

Étude Bibliographique des Dispositifs Expérimentaux pour la Réfrigération Magnétique.

Review of experimental devices for the magnetic refrigeration.

Julien EUSTACHE*, Antony PLAIT, Frédéric DUBAS, Raynal GLISES

FEMTO-ST Institute, Univ. Bourgogne Franche-Comté, CNRS, Belfort, France

* julien.eustache@femto-st.fr; 06.44.27.87.47

Résumé – Au cours des dernières années, l'intérêt de la recherche pour la magnétocalorie n'a cessé de croître. Cette technologie se place comme une alternative aux dispositifs de climatisation classique. En conséquence, de nombreux prototypes ont été conçus afin de proposer des alternatives viables. Dans ce papier, une étude bibliographique des dispositifs de réfrigération magnétique a été réalisée. Cette revue a pour but de faire un historique synthétique des dispositifs de réfrigération magnétique réalisés en se concentrant sur les plus performants, afin d'en extraire une conception optimale.

Mots-clés : Effet magnétocalorique ; Réfrigération magnétique ; Dispositifs expérimentaux ; Étude bibliographique.

Abstract – Conventional refrigeration systems based on vapor-compression cycles are mature and reduced in cost. However, they reached their technological limits. Moreover, they use harmful refrigerant gases for the environment. New technological devices using the magnetocaloric effect have been carried out to provide a sustainable alternative. The interest of this ecological technology strongly increased during the last thirty years. This review of magnetic refrigeration devices is performed to describe current systems and their performances, in order to suggest an optimal design.

Keywords: Magnetocaloric effect; Magnetic refrigeration; Experimental apparatus; Literature review.

Nomenclature

<i>EMC</i>	Effet magnétocalorique	<i>MMC</i>	Matériau magnétocalorique
<i>Gd</i>	Gadolinium		

1. Introduction

Dans le contexte actuel du dérèglement climatique et de la préservation de la couche d'ozone, il est devenu nécessaire de trouver une alternative aux systèmes de climatisation classique utilisant des fluides frigorigènes extrêmement nocifs. La réfrigération magnétique est une des solutions de remplacement des systèmes classiques. Cette technologie est basée sur l'effet magnétocalorique (EMC) qui se traduit par une variation de température de certains matériaux lorsqu'ils sont soumis à une variation temporelle du champ magnétique. La réfrigération magnétique présente plusieurs avantages comme une meilleure efficacité par rapport aux cycles thermodynamiques multi-thermes, une absence de bruit et de polluants atmosphériques [1]. Pour ces raisons, depuis quelques dizaines d'années, l'intérêt pour cette technologie a fortement augmenté [2]. En conséquence, de nombreux prototypes ont été conçus afin de proposer des alternatives viables. Cependant, cette technologie nécessite encore des améliorations afin de pouvoir être commercialisée à grande échelle, notamment dans des applications fonctionnant à température ambiante. Des recherches sont donc menées afin de trouver des matériaux magnétocaloriques (MMC) ou des alliages plus performants. Il convient également d'augmenter l'induction magnétique à moindre coût, ainsi que d'optimiser les échanges de chaleur entre le matériau et le fluide caloporteur.

Dans cet article, nous proposons de faire une synthèse des prototypes utilisés pour la réfrigération magnétique. Nous reviendrons sur la composition de certains dispositifs ainsi que sur leurs performances.

2. Découvertes de l'EMC et premiers prototypes

2.1. Description de l'EMC

La première observation d'un phénomène thermomagnétique a été faite par Gilbert en 1600 [3]. Le phénomène sera ensuite mis en évidence en 1881 par Warburg [4]. Quelques années plus tard, les tous premiers prototypes imaginés furent ceux de Stefan [5] et Tesla [6] en 1889 puis Edison en 1890 [7]. Il faudra ensuite attendre 1918 pour que Weiss et Picard [8] mettent en avant la réversibilité de l'EMC, ce qui marquera le point de départ de la création de nombreux prototypes. Cet effet a déjà été décrit à de nombreuses reprises dans la littérature [9]. Le phénomène se traduit par une augmentation de la température d'un matériau paramagnétique lorsqu'il est soumis à un champ magnétique. En effet, l'ordre engendré par l'alignement des moments magnétiques des spins atomiques du matériau est compensé par une augmentation de l'agitation moléculaire et donc de la température.

Ce phénomène est réversible, puisqu'une fois le matériau retiré du champ magnétique, celui-ci se désaimante. Ce phénomène est maximal quand il est exploité aux alentours de la température (ou point) de Curie du matériau. Le matériau le plus utilisé dans le domaine de la réfrigération magnétique à température ambiante est le Gadolinium (Gd). Celui-ci présente de bonnes caractéristiques avec un écart de température d'environ 3 K pour une induction magnétique appliquée de 1 T. De plus, sa température de Curie est de 293 K. Afin d'exploiter au mieux cet effet, il est nécessaire de concevoir des dispositifs capables de générer des cycles d'aimantation et de désaimantation. De nos jours, le MMC se comporte le plus souvent comme un régénérateur et réalise des échanges thermiques avec un fluide caloporteur qui circule entre une source chaude et une source froide. On parle alors de cycles de réfrigération magnétique active à régénération [10]. Ces cycles permettent de créer un gradient au sein même du MMC et d'accroître l'écart de température entre les sources de chaleur.

2.2. Dispositifs fonctionnant à basse température

Les premières applications utilisant l'EMC sont des dispositifs permettant d'atteindre des températures proches du 0 K et fonctionnant à basse température. En effet, Debye démontre en 1926 qu'il est possible d'atteindre des températures d'échantillon inférieures à 1 K [11]. À partir de cette date, de nombreuses applications dans le froid magnétique voient le jour.

L'un des premiers systèmes fut celui de Giaque et MacDougall en 1933 [12]. Ils proposèrent un dispositif capable d'atteindre des températures proches du 0 K en utilisant un champ magnétique de 0,8 T et grâce à la désaimantation adiabatique d'un sel paramagnétique de $Gd_2(SO_4)_3$. Avec cette méthode, ils atteignent des températures de 0,53 K, 0,34 K et 0,25 K en partant respectivement de 3,4 K, 2 K et 1,5 K en utilisant de l'hélium liquide.

Plus tard, en 1951, Darby *et al.* [13] proposeront le premier prototype avec un régénérateur magnétocalorique à deux étages. Les matériaux utilisés possèdent des points de Curie différents. Ils réussissent à atteindre avec ce système une température de 3 mK pour une induction de 0,42 T. Suite à cette recherche, de nombreux prototypes possédant des régénérateurs à points de Curie multiples ont été conçus.

En 1966, Van Geuns [14] propose de réaliser des dispositifs fonctionnant au-delà de 1 K. Il utilise un cycle à régénération passive entre 1 K et 20 K avec de l'hélium comme fluide

caloporteur et servant de régénérateur thermique. Par la suite, la réfrigération magnétique a de plus en plus été utilisée dans des dispositifs de réfrigération et de pompes à chaleur, travaillant à température ambiante.

3. Dispositifs pour la réfrigération magnétique à température ambiante

À ce jour, de nombreuses revues sur les dispositifs magnéto-caloriques sont disponibles. L'une des premières fut celle faite par Barclay en 1988 dans laquelle l'auteur classe les dispositifs précédemment réalisés par plage de température de fonctionnement [15]. En 2010, Yu *et al.* [16] réalise une revue sur les prototypes de réfrigérateur magnétique et les pompes à chaleur réalisés avant 2010. Récemment, d'autres revues sur des dispositifs ont été faites par : Trevizoli *et al.* en 2016 [17], Zimm *et al.* en 2018 [18], ou encore Greco *et al.* [19] et Plait [20] en 2019. Dans cet article, nous détaillons pour chaque dispositif la source de champ magnétique utilisée et son induction maximale, la composition du régénérateur (MMC et fluide caloporteur) ainsi que les performances obtenues.

3.1. Description et performances des dispositifs à température ambiante

Nous considérons les performances d'un dispositif comme étant l'écart de température et la puissance de réfrigération qu'il est capable de générer.

C'est en 1976 que Brown proposa le premier dispositif fonctionnant à température ambiante [21]. Il utilise du Gd en lui faisant subir des aimantations et des désaimantations adiabatiques dans un cycle à régénération passive. Il réussit à atteindre un écart de température de 47 K grâce à un champ magnétique de 7 T généré par une bobine supraconductrice. En 1978, Brown présenta un nouveau dispositif capable d'atteindre un écart de température entre les sources de 80 K en utilisant des cycles de Stirling [22]. La même année, Steyert propose un dispositif rotatif pour la réfrigération magnétique à température ambiante où pour la première fois le MMC est utilisé comme régénérateur magnétique actif. Le fluide caloporteur utilisé est de l'eau [23]. Par la suite, en 1982, Barclay et Steyert travaillèrent sur d'autres dispositifs reposants sur le même principe que [10] et [24].

En 1990, Green *et al.* ont développé un dispositif avec un régénérateur multi-couches de Tb et GdTb [25]. Grâce à une bobine supraconductrice générant un champ magnétique de 7 T, et en utilisant de l'azote gazeux, ils réussissent à atteindre un écart de température de 24 K.

La découverte en 1997 de l'EMC géant dans le $Gd_5(Si_2Ge_2)$ par Pecharsky et Gschneider, a permis d'avoir par la suite des prototypes avec de meilleures performances [26]. En effet, le choix du type de matériau est un facteur très important dans les performances d'un dispositif et cette découverte va permettre de populariser l'intérêt de la recherche pour cette technologie [2]. Après une succession de cycles, un gradient de température s'établit dans le régénérateur dans le sens de circulation du fluide caloporteur. Il est intéressant pour cela, d'avoir des régénérateurs à points de Curie multiples afin d'augmenter les performances.

Plus tard, en 1998, Zimm *et al.* [27] ont réussi à concevoir un dispositif capable de générer une puissance de refroidissement allant jusqu'à 600 W pour un écart de température de 10 K (Figure 1). Pour cela, ils ont utilisé 3 kg de Gd sous forme de sphères de 0,15 à 0,3 mm de diamètre avec un champ magnétique de 5 T généré par des aimants supraconducteurs qui nécessitent d'être refroidis. L'hélium liquide est ici utilisé comme fluide caloporteur.

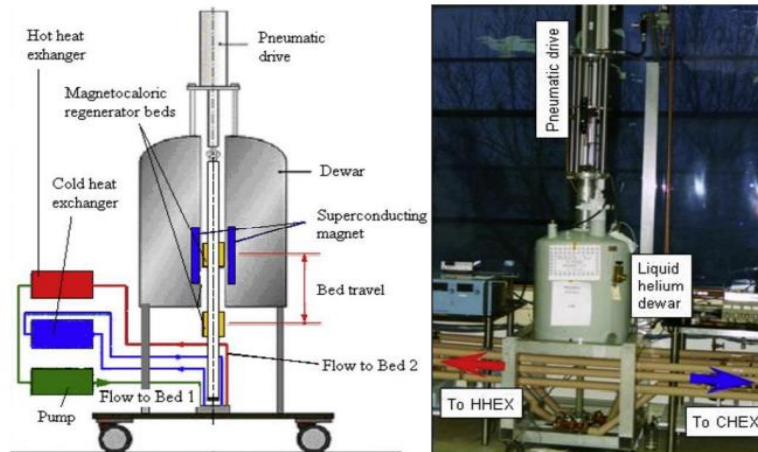


Figure 1 : Schéma de fonctionnement et photo du dispositif du dispositif de Zimm et al. [27]

En 2002, Hirano *et al.* [28] développent un dispositif de réfrigération magnétique à base de sphères de Gd aimantées par des aimants supraconducteurs produisant un champ de 4 T. Ils obtiennent une puissance de refroidissement de 100 W pour un écart de température de 23 K.

En 2006, Vasile et Muller [29] présentent un dispositif de réfrigération magnétique à base de plaques de Gd et d'eau, capable d'atteindre un écart de température de 14 K ainsi que 360 W de puissance de refroidissement. Le champ magnétique est généré par des aimants permanents NdFeB qui permettent de générer jusqu'à 1,9 T dans l'entrefer sans avoir besoin de les refroidir.

Au cours de la même année, Yao *et al.* [30] développent un dispositif à base d'aimants permanents pouvant générer un champ magnétique d'environ 1,5 T et un régénérateur constitué de particules de Gd. Ils étudient également l'influence de la pression de l'hélium sur les performances de leur système. Ils obtiennent finalement une puissance de refroidissement de 51,3 W pour un écart de température de 18,2 K. Un écart maximum de température de 42,3 K est également atteint.

En 2011, Rowe et Tura proposent un dispositif à base d'aimants permanents générant un champ magnétique de 1,4 T avec un régénérateur composé de sphères de Gd et d'hélium. Ils réussissent alors à atteindre une température maximum de 29 K et une puissance de refroidissement de 50 W avec ce dispositif [31].

En 2012, Kieffer réalisa un dispositif de refroidissement magnétique à actionneur intégré utilisant des plaques de Gd [32]. Son dispositif est destiné à une application de climatisation automobile dont la particularité réside dans son architecture originale. Le dispositif est un actionneur à rotor externe. Des électroaimants au stator mettent en rotation des aimants permanents rotatifs positionnés en structure de Halbach qui génèrent une induction d'environ 0,6 T dans le régénérateur. Le régénérateur est situé dans un second entrefer à l'extérieur du rotor.

En 2014, le dispositif de Jacobs *et al.* est l'un des dispositifs les plus performant permettant d'atteindre une puissance de refroidissement d'environ 2,5 kW, pour un écart de température de 11 K (Figure 2 et Figure 3) [33]. Un champ magnétique de 1,44 T est généré par des aimants permanents NdFeB, appliqué à un matériau composé de LaFeSiH. Le fluide caloporteur est de l'eau.



Figure 2 : Photo du dispositif de Jacobs et al. [33]

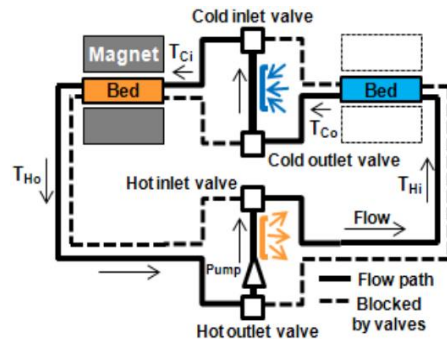


Figure 3 : Schéma de fonctionnement du dispositif de Jacobs et al. [33]

Au cours de la même année, Mira propose un dispositif de réfrigération magnétique actif complet [34]. Ce dispositif est amélioré par Plait en 2019 [20]. Le régénérateur composé de plaques de Gd est placé au centre d'un entrefer de 2,1 cm traversé par un champ magnétique de 1 T généré par un électroaimant, avec du Zitrec comme fluide caloporteur. Le dispositif (Figure 4) atteint un écart de température de près de 7 K entre les extrémités du régénérateur.

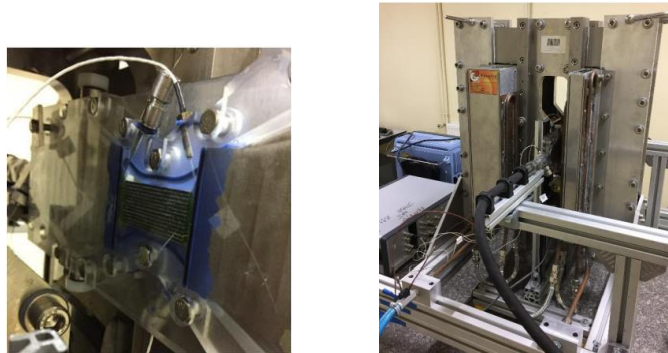


Figure 4 : Photo du dispositif de Mira [34] et Plait [20]

En 2018, Chaudron *et al.* [35] ont vraisemblablement développé le plus grand réfrigérateur magnétique rotatif à ce jour (Figure 5). Ce prototype de *Cooltech Applications* est capable de générer des puissances de refroidissement de 15 kW pour un écart de température de 20 K avec une induction magnétique de 1,34 T au sein du régénérateur. La source de champ magnétique correspond à des aimants permanents NdFeB. Le régénérateur a été conçu pour recevoir plusieurs matériaux constitués de Gd et d'alliage à base de Gd présentant 5 températures de Curie différentes afin d'augmenter les performances. L'eau est utilisée comme fluide caloporteur. Ils mettent également en avant l'intérêt d'avoir de grands aimants permanents afin de générer un champ magnétique plus homogène.



Figure 5 : Photo du « BUA » le dispositif grande échelle de Chaudron et al. [35]

3.2. Description d'une conception optimale

Cette étude nous permet de comprendre quelles sont les conditions à réunir pour qu'un dispositif magnéto-calorique puisse présenter de bonnes performances.

Concernant le fluide caloporteur, l'utilisation simple de l'eau est la plus répandue. Cependant, il est souvent nécessaire d'ajouter des additifs anticorrosion afin de prolonger la durée de vie du dispositif.

Concernant la source de champ magnétique, l'utilisation des aimants permanents est préférable à celle des électroaimants. En effet, il est souvent nécessaire d'ajouter un dispositif externe de refroidissement pour éviter l'échauffement des bobines supraconductrices, diminuant ainsi l'efficacité globale du système. L'utilisation d'un électroaimant oblige également le système à fonctionner à plus basse fréquence, les montées en induction magnétique étant moins rapides par rapport à un aimant permanent qui opérerait des mouvements rotatifs ou linéaires pour s'aligner avec le MMC. Les performances seront également impactées par l'intensité de l'induction magnétique qui va traverser le matériau, d'où l'utilisation fréquente d'aimants permanents disposés en réseau de Halbach pour des applications à température ambiante ou d'aimants supraconducteurs pour des applications à plus basse température. Il faut aussi maximiser les échanges de chaleur entre le MMC et le fluide caloporteur au sein du régénérateur, en agissant en amont sur la forme du matériau puis sur la fréquence de fonctionnement (≤ 10 Hz) et le taux de balayage du fluide.

Pour la forme du matériau, les géométries en plaques parallèles et en lit de particules sont les plus utilisées et permettent d'avoir de meilleurs échanges de chaleur. Pour le choix du type de matériau, en raison de l'installation d'un gradient de température dans l'axe d'écoulement du fluide caloporteur, l'EMC va varier le long du matériau. Il est donc préférable d'utiliser des régénérateurs à températures de Curie multiples offrant de meilleures performances. Le matériau le plus souvent utilisé pour les applications à température ambiante est le Gd. Cependant, il n'est pas assez performant pour produire un EMC suffisant qui permettrait d'avoir des prototypes compacts qui puissent concurrencer les dispositifs classiques.

Les dispositifs de Jacobs et de Chaudron remplissent un grand nombre de conditions permettant d'obtenir de hautes performances. En revanche, en raison de leur encombrement conséquent, il est primordial de trouver de nouveaux matériaux générant de plus grands EMC.

4. Conclusion et perspectives

Au regard des dispositifs étudiés, plusieurs éléments sont encore à améliorer et à approfondir :

- La recherche de nouveaux MMC plus performants ;
- L'optimisation des sources de champ magnétique (aimants permanents, bobines supraconductrices ou électroaimants) pour maximiser l'intensité et l'homogénéité de l'induction magnétique appliquée aux MMC ;
- Le contrôle de la fréquence et du taux de balayage des écoulements pour maximiser l'efficacité des échanges de chaleur entre le régénérateur et le fluide caloporteur ;
- Le développement de modèles multi-physiques (semi-)analytiques ou numériques pour réaliser des études de conception en amont sur la faisabilité et l'efficacité des systèmes.

Beaucoup de progrès sont donc attendus afin de permettre à cette technologie de concurrencer les dispositifs actuels de climatisation. Même si certains dispositifs présentent de bonnes performances et peuvent être envisagés dans des applications spécifiques, la majorité se consacre à des applications plus répandues comme par exemple la climatisation automobile. Le

prix, l'encombrement, la production en nombre et la fiabilité sont autant de paramètres qu'il faut réunir pour obtenir un dispositif utilisable massivement. Souvent les dispositifs n'arrivent à atteindre les performances attendues qu'à l'aide des simulations réalisées en amont. Dans ce sens, une approche par modélisation 3-D, limitant les hypothèses trop simplificatrices aide à définir le dispositif à choisir de manière optimale.

Références

- [1] A. Lebouc, F. Allab, J.-M. Fournier, and J.-P. Yonnet, « Réfrigération magnétique », pp. 16, janv. 2005.
- [2] K. A. Gschneidner and V. K. Pecharsky, « Thirty years of near room temperature magnetic cooling: Where we are today and future prospects », *International Journal of Refrigeration*, vol. 31, n° 6, pp. 945- 961, sept. 2008, doi: 10.1016/j.ijrefrig.2008.01.004.
- [3] W. Gilbert, « On the loadstone and Magnetic Bodies and on The Great Magnet the Earth », Wiley, New York, 1893.
- [4] E. Warburg, « Magnetische Untersuchungen Annalen der Physik », 1881.
- [5] J. Stefan, « Ueber thermomagnetische Motoren », *Ann. Phys.*, vol. 274, n° 11, pp. 427- 440, 1889, doi: 10.1002/andp.18892741107.
- [6] N. Tesla, « Thermo magnetic motor », n° Patent No. 396, 121, janv. 1889.
- [7] T. Edison, « Pyromagneto electric generator », n° Patent No. 428, 057, mai 1890.
- [8] P. Weiss and A. Piccard, « Le phénomène magnétocalorique », *J. Phys. Theor. Appl.*, vol. 7, n° 1, pp. 103- 109, janv. 1917, doi: 10.1051/jphystap:019170070010300.
- [9] A. M. Rowe and J. A. Barclay, « Ideal magnetocaloric effect for active magnetic regenerators », *Journal of Applied Physics*, vol. 93, n° 3, pp. 1672- 1676, févr. 2003, doi: 10.1063/1.1536016.
- [10] J. A. Barclay and W. A. Steyert, « Active Magnetic Regenerator », p. 11, juin 1982.
- [11] P. Debye, « Einige Bemerkungen zur Magnetisierung bei tiefer Temperatur », *Ann. Phys.*, vol. 386, n° 25, pp. 1154- 1160, 1926, doi: 10.1002/andp.19263862517.
- [12] W. F. Giauque and D. P. MacDougall, « Attainment of Temperatures Below 1° Absolute by Demagnetization of $Gd_2(SO_4)_3 \cdot 8H_2O$ », *Phys. Rev.*, vol. 43, n° 9, pp. 768- 768, mai 1933, doi: 10.1103/PhysRev.43.768.
- [13] J. Darby, J. Hatton, B. V. Rollin, E. F. W. Seymour, et H. B. Silsbee, « Experiments on the Production of Very Low Temperatures by Two-Stage Demagnetization », *Proc. Phys. Soc. A*, vol. 64, n° 10, pp. 861- 867, oct. 1951, doi: 10.1088/0370-1298/64/10/301.
- [14] J. R. Van Geuns, « Study of a new magnetic refrigeration cycle. », Univ. of Leiden, 1966.
- [15] J. A. Barclay, « Magnetic Refrigeration: A Review of a Developing Technology », in *Advances in Cryogenic Engineering*, vol. 33, R. W. Fast, Éd. Boston, MA: Springer US, 1988, pp. 719- 731.
- [16] B. Yu, M. Liu, P. W. Egolf, et A. Kitanovski, « A review of magnetic refrigerator and heat pump prototypes built before the year 2010 », *International Journal of Refrigeration*, vol. 33, n° 6, p. 1029- 1060, sept. 2010, doi: 10.1016/j.ijrefrig.2010.04.002.
- [17] P. V. Trevizoli, Theodor V. Chistiaanse, Premakumara Govindappa, Iman Niknia, Reed Teyber, Jader R. Barbosa and A. Rowe., « Magnetic heat pumps: An overview of design principles and challenges », *Science and Technology for the Built Environment*, vol. 22, n° 5, pp. 507- 519, juill. 2016, doi: 10.1080/23744731.2016.1171632.
- [18] C. Zimm, A. Boeder, B. Mueller, K. Rule, et S. L. Russek, « The evolution of magnetocaloric heat-pump devices », *MRS Bull.*, vol. 43, n° 4, pp. 274- 279, avr. 2018, doi: 10.1557/mrs.2018.71.

- [19] A. Greco, C. Aprea, A. Maiorino, and C. Masselli, « A review of the state of the art of solid-state caloric cooling processes at room-temperature before 2019 », *International Journal of Refrigeration*, vol. 106, pp. 66- 88, oct. 2019, doi: 10.1016/j.ijrefrig.2019.06.034.
- [20] A. Plait, « Modélisation multiphysique des régénérateurs magnétocaloriques », Thesis, Université Bourgogne Franche-Comté, 2019.
- [21] G. V. Brown, « Magnetic heat pumping near room temperature », *Journal of Applied Physics*, vol. 47, n° 8, p. 3673- 3680, août 1976, doi: 10.1063/1.323176.
- [22] G. V. Brown, « Magnetic Heat Pumping », n° Patent No. 4,069,028, pp. 9, janv. 1978.
- [23] W. A. Steyert, « Stirling- cycle rotating magnetic refrigerators and heat engines for use near room temperature », *Journal of Applied Physics*, vol. 49, n° 3, pp. 1216- 1226, mars 1978, doi: 10.1063/1.325009.
- [24] J. A. Barclay, « The theory of active magnetic regenerative refrigerator », p. 15, janv. 1982.
- [25] [G. Green, J. Chafe, J. Stevens, and J. Humphrey, « A gadolinium-terbium active regenerator », *Advances in Cryogenic Engineering*, vol. 35, pp. 1165- 1174, 1990, doi: 10.1007/978-1-4613-0639-9_140.
- [26] V. K. Pecharsky and K. A. Gschneidner, Jr., « Giant Magnetocaloric Effect in $Gd_5(Si_2Ge_2)$ », *Phys. Rev. Lett.*, vol. 78, n° 23, pp. 4494- 4497, juin 1997, doi: 10.1103/PhysRevLett.78.4494.
- [27] C. Zimm, A. Jastrab, A. Stemberg, V. Pecharski, K. Gschneidner Jr, M. Osborn, and I. Anderson., « Description and Performance of a Near-Room Temperature Magnetic Refrigerator », in *Advances in Cryogenic Engineering*, P. Kittel, Éd. Boston, MA: Springer US, 1998, pp. 1759- 1766.
- [28] N. Hirano, S. Nagaya, M. Takahashi, T. Kuriyama, K. Ito, and S. Nomura, « Development of magnetic refrigerator for room temperature application », in *AIP Conference Proceedings*, Madison, Wisconsin (USA), mai 2002, vol. 613, pp. 1027- 1034, doi: 10.1063/1.1472125.
- [29] C. Vasile and C. Muller, « Innovative design of a magnetocaloric system », *International Journal of Refrigeration*, vol. 29, n° 8, pp. 1318- 1326, déc. 2006, doi: 10.1016/j.ijrefrig.2006.07.016.
- [30] G. H. Yao, M. Q. Gong, and J. F. Wu, « Experimental study on the performance of a room temperature magnetic refrigerator using permanent magnets », *International Journal of Refrigeration*, vol. 29, n° 8, pp. 1267- 1273, déc. 2006, doi: 10.1016/j.ijrefrig.2006.07.010.
- [31] A. Tura and A. Rowe, « Permanent magnet magnetic refrigerator design and experimental characterization », *International Journal of Refrigeration*, vol. 34, n° 3, pp. 628- 639, mai 2011, doi: 10.1016/j.ijrefrig.2010.12.009.
- [32] C. Kieffer, « Conception optimale d'un système de refroidissement magnétocalorique à actionneur intégré : Application à la climatisation automobile », Université de Franche-Comté, 2012.
- [33] S. Jacobs, J. Auringer, A. Boeder, J. Chell, L. Komorowski, J. Leonard, S. Russek and C. Zimm., « The performance of a large-scale rotary magnetic refrigerator », *International Journal of Refrigeration*, vol. 37, pp. 84- 91, janv. 2014, doi: 10.1016/j.ijrefrig.2013.09.025.
- [34] A. Mira, « Modélisation et conception optimale d'un système de réfrigération magnétocalorique - Application à la réfrigération automobile », Université de Franche-Comté, 2015.
- [35] J-B. Chaudron, C. Muller, M. Hittinger and S. Lionte., « Performance measurements on a large-scale magnetocaloric cooling application at room temperature. » *International Institute of Refrigeration (IIR)*, sept. 2018, doi: 10.18462/IIR.THERMAG.2018.0022.

Remerciements

This work has been supported by the EIPHI Graduate School (contract ANR-17-EURE-0002), and the Region Bourgogne-Franche-Comté.