

# La réfrigération magnéto-calorique au défi du réchauffement climatique.

Thierry de LAROCHELAMBERT<sup>1\*</sup>, Antony PLAÏT<sup>1</sup>, Stefan GIURGEA<sup>2</sup>, Yannick BAILLY<sup>1</sup>, Jean-Claude ROY<sup>1</sup>, David RAMEL<sup>1</sup>, Laurent GIRARDOT<sup>1</sup>, Raynal GLISES<sup>1</sup>, Thierry BARRIERE<sup>1</sup>, Laurent HIRSINGER<sup>1</sup>, Mickaël PERRIN<sup>1</sup>, Ali ISMAIL<sup>1</sup>, Alexandre MEUNIER<sup>3</sup>, Tianjiao LI<sup>3</sup>, Frédéric DUBAS<sup>1</sup>, Julien EUSTACHE<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institut FEMTO-ST, Univ. Bourgogne Franche-Comté, CNRS, Belfort, France

<sup>2</sup>Institut FEMTO-ST, Univ. Bourgogne Franche-Comté, UTBM, CNRS, Belfort, France

<sup>3</sup>NextPac Sarl, Seinghouse, France

\* (auteur correspondant : [thierry.larochelambert@femto-st.fr](mailto:thierry.larochelambert@femto-st.fr))

**Résumé** – La part de la consommation d'énergie finale et des émissions de gaz à effet de serre (GES) dues aux applications domestiques et industrielles liées à la réfrigération et à la climatisation, ne cesse de croître à travers le monde et risque d'augmenter rapidement du fait du réchauffement climatique en cours qu'elles contribuent à accélérer si les politiques de sobriété et d'efficacité restent insuffisantes.

Au cours des vingt dernières années, de nombreuses recherches ont été menées dans le monde pour développer des technologies de réfrigération magnéto-calorique prometteuses car plus efficaces et sans émissions de GES. Elles ont permis de bien comprendre les mécanismes de l'effet magnéto-calorique (EMC) présentés par de nombreux matériaux, de fabriquer de nouveaux alliages susceptibles d'une utilisation massive pour la réfrigération et la climatisation au cours des prochaines années. Cependant, certains verrous scientifiques et techniques doivent encore être levés avant d'aboutir à des dispositifs magnéto-caloriques suffisamment performants pour atteindre le stade industriel et devenir concurrentiels vis-à-vis des technologies classiques de réfrigération à compression de vapeur.

Après une synthèse des récents progrès dans l'élaboration des matériaux et la mise au point de prototypes pour le froid et le chauffage magnéto-caloriques, cet article présente les défis scientifiques propres à ces machines et leurs solutions possibles. Les travaux menés au Dp<sup>1</sup> Énergie de l'Institut FEMTO-ST s'inscrivent dans cette stratégie et sont décrits en vue de souligner l'importance d'une conception optimisée des régénérateurs magnéto-caloriques au cœur de ces machines.

Un de ces axes de recherche porte sur la meilleure connaissance des échanges thermiques entre les plaques de matériaux des régénérateurs magnéto-caloriques et l'écoulement alterné de fréquences plus élevées que celles habituellement utilisées dans les dispositifs actuels. Les calculs analytiques menés au Dp<sup>1</sup> Énergie montrent que l'intensification de ces échanges thermiques se produit au-delà d'un seuil critique  $Re_{oc}$  du nombre adimensionnel de Womersley, caractérisant l'apparition de l'effet annulaire induit dans ces écoulements, conformément à l'analyse d'échelle de leurs équations en lien avec le nombre de Prandtl  $Pr$  du fluide utilisé.

L'utilisation de régénérateurs magnéto-caloriques à couches de matériaux magnéto-caloriques de températures de Curie étagées croissantes est un autre axe de recherche. Les simulations numériques de ces régénérateurs démontrent l'augmentation de l'écart de température lors des cycles actifs de réfrigération magnétique appliqués à ces régénérateurs. D'autres travaux en cours d'étude peuvent conduire aux ruptures technologiques recherchées permettant d'atteindre l'efficacité et les baisses de coûts indispensables à la commercialisation des futures machines magnéto-caloriques.

**Mots-clés** : magnéto-calorique, réfrigération, régénérateurs, efficacité, matériaux magnéto-caloriques, optimisation, échangeur, transfert thermique.

## Nomenclature

$A_0$	fluide balayé/contenu du régénérateur	$L$	longueur régénérateur, m
$B$	induction magnétique, T	$M$	aimantation, A m <sup>-1</sup>
$c$	capacité thermique massique, J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	$Nu$	nombre de Nusselt efficace
$f$	fréquence, Hz	$NUT$	nombre d'unités de transfert
$H$	excitation magnétique, A m <sup>-1</sup>	$P_f$	puissance froide, W
$k$	conductivité thermique, W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	$Pr$	nombre de Prandtl

$\dot{q}_m$	puissance volumique, $\text{W m}^{-3}$
$r$	position transversale, m
$Re_\omega$	nombre de Womersley, $\frac{1}{2} d_h (\omega/\nu)^{1/2}$
$S$	entropie volumique, $\text{J K}^{-1} \text{m}^{-3}$
$t$	temps, s
$T$	température, K
$T_c$	température de Curie, K

$x$  position axiale, m

*Symboles grecs*

$\Delta T_{HC}$  différence de température  $T_{chaud} - T_{froid}$

$\mu_0$  perméabilité magnétique du vide,  $\text{H m}^{-1}$

$\nu$  viscosité cinématique,  $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$

$\omega$  pulsation,  $\text{rad s}^{-1}$

$\rho$  masse volumique,  $\text{kg m}^{-3}$

$\theta$  temps adimensionnel ( $= t \times f$ )

*Indices et exposants*

$f$  fluide

$s$  solide

## 1. Introduction

Face au défi et à l'urgence du dérèglement climatique, de grands efforts de recherche sont menés depuis une vingtaine d'années pour concevoir de nouveaux dispositifs pour la réfrigération et la climatisation active et passive, le chauffage thermodynamique, capables d'offrir des coefficients de performance très supérieurs aux machines traditionnelles à cycles de compression de vapeurs, sans aucun recours à des halocarbures ni à aucun gaz à effet de serre.

Une des voies les plus prometteuses empruntées par les laboratoires de recherche pour atteindre cet objectif est celle de la réfrigération magnétique utilisant l'EMC (production d'entropie isotherme ou variation de température adiabatique par magnétisation) présenté par une grande variété de matériaux (corps simples ou composés). L'objectif de ces recherches à l'échelle mondiale est d'atteindre au plus vite un niveau de performance des machines magnéto-caloriques suffisamment fiable, écologique et économique pour permettre leur industrialisation à grande échelle dans toute la variété des usages courants (pompes à chaleur industrielles performantes, réfrigérateurs domestiques, chambres froides industrielles, climatisation des transports, etc.). Les progrès enregistrés dans ce domaine depuis les réalisations pionnières de [Brown](#) [1], de [Rosenblum](#) et [Steyert](#) [2] sont considérables, tant dans la mise en œuvre et l'amélioration des cycles de réfrigération magnétique actifs à régénérateur (AMRR) que dans l'étude et la fabrication de matériaux magnéto-caloriques (MMC) performants et écologiques, ou dans la conception des machines magnéto-caloriques et des sources d'aimantation interne.

Après une courte synthèse des dernières avancées mondiales dans les recherches magnéto-caloriques, cet article détaille les obstacles et défis qu'il reste à relever avant de parvenir au stade de l'industrialisation de machines magnéto-caloriques capables de remplacer les machines frigorifiques actuelles. Les solutions envisagées en rupture de technologie s'appuient sur une analyse d'échelle basée sur les transferts thermiques et les propriétés magnéto-caloriques et thermo-physiques des matériaux magnéto-caloriques (MMC) envisageables, et ouvrent des axes de recherche prioritaires possibles. Les recherches menées à l'Institut FEMTO-ST depuis 2007 portent sur la modélisation théorique des cycles AMRR, des écoulements alternés dans les régénérateurs et des matériaux eux-mêmes, et sur la réalisation de bancs d'essais de régénérateurs magnéto-caloriques capables d'explorer certains de ces axes. Parmi les travaux en cours, l'intensification des échanges thermiques au sein des régénérateurs à plaques de MMC est susceptible de lever un des verrous vers les futures machines magnéto-caloriques.

## 2. Avancées scientifiques et techniques en réfrigération magnéto-calorique

### 2.1. Matériaux et prototypes

Une première phase historique, initiée par l'expérience de Brown, a vu se développer en quelques années un nombre très important de recherches fondamentales sur l'EMC lui-même dans les MMC dits « de second ordre » selon la classification d'[Ehrenfest](#) [3] (dérivées pre-

mières continues, dérivées secondes discontinues de l'enthalpie libre  $G$ ), puis dans les MMC « de premier ordre » (dérivées premières de  $G$  discontinues) pour lesquels la transition paraferromagnétique s'accompagne d'une transition de structure cristalline conduisant à un EMC « géant » [4] avec irréversibilité par hystérésis, source de fragilités mécaniques possibles. Lors de cette première phase, il est apparu que les MMC d'ordre 2 à température de Curie proche de la température ambiante (entre  $-10^{\circ}\text{C}$  et  $50^{\circ}\text{C}$ ) sont souvent des éléments chimiques  $4f$  (terres rares), abondamment étudiés par les travaux fondamentaux de Dan'Kov, Gschneider, Pecharsky et Tishin [5][6][7], tandis que les MMC d'ordre 1 sont majoritairement des composés de terres rares développant des EMC plus élevés mais étroits et abrupts avec des températures de transition de phase variables mais réglables en fonction de leur composition.

Jusqu'en 2014 environ, de nombreux démonstrateurs et prototypes ont ensuite été développés dans un nombre croissant de pays (USA, France, Danemark, Italie, Suisse, Slovénie, Canada, Japon, Portugal, Brésil principalement) pour tenter d'exploiter au mieux les EMC plus larges et sans hystérésis des matériaux de second ordre [8] en améliorant progressivement les commutations d'écoulement, la configuration des aimants permanents et la forme et la répartition des régénérateurs à MMC. Des records de puissance froide et de coefficients de performance de prototypes utilisant des cycles AMRR avec régénérateur à microbilles ou à plaques de gadolinium sont ainsi régulièrement battus par l'équipe de Zimm à l'Astronautics Corporation of America [9] ( $P_f \sim 500 \text{ W}$ ,  $\text{COP} \sim 6$ ,  $B \sim 1 \text{ T}$ ,  $f \sim 0,17 \text{ Hz}$ ) et l'équipe de Bahl et Engelbrecht au DTU [10] ( $P_f \sim 1 \text{ kW}$ ,  $B \sim 1,2 \text{ T}$ ,  $f \sim 1,8 \text{ Hz}$ ).

De nouveaux prototypes utilisant des régénérateurs à MMC d'ordre 1 commencent à présenter des performances significatives dès 2006 [11] pour bientôt surpasser celles des prototypes à régénérateur de gadolinium, remplacé par un régénérateur multicouche à microparticules sphériques de composés La-Fe-Si à points de transition étagés, introduisant ainsi une première rupture technologique significative. Une puissance froide de 2,5 kW avec un d'écart de température  $\Delta T_{HC}$  de 11 K et de 3 kW en épuisant l'écart de température est atteinte sous 1,44 T par le prototype rotatif à six étages de l'Astronautics Technology Center [12]. Un des rares prototypes ayant atteint le stade pré-commercial est un réfrigérateur magnétocalorique évolutif de l'entreprise française Cooltech (aujourd'hui Ubiblue) conçu pour atteindre une puissance froide de 15 kW à 20 K d'écart de température et faisant l'objet de développements basés sur un algorithme évolutionnaire en intelligence artificielle [13].

Dès lors, de nombreuses recherches sont menées dans différents laboratoires pour tester et fabriquer de nouveaux composés alliant différents métaux de transition  $3d$ ,  $4d$  et  $4f$  [14], sans toutefois que se dégage jusqu'à présent un MMC réunissant tous les critères favorables à une optimisation des régénérateurs : EMC élevé et large, hystérésis minimal ou nul (éviter la fragilisation mécanique et les irréversibilités), bonne diffusivité thermique (assurer un transfert rapide de la puissance magnétocalorique au fluide de transfert), faible conductivité électrique (éviter les pertes par courants de Foucault lors des transitions magnétiques), bonne résistance à l'oxydation et au vieillissement thermique, bonne stabilité chimique (garantir les performances dans la durée), ressourcement écologique des éléments chimiques constitutifs.

## 2.2. Modèles et simulations numériques

L'évolution concomitante des modèles physiques de l'effet magnétocalorique appliqués aux matériaux de second puis de premier ordre (et à d'autres MMC comme les alliages à transition austénite-martensite de Heusler, à transition anti-ferromagnétiques, etc.) et des modèles thermo-fluidiques des échanges thermiques entre les fluides caloporteurs et les MMC des régénérateurs permet d'atteindre aujourd'hui une modélisation très fine et de plus en plus précise des régénérateurs soumis à des cycles AMRR.

### 2.2.1. Modélisation du terme source de l'EMC

Les deux principes thermodynamiques appliqués aux matériaux aimantables (aimantation  $M$  fonction de l'excitation magnétique interne  $H_{int}$ ) conduisent à la formulation bien connue de la puissance magnétocalorique volumique produite au sein d'un MMC de second ordre,

$$\dot{q}_m = -\mu_0 T \left( \frac{\partial M}{\partial T} \right)_{H_{int}} \frac{dH_{int}}{dt} \quad (1)$$

qui constitue le terme-source de l'équation de l'énergie dans la partie solide du régénérateur

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{k_s}{\rho_s c_s} \left( \frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_s}{\partial r^2} \right) + \frac{\dot{q}_m}{\rho_s c_s} \quad (2)$$

dans le cas bidimensionnel d'un régénérateur à plaques ( $x$ , direction axiale ;  $r$  direction transverse, cf. Fig. 1).

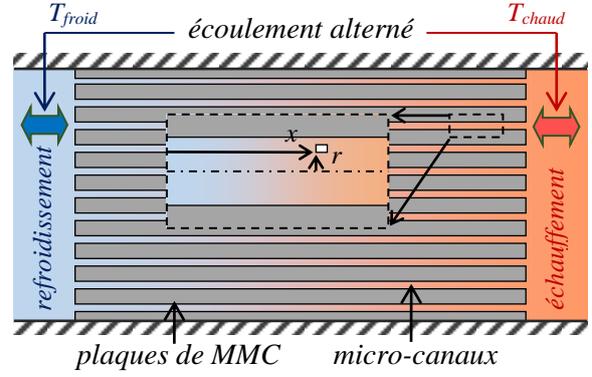


Figure 1 : Régénérateur à plaques étudié.

Le calcul du terme-source (1) à tout instant pendant la transition magnétique et en tout point des plaques (ou des sphères ou des particules) de MMC requiert une grande précision des données magnétiques d'aimantation  $M(H_{int}, T)$  et de capacité thermique  $c_s(H_{int}, T)$  du MMC, particulièrement variables et difficiles à mesurer autour de la température de Curie, nécessitant des temps de calcul très longs et des interpolations rigoureusement posées à chaque pas de temps. De plus, l'effet du champ démagnétisant interne aux MMC doit impérativement être pris en compte dans ce calcul pour éviter les surévaluations irréalistes de l'EMC [15]. C'est la méthode privilégiée à l'Institut FEMTO-ST.

Une méthode plus simple mais moins rigoureuse, fréquemment utilisée pour prendre en compte l'EMC dans les MMC à chaque cycle AMRR, consiste à calculer une élévation théorique de température adiabatique instantanée en chaque point sans échange thermique avec le reste du régénérateur en interpolant leurs courbes expérimentales  $\Delta T_{ad}(H_{int}, T)$  si elles ont été mesurées avec suffisamment de précision, afin de calculer les nouvelles valeurs de la température du MMC juste après aimantation ou désaimantation. Il est aussi possible d'utiliser les courbes d'aimantation  $M(H_{int}, T)$  si elles sont suffisamment précises pour calculer les courbes d'entropie volumique  $S$  du matériau à partir de la relation de Maxwell :

$$\mu_0 \left( \frac{\partial M}{\partial T} \right)_H = \left( \frac{\partial S}{\partial H} \right)_T \Rightarrow S(T, H_{int2}) = S(T, H_{int1}) + \mu_0 \int_{H_1}^{H_2} \left( \frac{\partial M(H_{int}, T)}{\partial T} \right)_{H_{int}} dH_{int} \quad (3)$$

puis de calculer la variation de température isentropique par

$$\Delta T_{ad}(T) = T \left( S(H_{int\max}, T) \right) - T \left( S(H_{int0}, T) \right) \quad (4)$$

ou de résoudre à chaque incrément  $dH_{int}$  l'équation intrinsèque (2) sans pertes conductrices, de la température locale  $T_s(H_{int0})$  à  $T_s(H_{int\max})$  en tout point  $(x, r)$  du MMC.

Une autre approche, également en cours d'élaboration à l'Institut FEMTO-ST pour accélérer le calcul de l'EMC, est basée sur une modélisation quantique fonctionnelle préalable du Hamiltonien magnétique du MMC à partir des couplages des groupements spins atomiques et des spins des électrons itinérants de conduction électrique et thermique entre eux et avec le champ magnétique appliqué pour obtenir l'enthalpie libre magnétique du matériau et en déduire l'aimantation, l'entropie volumique et la capacité thermique magnétique volumique.

## 2.2.2. Modélisation des cycles AMRR

Si les premières générations de simulations numériques appliquaient avec plus ou moins de succès des modèles thermo-fluidiques 1D utilisant des corrélations de transfert thermique classiques unidirectionnelles  $Nu(Re, Pr)$  sans effets d'entrée ou  $Nu_{x/L}(Re_{x/L}, Pr)$  avec effets d'entrée dans les régénérateurs afin de calculer un coefficient d'échange thermique  $h$  entre les plaques MMC et le fluide caloporteur, ou un  $NUT$  global d'échangeur du régénérateur, il est vite apparu qu'elles peinaient à représenter correctement la complexité des échanges thermiques et des écoulements internes pendant les différentes phases des écoulements alternés.

Des modèles thermo-fluidiques 2D puis 3D ont peu à peu vu le jour à partir de 2008 [16] et 2009 [17], respectivement, non seulement pour calculer plus exactement les densités de flux thermiques locales entre les MMC et les écoulements de fluide de transfert sans coefficients d'échange thermique artificiels – difficiles à définir dans les régimes instationnaires quasi-permanents des cycles AMRR – en tenant compte des pertes conductrices internes [18], mais aussi pour étendre les simulations numériques à des conditions imposées plus exigeantes ou innovantes, non encore expérimentées, afin d'explorer de nouvelles pistes de recherche pour la conception de nouveaux régénérateurs beaucoup plus performants dans l'avenir.

Dans cette perspective, le modèle multiphysique [19] élaboré par notre équipe au sein du Département Energie de l'Institut FEMTO-ST, basé sur un modèle thermo-fluidique 2D couplé à une modélisation magnéto-statique par réseau de ré reluctances du banc d'essais magnéto-caloriques complet que nous avons conçu et construit pour tester les performances de divers régénérateurs (Fig. 2), permet effectivement de restituer avec une bonne précision les mesures effectuées avec un régénérateur à plaques de gadolinium d'épaisseur 1 mm et espacées de 0,5 mm, soumises à des cycles AMRR dans le champ magnétique à séquençement trapézoïdal entre 0 et 1 T produit dans l'entrefer de l'électroaimant impulsif du banc [20].



Figure 2 : Banc d'essais magnéto-caloriques, FEMTO-ST, Dpt Energie.

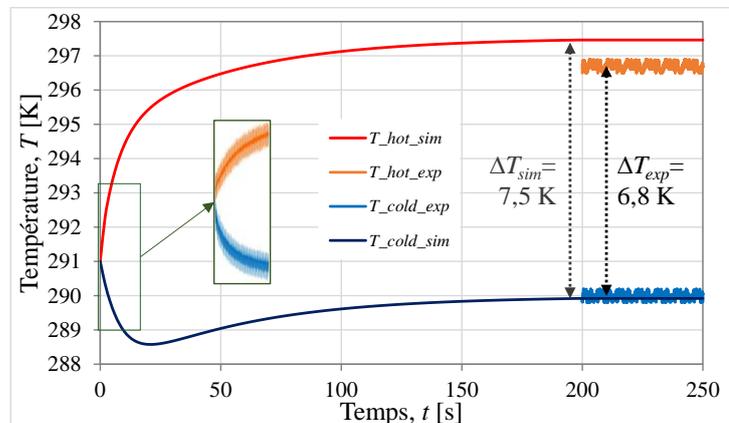


Figure 3 : Température du fluide aux extrémités du régénérateur ( $B = 1 \text{ T}$ ,  $A_0 = 56 \%$ ,  $f = 0,5 \text{ Hz}$ ).

L'évolution simulée et mesurée de l'écart croissant  $\Delta T_{HC} = T_{chaud} - T_{froid}$  des températures du fluide d'échange aux deux extrémités du régénérateur au cours d'un essai de longue durée de cycles AMR à une fréquence d'écoulement trapézoïdal  $f = 0,5 \text{ Hz}$  sont très comparables (Fig. 3). La différence résiduelle inférieure à 9% entre les valeurs de l'écart  $\Delta T_{HC}$  expérimental et simulé atteint à l'équilibre thermique stationnaire est principalement due aux légères pertes thermiques inévitables à travers les isolants entourant le régénérateur.

Depuis peu, l'amélioration des codes de calcul de dynamique des fluides (CFD) permet d'augmenter la précision des simulations des régénérateurs et de prévoir des lois de comportement plus fines et plus proches de la réalité en intégrant les structures complètes des régénérateurs, les séquences réelles des pressions imposées aux extrémités des circuits, les effets des dissipations visqueuses, des instabilités turbulentes et de la distribution du fluide dans les ré-

générateurs à plaques. L'application très récente [21] du code commercial Ansys-Fluent© à un régénérateur à plaques de gadolinium montre cependant un temps de calcul beaucoup plus long que celui des modèles 2D thermo-fluidiques simples et une précision de résultats liée aux conditions imposées aux cycles AMRR (calcul de l'EMC). L'utilisation très récente [22] du solveur libre OpenFOAM de DNS (Direct Numerical Simulation) pour résoudre les équations thermo-fluidiques et magnétiques 3D d'un régénérateur à plaques de gadolinium s'est révélée très efficace pour reproduire les résultats bien établis obtenus par l'équipe de Bahl [23].

Un des axes de recherche en cours de développement au Département Energie de l'Institut FEMTO-ST, dont les résultats seront prochainement publiés, vise précisément à conduire des simulations 2D et 3D des régénérateurs par CFD pour valider les programmes de simulation 1D et 2D déjà mis au point précédemment, et d'explorer de nouvelles formes possibles de régénérateurs micro-structurés permettant d'intensifier les échanges thermiques MMC-fluide.

### 3. Verrous et ruptures technologiques

Après plus de deux décennies d'intenses recherches mondiales, plusieurs verrous scientifiques et technologiques freinent encore le passage rapide vers la compétitivité et la fiabilité des machines magnétocaloriques pour les applications de réfrigération, de climatisation et de chauffage domestiques et industrielles capables de concurrencer favorablement les techniques de froid traditionnelles éprouvées mais insuffisamment efficaces et écologiques.

#### 3.1. Vers des matériaux magnétocaloriques performants et écologiques

La production de MMC à base de terres rares performants mais chers étant particulièrement peu écologique, les recherches s'intensifient pour diminuer très fortement ou totalement leur fraction massique dans les MMC commercialisables en utilisant des métaux de transition  $d$  plutôt que  $f$  car moins chers, plus abondants et de production beaucoup plus écologique, alliés à des éléments non-métalliques courants et abondants pour obtenir des EMC élevés et une bonne résistance mécanique aux cycles de longue durée. D'après les simulations numériques en cours au Département Energie, la limitation de l'EMC des régénérateurs à un seul MMC à une plage restreinte de l'ordre de  $T_c \pm 10$  K peut être levée par des régénérateurs multicouche optimisés à MMC de  $T_c$  croissants, chaque étage produisant un EMC maximal.

Dans cette perspective, le pôle magnétocalorique (Départements DMA, MN2S et Energie) de l'Institut FEMTO-ST développe une technologie éprouvée de fabrication et de tests de composites magnétocaloriques à base de polymères fortement chargés en micro-poudres de La-Fe-Si-H [24] et poursuit intensément les recherches pour leur fabrication additive, en vue de fabriquer et tester facilement des lames de régénérateurs mono- ou multicouche calibrées et micro-structurées à intensification d'échange thermique [25].

#### 3.2. Intensification des échanges thermiques des régénérateurs

Une autre voie d'intensification des échanges thermiques actuellement explorée au sein du Département Energie est le déclenchement de l'effet annulaire découvert par Richardson [26] et Womersley [27]. La résolution analytique des équations thermo-fluidiques et l'analyse d'échelle des écoulements alternés laminaires établis dans des canaux rectangulaires de régénérateurs à gradient thermique en régime instationnaire puis harmonique [28] a permis de montrer en effet l'apparition de couches limites dynamiques et thermiques annulaires près des parois, inversées et déphasées par rapport à l'écoulement central (Fig. 4), au-dessus d'un nombre critique adimensionnel de Womersley  $Re_\omega = 2^{-1/2} \pi \approx 2,22$ , induisant une forte augmentation des flux thermiques entre les plaques de MMC et le fluide, possiblement exploitables pour l'intensification des transferts thermiques, particulièrement intéressante dans le cas d'écoulements à séquence trapézoïdale (rampes linéaires – arrêts courts, cf. Fig. 5).

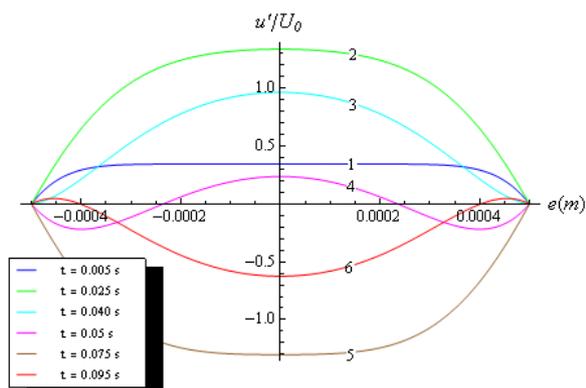


Figure 4 : Profil dynamique adimensionnel annulaire de l'écoulement (eau,  $Re_\omega = 7,9$ )

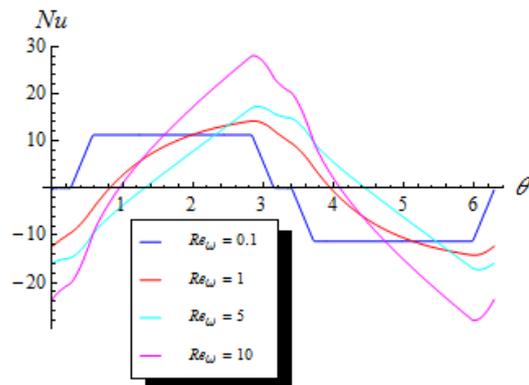


Figure 5 : Intensification des échanges en écoulement trapézoïdal (eau,  $Re_\omega = 7,9$ )

## 4. Conclusion

Les recherches magnétocaloriques actuelles dans le monde progressent rapidement vers l'émergence des technologies de froid magnétique domestique et industriel. Les résultats des travaux en cours à l'Institut FEMTO-ST visent à identifier et lever les verrous scientifiques limitant encore les performances des régénérateurs magnétocaloriques en explorant plusieurs ruptures technologiques dans les écoulements alternés, la structure et les matériaux.

## Références

- [1] G.V. Brown, Practical and efficient magnetic heat pump, *NASA Tech. Brief 3* (1976), 190-191.
- [2] S.S. Rosenblum, W.A. Steyert, W.P. Pratt Jr, A continuous magnetic refrigerator operating near room temperature, *CIC-14 Report Collection LA-6581* (1977).
- [3] P. Ehrenfest, Phasenumwandlungen im ueblichen und erweiterten Sinn, classiziert nach den entsprechenden Singularitaeten des thermodynamischenPotentiales, *Proc. Royal Acad. Amsterdam*, 36 (1933), 153-157.
- [4] V.K. Pecharsky, K.A. Gschneider Jr, Giant Magnetocaloric Effect in  $Gd_5(Si_2Ge_2)$ , *Phys. Rev. Lett.*, 78(23) (1997), 4494-4497.
- [5] S.Y. Dan'kov, A.M. Tishin, Pecharsky, K.A. Gschneider Jr, Magnetic phase transitions and the magnetothermal properties of gadolinium, *Phys. Rev. B*, 57(6) (1998), 3478-3490.
- [6] V.K. Pecharsky, K.A. Gschneider Jr, Magnetocaloric effect from indirect measurements: Magnetization and heat capacity, *J. Applied Phys.*, 86(1) (1999), 565-575.
- [7] A.M. Tishin, Y.I. Spichkin, *The magnetocaloric effect and its applications*, Bristol and Philadelphia, IOP (2003).
- [8] B. Yu, M. Liu, P. W. Egolf, A. Kitanovski, A review of magnetic refrigerator and heat pump prototypes built before the year 2010, *Int. J. Refrig.* 33 (2010), 1029-1060.
- [9] C. Zimm, A. Jastrab, A. Stemberg, V. Pecharski, K. Gschneidner Jr., M. Osborne, I. Anderson, Description and performance of a near-room temperature magnetic refrigerator, *Adv. Cryog. Eng.*, 43 (1998), 1759-1766.
- [10] C.R.H. Bahl, K. Engelbrecht, D. Eriksen, J.A. Lozano, R. Bjørk, J. Geyti, K.K. Nielsen, A. Smith, N. Pryds, Development and experimental results from a 1 kW prototype AMR, *Int. J. Refrig.*, 37 (2014), 78-83.
- [11] C. Zimm, A. Boeder, J. Chell, A. Sternberg, A. Fujita, S. Fujieda, K. Fukamichi, Design and performance of a permanent-magnet rotary refrigerator, *Int. J. Refrig.*, 29 (2006), 1302-1306.

- [12] S. Jacobs, J. Auringer, A. Boeder, J. Chell, L. Komorowski, J. Leonard, S. Russek, C. Zimm, The performance of a large-scale rotary magnetic refrigerator, *Int. J. Refrig.*, 37 (2014), 84-91.
- [13] S. Lionte, M. Risser, C. Muller, A 15kW magnetocaloric proof-of-concept unit: Initial development and first experimental results, *Int. J. Refrig.*, 122 (2021), 256-265.
- [14] T. Gottschall, K.P. Skokov, M. Fries, A. Taubel, I. Radulov, F. Scheibel, D. Benke, S. Riegg, O. Gutfleisch, Making a cool choice: the materials library of magnetic refrigeration, *Adv. Energy Mater.*, 9 (2019), 1901322.
- [15] A. Mira, T. de Larochelambert, C. Espanet, S. Giurgea, P. Nika, C.R.H. Bahl, R. Bjørk, K.K. Nielsen, Influence of magnetization on the applied magnetic field in various AMR regenerators. *J. Appl. Phys.*, 122 (2017), 133901.
- [16] J. Bouchard, H. Nesreddine, N. Galanis, Model of a porous regenerator used for magnetic refrigeration at room temperature, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 52 (2009), 1223-1229.
- [17] T.F. Petersen, N. Pryds, A. Smith, J. Hattel, H. Schmidt, H. Knudsen, Two-dimensional mathematical model of a reciprocating room-temperature active magnetic regenerator, *Int. J. Refrig.*, 31 (2008), 432-443.
- [18] J. Tusek, A. Sarlah, S. Zupan, I. Prebil, A. Kitanovski, A. Poredos, A numerical optimization of a packed bed AMR, *IIR - 4<sup>th</sup> Int. Conf. Magn. Refrig. at Room Temp.* (2010).
- [19] Y. You, W. Wu, S. Xiao, H. Li, X. Xu, A comprehensive two-dimensional numerical study on unsteady conjugate heat transfer in magnetic refrigerator with Gd plates, *Int. J. Refrigeration*, 79 (2017), 217-225.
- [20] A. Plait, T. de Larochelambert, S. Giurgea and C. Espanet, Low computational cost semi-analytical magnetostatic model for magnetocaloric refrigeration systems, *AIP Adv.* 8 (2018), 095204.
- [21] A. Plait, T. de Larochelambert, S. Giurgea and C. Espanet, Experimental validation of a Multiphysics modelling for a magnetocaloric bench, (2021), soumis.
- [22] I. Mugica, S. Ponceta, J. Bouchard, An open-source DNS solver for the simulation of Active Magnetocaloric Regenerative cycles, *Appl. Thermal Eng.*, 141 (2018), 600-616.
- [23] C.R.H. Bahl, T.F. Petersen, N. Pryds, A. Smith, A versatile magnetic refrigeration test device. *Rev. Sci. Instrum.*, 79(9) (2008), 093906.
- [24] J. Lanzarini, T. Barriere, M. Sahli, J-C. Gelin, A. Dubrez, C. Mayer, M. Pierronnet, P. Vikner, Thermoplastic filled with magnetocaloric powder, *Mat. Design.*, 87 (2015), 1022-1029.
- [25] K.D. N'dri, N. Charpentier, L. Hirsinger, A. Gilbin, T. Barriere, Preliminary rheological study of highly loaded composites by La(Fe,Si)<sub>13</sub>H powder for additive manufacturing applications, (2021), soumis.
- [26] E.G. Richardson, E. Tyler, The transverse velocity gradient near the mouth of pipe in which an alternating or continuous flow of air is established, *Proc. Phys. Soc. London*, 42 (1929), 1-15.
- [27] J.R. Womersley, Oscillatory motion of a viscous liquid in a thin-walled elastic tube - I: the linear approximation for long waves, *Phil. Mag. Series*, 7(46) (1955), 199-221.
- [28] T. de Larochelambert, P. Nika, Analytical heat transfer and friction assessment of alternating incompressible flows between parallel plates - I: Transient flows, II: Phase lags, scale analysis and annular effect, (2021), soumis.

## Remerciements

Ce travail a été soutenu par l'EIPHI Graduate School (contract ANR-17-EURE-0002) et la Région Bourgogne Franche-Comté.