

Caractérisation d'un système de réfrigération magnétique à point de Curie proche de la température ambiante – influence de la vitesse d'écoulement et de la géométrie de régénérateur

Sergiu LIONTE*, Carmen VASILE, Benjamin LATOUR, Monica SIROUX

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

Laboratoire de Génie de la Conception (LGeCo), Strasbourg, France

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

Résumé - Une modélisation numérique des transferts thermiques au sein d'un AMR a été développée afin d'étudier son comportement en régime permanent, puis transitoire. De plus, une étude paramétrique a permis d'identifier les grandeurs caractéristiques qui ont une influence significative sur le comportement thermique de l'AMR. Ainsi, à partir de ces résultats, une première approche de dimensionnement d'un système de réfrigération magnétique à point de Curie proche de la température ambiante peut être proposée.

Nomenclature

COP	Coefficient de performance	<i>Symboles grecs</i>	
S	Entropie, $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	λ	Conductivité thermique, $W/m \cdot K$
T	Température, K ou $^{\circ}C$	Δ	Différence, variation
Q	Quantité de chaleur, enthalpie, J	ρ	Densité, kg/m^3
V	Vitesse, m/s	τ_{mg}	Temps magnétisation, s
L_o	Longueur, mm	τ_{dmg}	Temps démagnétisation, s
L_a	Largeur, mm	η	viscosité dynamique
E_s	Epaisseur partie solide, mm	<i>Indices et exposants</i>	
E_f	Epaisseur partie fluide, mm	<i>ad</i>	adiabatique
H	Champ magnétique, T	<i>s</i>	solide
F	Facteur longueur, -	<i>f</i>	fluide
f	Fréquence, Hz	<i>mg</i>	magnétisation
c_p	Chaleur spécifique, $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	<i>dmg</i>	démagnétisation
D_H	Diamètre hydraulique, mm		

1. Introduction

Le froid industriel représente 4 % de la consommation d'électricité dans l'industrie française et près de 7 % de la consommation nationale d'électricité. Le secteur des industries agro-alimentaires consomme à lui tout seul 57 % de l'électricité consacrée à l'industrie du froid [1].

Afin de répondre aux besoins croissants en froid industriel et climatisation la recherche s'oriente aujourd'hui vers des technologies de réfrigérations alternatives. En effet, les exigences environnementales limitent les technologies classiques, notamment les techniques thermodynamiques. A l'heure actuelle, les systèmes de réfrigération classiques sont basés sur la technologie de compression de vapeur qui existe depuis plus de 100 ans. Bien qu'il s'agisse d'une technologie fiable et à faible coût, elle a comme principal inconvénient l'utilisation de fluides frigorigènes dangereux pour l'environnement comme les

hydrofluorocarbures (HFC), les chlorofluorocarbures (CFC) ou encore l'ammoniac (NH_3). De plus, ces systèmes de réfrigération à compression atteignent leur limite d'efficacité.

A contrario, la réfrigération magnétique est une technologie environnementalement propre qui semble prometteuse [2]. En effet, cette technologie exploite l'**effet magnétocalorique (MCE)** [3], qui se traduit par une variation instantanée et réversible de la température et de l'entropie des matériaux magnétiques sous l'effet d'une variation de champ magnétique. Cet effet est maximal autour de la température de Curie de matériau (température à laquelle un matériau change l'ordre magnétique de ferromagnétique à paramagnétique). Le dispositif permettant d'exploiter l'effet magnétocalorique, présenté sur la figure 1, est appelé régénérateur magnétique actif (AMR : Active Magnetic Regenerator), dont il existe différentes configurations [4] [5].

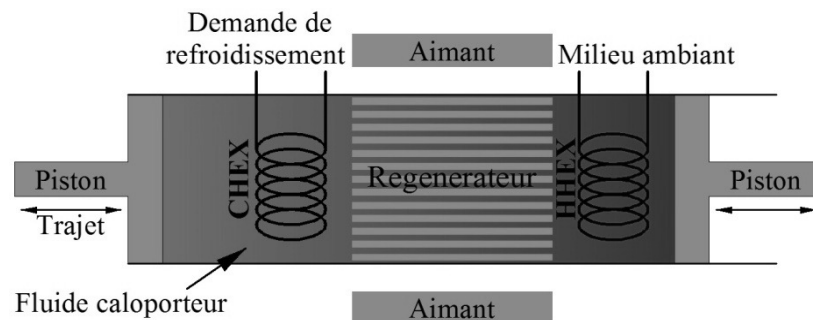


Figure 1 : Représentation schématique du principe de fonctionnement d'un Régénérateur Magnétique Actif (AMR) avec les éléments composants. Figure adaptée de [9]

Le régénérateur est un lit poreux de matériau magnétocalorique par exemple le gadolinium, qui est utilisé pour transférer la chaleur vers et à partir du fluide en mouvement, dans un procédé cyclique, afin d'obtenir des différences plus importantes de température entre l'échangeur de chaleur froid (CHEX) et l'échangeur de chaleur chaud (HHEX). Les prototypes construits ont obtenu de différences température autour de 30K, avec un COP compris entre 3 et 15, avec une efficacité pouvant atteindre les 60% du cycle de Carnot [6].

Le principe de fonctionnement est basé sur le lit poreux de matériau magnétocalorique et c'est le fluide caloporteur qui va transférer la chaleur. Le déplacement du fluide est réalisé par deux pistons situés de part et d'autre de l'AMR, côté froid et côté chaud. A la première étape, l'AMR est magnétisé par l'aimant sans circulation du fluide caloporteur. A la deuxième étape le fluide circule dans l'AMR encore magnétisé du côté froid vers le côté chaud. En se réchauffant lors de son déplacement, il transporte une partie de la chaleur rendue disponible par la magnétisation vers le côté chaud. Cette chaleur est alors évacuée vers le milieu ambiant au travers de l'échangeur de chaleur chaud (HHEX). A la troisième étape l'AMR est démagnétisé sans circulation du fluide et se refroidit. A la quatrième étape le fluide circule dans l'AMR démagnétisé du cote chaud vers le coté froid. Il est alors refroidi et va absorber de la chaleur par l'intermédiaire de l'échangeur froid (CHEX). Ainsi, à chaque aller-retour du fluide dans l'AMR, une certaine quantité de chaleur sera transportée de la source froide à la source chaude.

Le cycle magnéto-thermodynamique le plus efficace pour un réfrigérateur magnétique opérant à température ambiante est le cycle AMRR (Active Magnétique Régénérative Réfrigération), similaire à un cycle de Brayton. Il se compose d'une magnétisation et d'une démagnétisation isentropiques et d'un refroidissement et un chauffage iso-champs. Ce cycle est basé sur le fait que l'AMR s'assemble à une multitude de petites machines thermodynamiques en série opérant chacune à un niveau de température différent. Alors chaque tranche de MMC est réchauffée par le fluide provenant des tranches adjacentes à un

niveau de température supérieur. Ainsi la circulation du fluide caloporteur, de façon synchrone avec la variation du champ magnétique, va créer un gradient thermique dans l'AMR. Il est toutefois important que le déplacement du fluide dans l'AMR ne soit pas trop important. Dans le cas contraire, le fluide détruirait le gradient thermique.

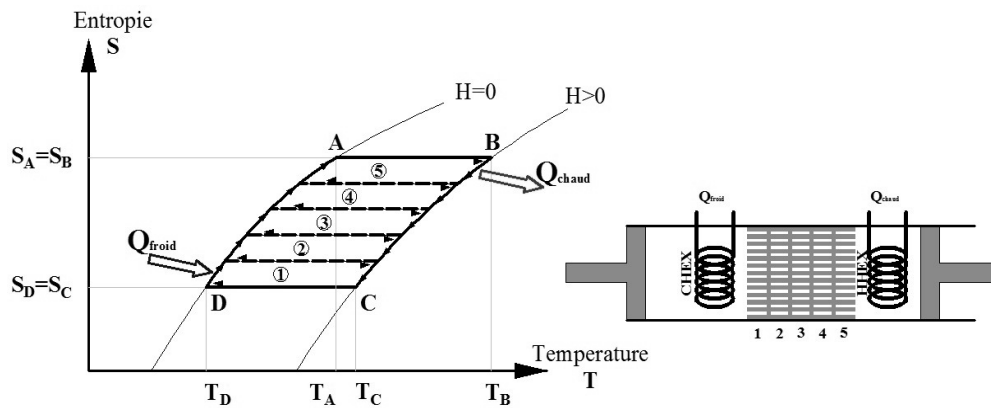


Figure 2 : Représentation du cycle d'AMRR basé sur une série de cycles de Brayton. Figure adaptée de [9]

2. Modélisation numérique d'un AMR : modèle numérique et études paramétriques

2.1. Définition du modèle numérique

Dans cet article un modèle numérique de régénérateur magnétique a été développé afin d'étudier et d'optimiser le transfert de chaleur entre le matériau magnéto-calorique, ici le gadolinium (dont les propriétés thermo-physiques sont bien connues), et le fluide caloporteur, ici de l'eau (utilisée dans différents prototypes). Dans un premier temps, une géométrie d'AMR à plaques parallèles a été choisie pour pouvoir bénéficier des résultats expérimentaux existants. Le modèle numérique de l'AMR utilise les caractéristiques suivantes:

Paramètre	Valeur	Paramètre	Valeur
Lo	100	H	2
La	10	τ_{mg}	0,1
Es	1	τ_{dmg}	0,1
Ef	0,3;0,5	F	0,5
		f	0,5;0,8;1

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

Paramètre	Valeur	Paramètre	Valeur
Gadolinium		L'eau	
c_p	0,236	c_p	4193,489
λ	10,6	λ	0,58
ρ	7901	ρ	1001,13

Tableau 2: Les propriétés de Gadolinium et d'eau utilisées dans le modèle numérique

2.2. Conditions initiales, conditions limites et équations régissantes

Une température de 20°C a été prise en compte dans tout le domaine fluide. Le fluide entrant est également à 20°C. Pour le domaine solide une température initiale de 24,7 °C a été prise en compte. Cette température à été obtenue suite à l'application de champ magnétique de 2 Teslas sur les plaques de Gd [7].

La condition limite sur le côté gauche du modèle (entre du fluide) a été considérée la vitesse moyennée du fluide d'entre. On a utilisé 3 vitesses différentes en fonction de fréquence du mouvement, de longueur totale de l'AMR et de facteur de longueur : 0,025 m/s, 0,04 m/s et 0,05 m/s (Le facteur de longueur représente le rapport entre la longueur de trajet de liquide dans le régénérateur et la longueur totale du régénérateur).

La condition limite sur le côté droit du modèle (sortie du fluide) a été considérée la pression atmosphérique. Toutes les limites extérieures à l'exception de l'entrée et la sortie du fluide sont parfaitement isolées, par conséquent on travaille en conditions adiabatiques.

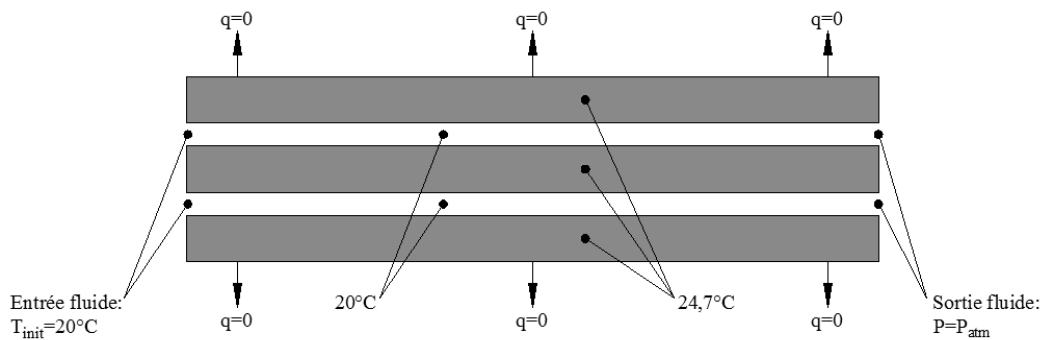


Figure 3: Conditions initiales et conditions limites de modèle

Les équations utilisées pour le modèle numérique sont les équations Navier-Stokes pour l'écoulement et l'équation convection – diffusion pour le transfert thermique.

Equation de continuité (conservation de la masse):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_1)}{\partial x_1} + \frac{\partial(\rho u_2)}{\partial x_2} = 0 \quad (1)$$

Equation de moment (conservation de la quantité de mouvement):

$$\rho \cdot \left(\frac{\partial u_1}{\partial t} + u_1 \frac{\partial u_1}{\partial x_1} + u_2 \frac{\partial u_1}{\partial x_2} \right) = -\frac{\partial \rho}{\partial x_1} + \mu \left[\frac{\partial^2 u_1}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 u_1}{\partial x_2^2} \right] \quad - \text{dans } x_1 \text{ direction} \quad (2)$$

$$\rho \cdot \left(\frac{\partial u_2}{\partial t} + u_1 \frac{\partial u_2}{\partial x_1} + u_2 \frac{\partial u_2}{\partial x_2} \right) = -\frac{\partial \rho}{\partial x_2} + \mu \left[\frac{\partial^2 u_2}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 u_2}{\partial x_2^2} \right] \quad - \text{dans } x_2 \text{ direction} \quad (3)$$

Equation de bilan de l'énergie (convection diffusion):

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u_1 \frac{\partial T}{\partial x_1} + u_2 \frac{\partial T}{\partial x_2} = \alpha \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial x_2^2} \right) \quad \text{avec } \alpha = \lambda/(\rho \cdot c_p) - \text{diffusivité thermique} \quad (4)$$

Pour la modélisation on a utilisé le logiciel COMSOL Multiphysics basée sur la Méthode des Eléments Finis.

3. Résultats et discussions

3.1. Type d'écoulement et numéro de Reynolds

Pour déterminer le régime d'écoulement dans des microcanaux ont a calculé le nombre de Reynolds.

$$Re = \frac{V \cdot D_H}{\eta} \quad (5)$$

Pour chaque fréquence du mouvement de régénérateur le numéro de Reynolds en fonction de vitesse moyenne de fluide a été calculé. Pour la fréquence de 0,5 Hz le Re est 23, pour la fréquence de 0,8 Hz le Re est 36 et pour la fréquence de 1 Hz le Re est 45. Le régime d'écoulement dans les microcanaux de l'AMR est toujours laminaire.

Dans la figure 4 on présente la distribution de vitesse pour différentes fréquences du mouvement de régénérateur.

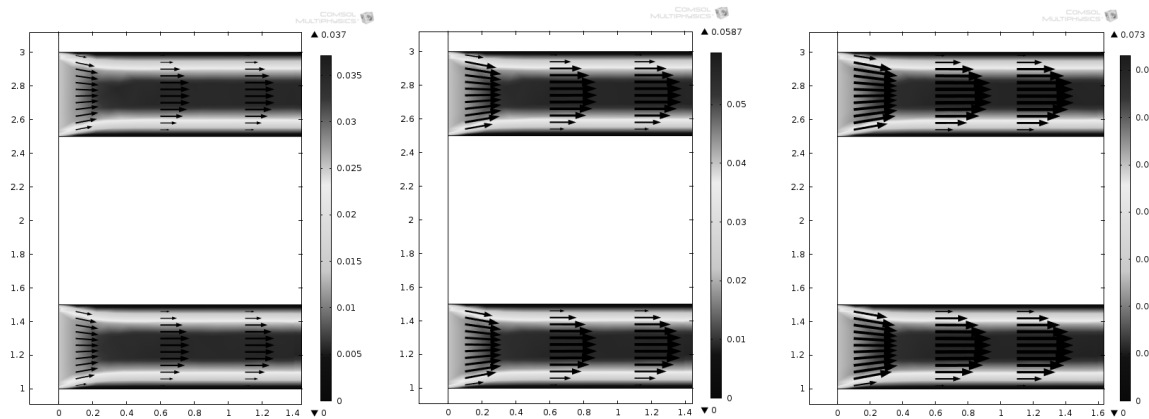


Figure 4: Distribution de vitesse du fluide dans les microcanaux pour les fréquences de 0,5 Hz, 0,8 Hz et 1,0 Hz

Le profil de température est présenté pour chaque vitesse utilisée. On a comparé la distribution de températures pour le temps de 0,1 s et 0,8 s. La distribution de températures en microcanaux en fonction de vitesse de fluide et à différents pas de temps est présentée dans les figures 4, 5 et 6.

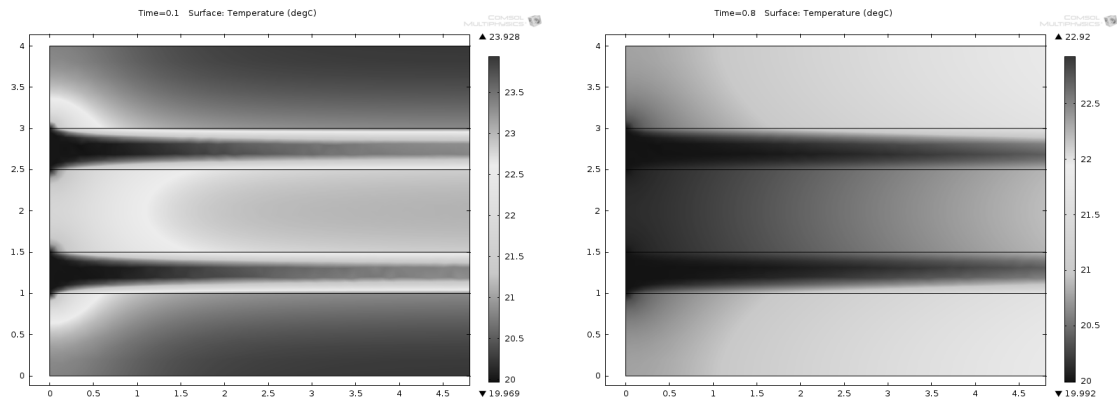


Figure 4: Distribution de la température du fluide dans les microcanaux pour $t=0,1$ s et $t=0,8$ s pour la vitesse moyenne du fluide de $0,025$ m/s

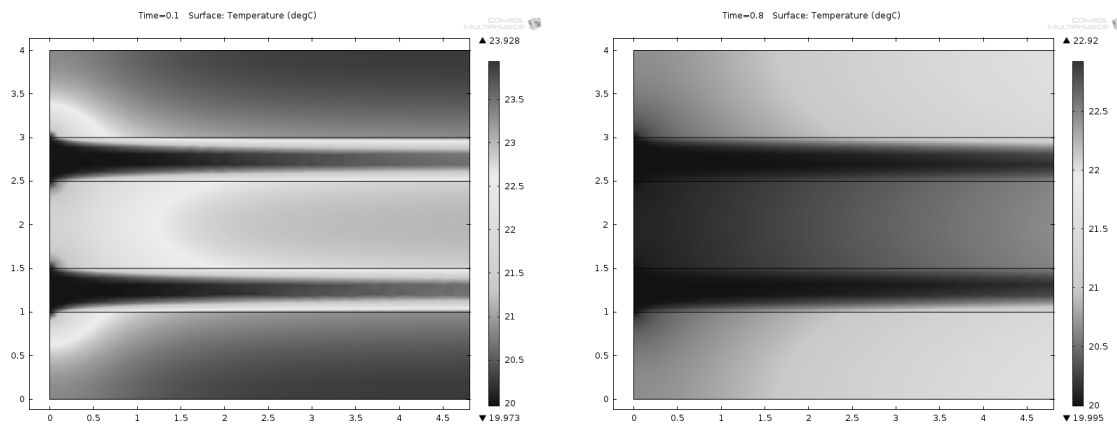


Figure 5: Distribution de la température du fluide dans les microcanaux pour $t=0,1$ s et $t=0,8$ s pour la vitesse moyenne du fluide de $0,04$ m/s

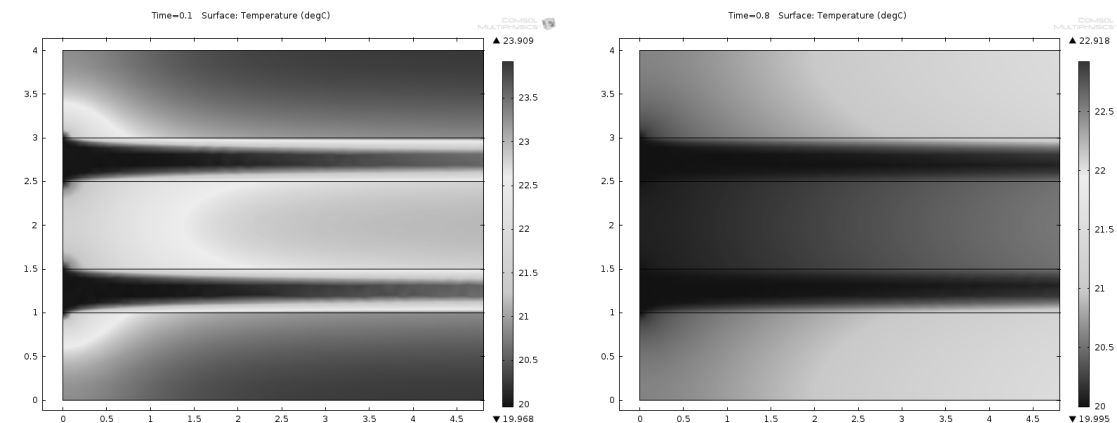


Figure 6: Distribution de la température du fluide dans les microcanaux pour $t=0,1$ s et $t=0,8$ s pour la vitesse moyenne du fluide de $0,05$ m/s

Pour étudier l'influence de la vitesse d'écoulement sur le transfert de chaleur en régénérateur, la température d'un point médian dans la sortie de fluide en microcanal a été étudiée à différentes périodes de temps. La distribution de la température de point médian de sortie du fluide est présentée dans le tableau 3 en fonction de la vitesse d'écoulement.

Vitesse 0,025 [m/s]		Vitesse 0,04 [m/s]		Vitesse 0,05 [m/s]	
Temp	Temperature	Temp	Temperature	Temp	Temperature
[sec]	[°C]	[sec]	[°C]	[sec]	[°C]
0	20	0	20	0	20
0,2	21,49	0,2	21,49	0,2	21,54
0,4	22,17	0,4	22,17	0,4	22,19
0,6	22,45	0,6	22,45	0,6	22,45
0,8	22,56	0,8	22,56	0,8	22,56
1	22,61	1	22,60	1	22,61
1,2	22,63	1,2	22,63	1,2	22,63
1,4	22,64	1,4	22,64	1,4	22,64
1,6	22,65	1,6	22,65	1,6	22,64
1,8	22,66	1,8	22,66	1,8	22,63
2	22,66	2	22,66	2	22,62

Tableau 3: La distribution de la température de point médian de sortie du fluide en fonction de vitesse d'écoulement du fluide

Pour cet écart de température de 20 à 24,7°C et pour cette dimension de régénérateur de 100 mm x10 mm l'influence de la vitesse d'écoulement dans le transfert de chaleur est faible après un seul cycle mais cette différence se transforme dans un écart de température important après plusieurs cycles.

3.2. L'influence de la géométrie des microcanaux sur le transfert de chaleur

Pour mettre en évidence l'influence de la géométrie de microcanaux nous avons étudié l'évolution de la température dans le point médian de sortie du fluide en fonction du temps. Pour une vitesse moyenne constante de 0,025 m/s nous avons varié l'épaisseur de microcanal entre les plaques parallèles de MMC comme rapportée dans la figure 7. L'évolution de température de point médian de sortie du fluide est présentée dans la figure 7 également.

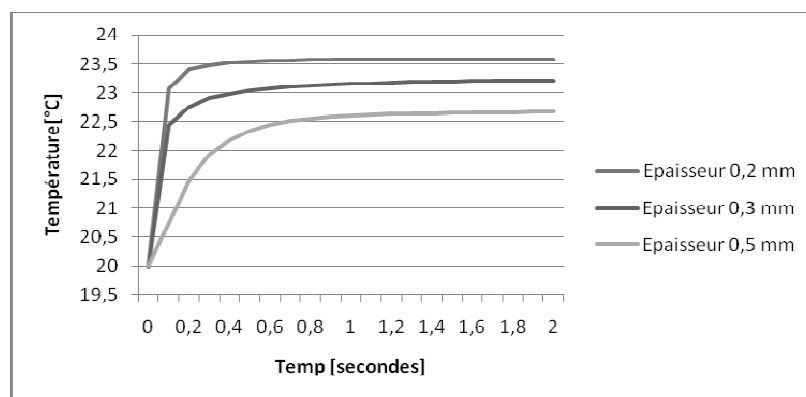


Figure 7: Evolution de la température de point médian de sortie du fluide pour différentes épaisseurs des microcanaux

Nous pouvons observer que la miniaturisation accélère et augmente le niveau de transfert de chaleur entre le solide et le liquide en mouvement. Cette influencé est encore plus remarquable pour des microcanaux en série.

4. Conclusions et perspectives

Une étude paramétrique a été faite sur un régénérateur magnétique actif constitué d'un matériau magnétocalorique (Gadolinium) et d'un liquide caloporteur (l'eau). La géométrie d'AMR utilisé est la géométrie avec des plaques parallèles. Le type d'écoulement a été étudié en fonction des différentes fréquences du mouvement de régénérateur. On a aussi étudié l'influence de la vitesse d'écoulement sur le transfert de chaleur entre le fluide et solide et l'influence de la géométrie de régénérateur, en faisant varier l'épaisseur des microcanaux. Nous avons constaté que pour toutes les fréquences utilisées l'écoulement est laminaire.

Dans cette publication nous avons montré la validité de principe de variation de l'énergie interne et de température d'un matériau magnétocalorique sous la variation d'un champ magnétique. L'étape suivante de l'étude sera dédiée à la mise en place d'un nombre de groupement de microcanaux sous forme de plaques en série et en parallèle pour arriver à des différences de températures et des débits utilisables en applications industrielles.

Références

- [1] ADEME Editions, *Le froid efficace dans l'industrie*, (1999) - Réf. 3187
- [2] K. Gschneider Jr, V.K. Pecharsky, A. Tsokol, *Recent developments in magnetocaloric materials*, Reports on progress in physics, (2005) 1479-1539
- [3] G. V. Brown, *Magnetic heat pumping near-room temperature*, Journal of Applied Physics, (1976) 3673
- [4] C. Vasile, C. Muller, *Innovative design of a magnetocaloric system*, International Journal of Refrigeration, (2006) 1318-1326
- [5] J.A. Barclay, S. Sarangi, *Selection of Regenerator Geometry for Magnetic Refrigerator Applications*, Intersociety Cryogenic Symposium, (1984)
- [6] K. Gschneider Jr, V.K. Pecharsky, *Rare Earths and Magnetic Refrigeration*, Journal of Rare Earths, (2006) 641-642
- [7] A. Lebouc, F Allab, J.M. Fournier, J.P. Yonnet, *Réfrigération magnétique*, Techniques de l'Ingenieur, (2005), RE 28 – 5
- [8] D. Vuarnoz, T. Kawanami, *Numerical analysis of a reciprocating active magnetic regenerator made of gadolinium wires*, Applied Thermal Engineering, (2011)
- [9] M. Risser, *Modélisation Multiphysique et Multiconfigurationnelle d'Evaluation et d'Optimisation des Performances des Systèmes de Réfrigération Magnétocalorique*, Thèse de doctorat, (2011)
- [10] J. Roudaut, A. Kedous-Lebouc, J.-P. Yonnet, C.Muller, *Numerical analysis of an active magnetic regenerator*, International Journal of Refrigeration, (2011)

Remerciements

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