al. [3] ont testé les différentes configurations de régénérateurs : géométrie à poudres, géométrie à canaux cylindriques, géométrie à plaques perforées et géométrie à plaques parallèles. La réalisation de ces structures est conditionnée par l'efficacité, par les contraintes de fabrication et aussi par le prix de fabrication.

Dans notre travail une géométrie d'AMR à plaques parallèles a été choisie. Les travaux antérieurs, aussi bien en simulation numérique qu'en résultats expérimentaux, montrent que c'est avec cette géométrie qu'on obtient le meilleur rapport entre l'efficacité thermique et les pertes de charges [4].

Dans notre simulation, l'ordre de grandeur de l'épaisseur des plaques du solide et de l'épaisseur des microcanaux (figure 3) est submillimétrique (entre 0,2 et 1mm). Le transport de chaleur est réalisé par un fluide caloporteur introduit entre les plaques du matériau magnétique.

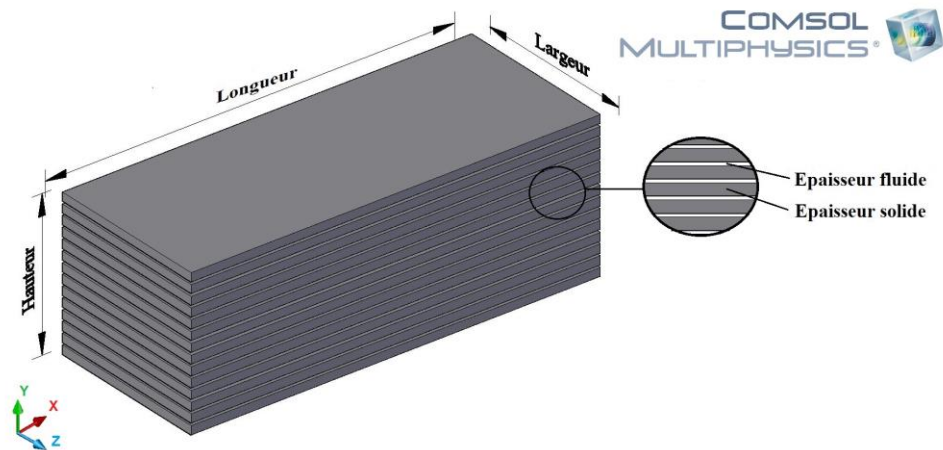


Figure 3: La géométrie du régénérateur constitué du domaine fluide et solide

3.3. Approche macro-échelle

L'un des problèmes de matériaux magnéto-caloriques existants est que le changement de température pour un cycle est faible, en dépit de la notation « effet magnéto-calorique géant » utilisée par la communauté scientifique. La valeur de ΔT_{ad} de gadolinium dans un champ magnétique de 2 T (qui peut être obtenu avec des aimants permanents) est d'environ 5 K. Pour atteindre une différence de température comparable à la réfrigération classique, la régénération est donc nécessaire [5]. Avec cette configuration, le MMC est capable de fonctionner à la fois comme un matériau régénérateur et comme un réfrigérant. En conséquence, l'écart de température entre la source de chaleur et le dissipateur de chaleur peut être considérablement augmenté. Sur la base de ce principe plusieurs prototypes ont été construits et testés dans différents laboratoires à travers le monde au cours des dernières années. Les prototypes construits ont obtenu des différences de température autour de 30 K [6].

4. L'approche multiphysique du modèle numérique

Dans cet article, nous présentons une approche multiphysique (thermique, fluide et magnétique) d'un modèle 2D d'un régénérateur magnétique actif qui prend en compte la variation de la température du matériau magnéto-calorique sous l'influence du champ magnétique, l'écoulement du fluide dans les microcanaux et la distribution de la température dans le régénérateur. Le modèle utilise les équations de Navier-Stokes pour l'écoulement du fluide entre les plaques solides qui sont alternativement chauffées et refroidies pendant la magnétisation et la démagnétisation. L'effet magnéto-calorique est inséré comme un terme source dans l'équation de la chaleur, et est basée sur des données expérimentales. La solution numérique adoptée est expliqué et les résultats typiques sont présentés et analysés.

	L	l	e_s	e_f	u
	mm	mm	mm	mm	m/s
Géométrie	50	10	1	0,3	0,05
	H	t_{mag}	t_{demag}	Δt	
	T	s	s	s	
Aimantation	1	0,1	0,1	0,1	

Tableau 1: Caractéristiques dimensionnelles et fonctionnelles de l'AMR du modèle numérique

4.1. Equations régissantes et conditions limites

Pour le modèle numérique on fait les hypothèses suivantes:

- Le régénérateur est parfaitement isolé, par conséquent on travaille dans des conditions adiabatiques;
- Le transfert de chaleur par rayonnement à l'intérieur du régénérateur est négligeable par rapport à la conduction et convection;
- Le fluide est considéré incompressible et l'écoulement est considéré laminaire.

La distribution des vitesses du fluide est déterminée en résolvant les équations Navier-Stokes pour un fluide incompressible :

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (2)$$

$$\rho_f \cdot \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} \right) - \mu_f \nabla^2 \mathbf{u} + \nabla p = 0 \quad (3)$$

La répartition de température au sein du matériau magnétocalorique est déterminée à partir de l'équation de la chaleur, avec l'EMC comme terme source :

$$\rho_s \cdot c_{p,s} \frac{\partial T_s}{\partial t} + \nabla \cdot (-\lambda_s \nabla T_s) - \dot{Q}_{EMC} = 0 \quad (4)$$

La répartition de température au sein du fluide est déterminée à partir de l'équation de conservation de l'énergie pour un fluide incompressible :

$$\rho_f \cdot c_{p,f} \left(\frac{\partial T_f}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) T_f \right) + \nabla \cdot (-\lambda_f \nabla T_f) = 0 \quad (5)$$

La distribution de vitesse déterminée par les équations (2) et (3) est utilisée comme valeur d'entrée pour la relation (5) pour déterminer le transfert de chaleur par convection. Le terme source dans l'équation (4) est représenté par le flux EMC, défini comme :

$$\dot{Q}_{EMC} = \rho_s \cdot c_{p,s}(H, T) \cdot \frac{\Delta T_{ad}(H, T)}{\Delta t} \quad (6)$$

Le flux de chaleur correspondant à l'EMC, \dot{Q}_{EMC} est calculé à base de $c_{p,s}(H, T)$ et $\Delta T_{ad}(H, T)$ pour chaque pas de temps. Les $c_{p,s}(H, T)$ et $\Delta T_{ad}(H, T)$ sont des propriétés thermophysiques du matériau qui dépendent du flux magnétique et de la température initiale du matériau [2].

Nous supposons alors un contact thermique parfait entre le fluide et le régénérateur, entraînant ainsi la continuité du flux définie par :

$$-\left(\lambda_f \frac{\partial T_f}{\partial y} \right) = -\left(\lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial y} \right) \quad (7)$$

$$T_f = T_s \quad (8)$$

Le solide et le liquide sont initialement à une température constante. Les conditions aux limites sont de type Neumann sur les parois extérieures (le flux de chaleur est nul) et de type

Dirichlet à l'entrée de fluide. Pour l'interface solide-liquide, nous avons une condition de non-glissement. Nous avons aussi une condition de mouvement des frontières au niveau des deux extrémités du régénérateur en fonction de la direction de déplacement. Dans le période de « *cold blow* » (le mouvement du fluide du CHEX vers HHEX) la température du fluide est considérée comme $T_f(x = 0, t) = T_{chaud}$ et dans le période de « *hot blow* » (le mouvement du fluide du HHEX vers CHEX) la température du fluide est considérée comme $T_f(x = L, t) = T_{froide}$ où L représente la longueur du régénérateur.

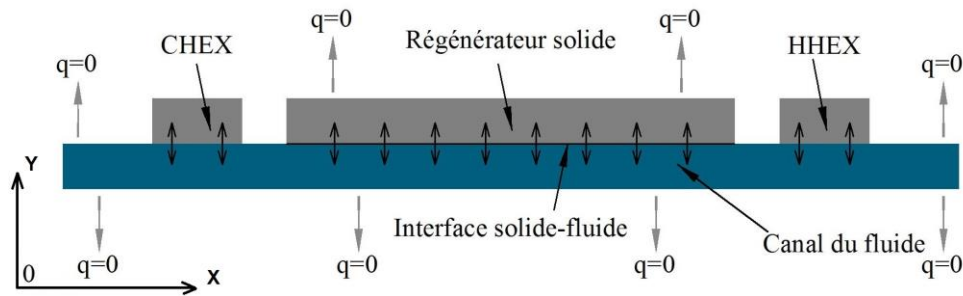


Figure 5: Les conditions limite du modelé numérique, figure adaptée de [7]

5. Résultats et discussions

Le modèle numérique développé représente un outil pour l'analyse de comportement et l'optimisation de l'AMR dans son processus de réfrigération. Pour la résolution numérique du système on a utilisé un outil commercial, Comsol Multiphysics, basée sur la méthode des Eléments Finis. Dans cette section, nous allons présenter les premiers résultats sous forme graphique, comme l'évolution temporelle du gradient de température dans le solide et l'évolution de la température du régénérateur et des deux échangeurs de chaleur (CHEX et HHEX).

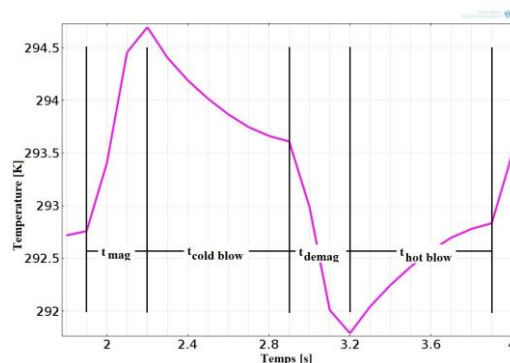


Figure 5: L'évolution de la température du régénérateur au cours d'un cycle

La figure 5 montre le comportement du régénérateur, au cours d'un seul cycle, qui comporte plusieurs étapes. Dans le processus d'aimantation, d'une durée t_{mag} , la température du régénérateur augmente grâce à l'effet magnéto-calorique. Par la suite, dans la période de « *cold blow* », d'une durée $t_{cold\ blow}$, le fluide s'écoule, absorbant une partie de la chaleur et la température du régénérateur diminue. Au cours de la désaimantation, d'une durée t_{demag} , le régénérateur se refroidit du fait de la disparition du champ magnétique. Enfin, dans la période de « *hot blow* », d'une durée $t_{hot\ blow}$, le solide est régénéré à partir du fluide, et la température augmente.

Après un certain nombre de cycles (en fonction des conditions de fonctionnement) et de la géométrie de l'AMR le régime permanent est atteint. Pendant le fonctionnement en régime

permanent un profil de température est formé le long du régénérateur en raison de l'écoulement du fluide, où les échangeurs de chaleur froid et chaud sont à différents niveaux de température.

La figure 6 présente l'évolution temporelle du gradient de température dans le régénérateur travaillant en conditions adiabatiques. Le pas de temps utilisé est de 10 secondes entre chaque ligne de gradient thermique. A l'état initial, le solide est à une température constante de 293,15 K. Au cours des plusieurs cycles, le gradient thermique augmente et il se rapproche d'un profil incurvé avec une différence de température et un profil qui dépend des paramètres de fonctionnement.

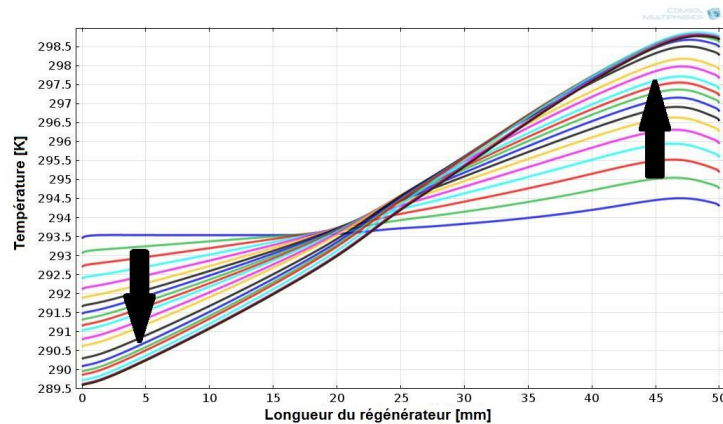


Figure 6: *L'évolution temporelle du gradient de température dans les plaques du régénérateur*

Dans la figure 7 nous pouvons observer l'évolution temporelle des températures au sein de l'AMR. La simulation a été effectuée sur 200 secondes, ce qui était suffisants pour atteindre le régime permanent. Pendant les 10 premières secondes, nous pouvons observer que la différence de température au sein du régénérateur est plus grande que la différence de température entre les échangeurs de chaleur. Ceci s'explique par le fait que les échangeurs reçoivent la chaleur du fluide et non pas directement du régénérateur. Par la suite, au cours du développement de la plage de température, on observe la différence de température entre les deux échangeurs de chaleur, qui est maintenant supérieure à la ΔT_{ad} .

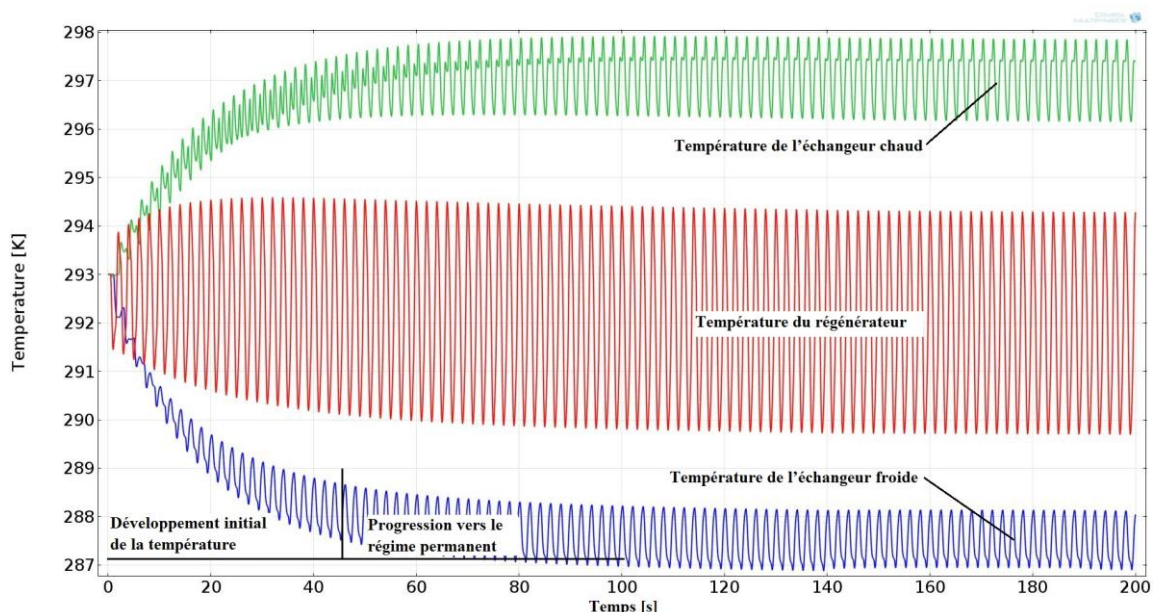


Figure 7: *L'évolution temporelle des températures d'un AMR*

Après une durée de 50 secondes, le régénérateur rentre progressivement en régime permanent. La convergence lente vers le régime permanent aboutit après 20 heures de simulation, dans notre cas, pour une durée réelle de 200 secondes. La différence de température finale entre les échangeurs de chaleur est de 11 K. Cette différence de température sera plus importante pour une série de paramètres qui sont à optimiser tels que la fréquence de cycle, la vitesse du fluide, la géométrie de l'AMR, les matériaux utilisés ainsi que leur positionnement.

6. Conclusions et perspectives

Pour une meilleure compréhension d'un système de réfrigération magnétique, le comportement d'un régénérateur magnéto-thermique actif a été modélisé à travers un modèle numérique 2D. Le modèle est basé sur une configuration à plaques parallèles de gadolinium avec de l'eau comme fluide caloporteur. L'AMR est un dispositif qui combine plusieurs phénomènes physiques (thermique, fluide et magnétique), chacun à une échelle différente.

Le modèle développé prend en compte, pour le changement adiabatique, la température du solide sous l'effet d'une variation du champ magnétique (micro-échelle), l'écoulement du fluide dans les microcanaux et la distribution de la température dans le régénérateur (mini-échelle). Par ailleurs, l'introduction de l'effet magnétocalorique comme terme source dans le modèle, à partir des valeurs de données expérimentales, permet de mieux reproduire le comportement du régénérateur magnétique actif.

Les résultats obtenus en utilisant l'effet de régénération thermique montrent une différence de température de 11 K entre les deux échangeurs (CHEX et HHEX). Cette valeur représente une augmentation significative par rapport à la différence adiabatique de température par l'effet magnétocalorique direct.

Ces résultats montrent que l'utilisation d'un AMR devient intéressante pour des applications industrielles les plus courantes (macro-échelle).

Références

- [1] G. V. Brown, *Magnetic heat pumping near-room temperature*, J Appl. Phys, (1976), 3673-3680
- [2] M. Risser, *Modélisation Multiphysique et Multiconfigurationnelle d'Evaluation et d'Optimisation des Performances des Systèmes de Réfrigération Magnétocalorique*, Thèse de l'INSA de Strasbourg (2011), 25-26
- [3] J.A. Barclay, S. Sarangi, *Selection of Regenerator Geometry for Magnetic Refrigerator Applications*, Intersociety Cryogenic Symposium, (1984), 719-731
- [4] S. Lionte, C. Vasile, B. Latour, M. Siroux, *Caractérisation d'un système de réfrigération magnétique a point de Curie proche de la température ambiante – influence de la vitesse d'écoulement et de la géométrie du régénérateur*, Congrès SFT, Gérardmer, (2013), 6-7
- [5] A.M. Tishin, Y.I. Spichkin, *The Magnetocaloric Effect and its Applications*, Institute Of Physics Publishing Bristol and Philadelphia, ISBN 0750309229, UK (2003), 80-84
- [6] D. Vuarnoz, T. Kawanami, *Numerical analysis of a reciprocating active magnetic regenerator made of gadolinium wires*, Applied Thermal Engineering, (2011), 388-395
- [7] T. F. Petersen, *Numerical modelling and analysis of a room temperature magnetic refrigeration system*, Thèse, (2007), 30-32

Remerciements

Les auteurs expriment leur gratitude à l'Agence Nationale de Recherche de France (ANR), ces études étant financées par le projet ANR-10-STOCK-E.