

RÉFRIGÉRATION MAGNÉTIQUE

Peter W. Egolf, Andrej Kitanovski, Fabrice Gendre, Osmann Sari

Haute Ecole Spécialisée de Suisse occidentale

Ecole d'ingénieurs du Canton de Vaud

CH 1401 Yverdon-les-Bains, Suisse

Peter.egolf@eivd.ch

RÉSUMÉ

Durant les dernières décennies, les découvertes de nouveaux alliages magnéto-caloriques réfrigérants à haute température de Curie T_c et immenses effets magnéto-caloriques (MCE) ont conduit aux premiers essais de laboratoire de la réfrigération magnétique à température ambiante. De tels développements conduiront à de nouvelles technologies applicables dans les domaines des microtechnologies, processus industriels, systèmes CVC, réfrigérateurs, pompes à chaleur et touchant les industries automobiles, ferroviaires, aéronautiques et aérospatiales. Le problème des émissions de réfrigérants conventionnels (par exemple : CFC et HCFC), qui sont utilisés dans les machines de réfrigération usuelles, pourrait être ainsi complètement résolu par un remplacement au profit de nouveaux systèmes de réfrigération magnétiques. Dans cet article la genèse du refroidissement magnétique est brièvement résumée et une invention du Laboratoire de génie thermique de la Haute Ecole Spécialisée de Suisse occidentale est présentée en détail. Le principe de fonctionnement du nouveau réfrigérateur est basé sur la technologie des échangeurs de régénération rotatifs qui est appliquée avec succès depuis fort longtemps dans le domaine CVC à des fins de récupération de chaleur et d'humidité.

1. INTRODUCTION

En 1881, Warburg découvrit l'effet magnéto-calorique. Il observa une élévation de température d'un échantillon de fer lorsque celui-ci était introduit dans un champ magnétique et une chute de température lorsqu'il en était retiré [1]. En 1926, Debye proposa une première application de ce phénomène à la physique des basses températures [2], où cette technique devint la norme de quelques Kelvin à quelques centaines ou pour les applications extrêmes jusqu'à quelques centièmes ou millièmes de Kelvin. Le procédé est nommé procédé de magnétisation/démagnétisation. Cet effet se produit au voisinage de la température de Curie, où un matériau magnéto-calorique subit une transition continue entre deux états magnétiques différents.

Depuis les années trente, la réfrigération magnétique est appliquée avec succès dans la physique des basses températures. Bien plus tard, en 1976, Brown construisit le premier réfrigérateur magnétique [3]. Ce pas franchit, un important nombre de réfrigérateurs de ce type ont été brevetés et construits. Le premier réfrigérateur magnétique fonctionnant à température ambiante et pourvu d'aimants permanents a été construit en 2001 par Astronautics Cooperation of America [4]. Parmi d'autres groupes Kitanovski, Egolf et Sari ont proposé de nouveaux systèmes cycliques de réfrigérateur thermodynamique. Pour ces réfrigérateurs, l'utilisation de simulations numériques, a permis de prédire des COP très élevés, mais non encore publiés. Ces machines, qui en sont encore au stade du développement, devraient opérer dans des conditions analogues aux réfrigérateurs conventionnels à compression/expansion ou aux pompes à chaleur.

Dans les années quatre-vingt, la recherche sur les matériaux magnéto-caloriques, qui sont nécessaires à la réfrigération magnétique à température ambiante, s'est énormément accrue.

Ainsi après la découverte d'alliages basés sur le Gadolinium, qui étaient produits par le AMES Laboratory, une croissance exponentielle s'est produite. Cet état de fait a été mis en évidence par un comptage annuel du nombre d'articles scientifiques corrigés dans le domaine [5,6]. Dès lors, une grande variété de composés magnétocaloriques différents ont été proposés. Aujourd'hui, de nouveaux alliages sont produits avec des températures de Curie proches de la température ambiante et de grands effets magnétocaloriques. Parmi les scientifiques qui travaillent dans ce domaine, on remarquera spécialement Pecharsky et Gschneidner [5,6] aux USA, Wada et al. [7] au Japon et Brück et al. [8] en Europe.

2. LE PRINCIPE DE LA RÉFRIGÉRATION MAGNÉTIQUE

Habituellement un réfrigérateur magnétique est constitué d'un corps solide de matériau magnétocalorique, qui est mis en mouvement vers et en provenance d'un champ magnétique selon une dérivée spatiale de son intensité. Un coulis magnétocalorique, constitué de fines particules magnétocaloriques dispersées, peut être substitué au corps solide et circuler dans un champ magnétique d'intensité variable. Le transfert de chaleur au réfrigérant métallique est effectué par un échangeur de chaleur dont le fluide du côté secondaire est généralement de l'air ou de l'eau. Les champs magnétiques sont générés par des aimants qui peuvent également être permanents.

La majorité des prototypes et brevets existants est basée sur la rotation de matériaux magnétocaloriques dans un champ magnétique ou sur celle d'aimants et de leurs champs magnétiques à travers l'échantillon magnétocalorique. D'autres applications sont basées sur un mouvement linéaire réciproque du matériau magnétocalorique dans le champ, comme un piston qui se déplacerait dans un cylindre et vice et versa.

Différents cycles thermodynamiques de types idéaux sont connus, à titre d'exemple citons les processus de Carnot, Ericsson et de Brayton (Joule). Les matériaux magnétocaloriques actuels montrant une impossibilité à obtenir de grandes différences de températures conduisent à l'application de ces cycles selon des processus en cascade et/ou en régénération.

Les aimants choisis peuvent être de différents types. Des aimants supraconducteurs atteignent de très hauts champs magnétiques, conduisant à un effet magnétocalorique très intense. Toutefois, leurs coûts prohibent une application à la technologie de réfrigération usuelle. L'utilisation d'électroaimants produisant de la chaleur, cette dernière doit être évacuée. Dans le cas d'un réfrigérateur, cette charge thermique conduit à une baisse d'efficacité. De plus, les électroaimants ne sont pas capables de produire d'intenses champs magnétiques. On peut, ainsi, prédire que les futurs réfrigérateurs magnétiques produits seront équipés d'aimants permanents.

La Figure 1 permet d'observer le parallèle entre une réfrigération conventionnelle et une alternative respectivement un processus de pompe à chaleur. Une analogie physique existe entre ces deux principes. L'élément moteur du premier est un champ magnétique et celui du second est une pression. La réaction à l'intrusion porte, dans le premier cas, sur la magnétisation du matériau (réorganisation des spins); alors que dans le second elle porte sur la taille du volume. Lorsqu'un échantillon de matériau magnétocalorique est introduit dans un champ magnétique, il s'échauffe de façon similaire à un gaz comprimé d'un système conventionnel. La chaleur est, ensuite, évacuée du matériau et le champ magnétique à nouveau réduit conduisant au refroidissement de l'alliage magnétocalorique. L'échantillon se comporte alors en source froide pour un consommateur, par exemple: une gondole froide de supermarché, un système de conditionnement d'air de bâtiment, de voiture, etc. Si le circuit

est fermé, un fonctionnement cyclique du système, comprenant les quatre fonctions mises en évidence à la figure 1, peut être obtenu.

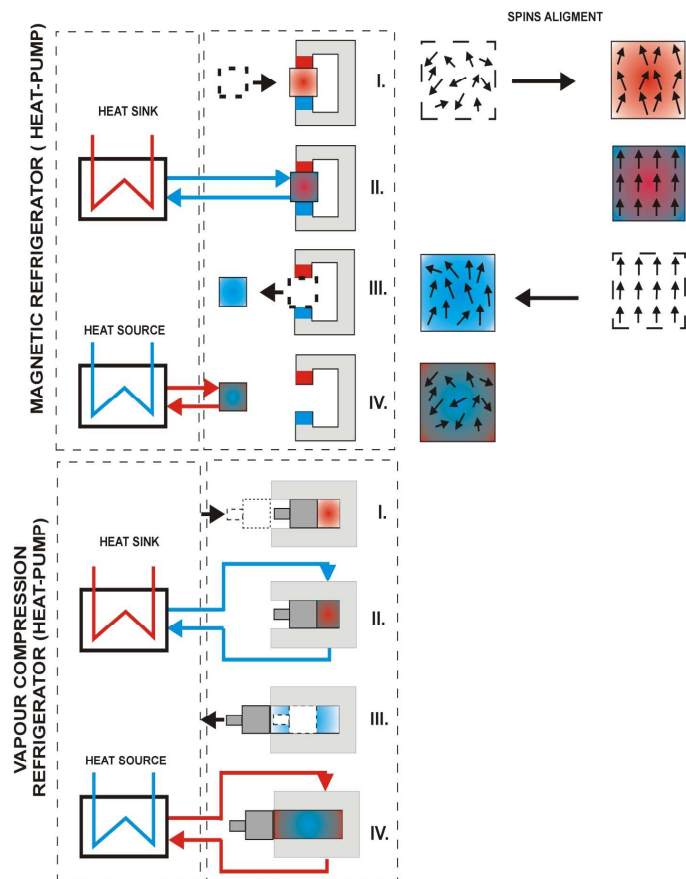


Figure 1: L'illustration du haut représente un réfrigérateur magnétique, respectivement une pompe à chaleur et l'illustration du bas le système conventionnel analogue à compression/détente de gaz.

Bien que les développements de matériaux se poursuivent, il est important que ces alliages soient produits à plus large échelle afin que les prototypes thermodynamiques puissent être réalisés et testés.

Le matériau magnétocalorique étant le réfrigérant d'un réfrigérateur magnétique, les fluides intervenant dans cette technologie peuvent être de l'air ou de l'eau. Ainsi aucun réfrigérant conventionnel n'est requis pour cette nouvelle technologie verte.

La prise en compte de données des chercheurs en matériaux, nous a permis de calculer les chaleurs spécifiques de réfrigération pour quelques-uns des meilleurs matériaux actuels (voir FIG. 2 a et b).

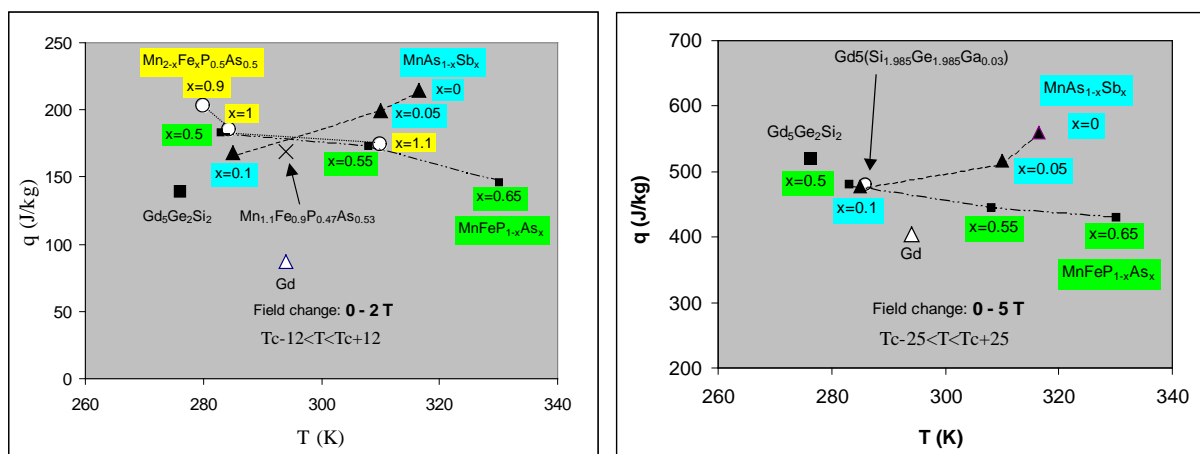


Figure 2: Capacités spécifiques de réfrigération de quelques nouveaux composés magnétocaloriques. Pour de faibles altérations de champ de zéro à deux Teslas, l'alliage à base de Manganèse, produit en Europe, présente les meilleurs résultats (a). S'il se produit des altérations de champ magnétique supérieures à 5 Teslas, le matériau à base de Gadolinium révèle de meilleures "capacités" (b).

Il est préférable d'appliquer les matériaux magnétocaloriques sous forme de lits paquetés ou de structures poreuses. Ces configurations conduisent à de grandes surfaces d'échange avec le fluide de travail par unité de volume. Le facteur de compactage est lié à la puissance de refroidissement, aux conditions d'exploitation, aux propriétés du fluide, etc., et devrait résulter d'un processus d'optimisation afin d'être appliqué aux modèles numériques de magnétothermodynamique.

3. REFRIGERATION MAGNETIQUE ROTATIVE EN STRUCTURES POREUSES

Cette section présente un réfrigérateur magnétique rotatif développé à la Haute Ecole spécialisée de Suisse occidentale. Une illustration en est présentée à la FIG. 3.

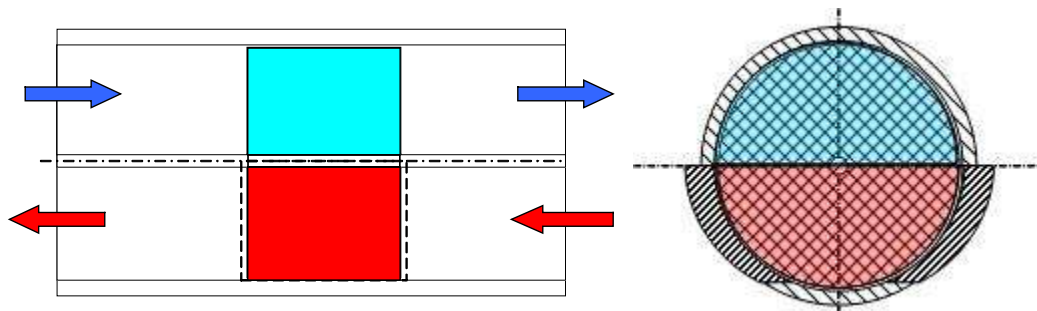


Figure 3: Un réfrigérateur magnétique rotatif pourvu d'une roue de matériau magnétocalorique poreux. La roue se réchauffe entre les aimants et se refroidit à l'extérieur de ceux-ci.

Le mode opératoire de ce système est similaire à celui des technologies de récupération de chaleur, où une roue de structure poreuse est mise en rotation entre deux canaux. La machine fonctionne ainsi en continu. Cette rotation relative entre les aimants suscite l'effet magnétocalorique du matériau. A l'exception de la roue, tous les éléments (par exemple : aimants) sont statiques. Ainsi, un positionnement des aimants hors des pièces en rotations est un grand avantage ; car, par soucis d'efficacité, il est important de confiner les deux fluides.

La partie basse (demi cylindre) de la roue cylindrique est positionnée dans un champ magnétique. Les deux pôles ne sont montrés que schématiquement à la FIG.3. Dans un aimant permanent les pôles Nord et Sud sont connectés or cette connexion n'apparaît pas dans cette illustration. L'optimisation du design et du positionnement de l'aimant est planifiée et doit être réalisée dans un projet de recherche actuel.

Dans la partie supérieure du cylindre, le fluide entre par la gauche de la machine et quitte cette dernière par la droite. Dans la partie inférieure la direction est inversée créant ainsi un échangeur à contre-courants. L'alliage magnétocalorique s'échauffant dans le champ magnétique, le fluide du bas évacue la chaleur du rotor. Il quitte l'appareil avec une température supérieure à celle qu'il avait en y entrant. L'inverse se produit dans la partie supérieure du rotor où le métal est refroidi. Le fluide quitte ainsi l'appareil avec une température inférieure à celle qu'il avait en y entrant. Ce fluide peut, dès lors, être utilisé à des fins de refroidissement. Les fluides peuvent être gazeux comme de l'air ou liquides comme de l'eau ou même des nanofluides, des saumures ou des suspensions.

La fréquence de rotation définit la quantité de matériau magnétocalorique qui transite dans le champ magnétique. Ainsi la puissance de réfrigération est directement proportionnelle à cette fréquence. Toutefois, la vitesse de rotation est limitée par la transmission de trop de fluide du côté chaud vers le côté froid et réciproquement. Ainsi les conditions suivantes (Strouhal) doivent être maintenues pour une fréquence f :

$$f \ll \frac{v}{l},$$

(1)

où v représente la vitesse moyenne du fluide et l la longueur du cylindre.

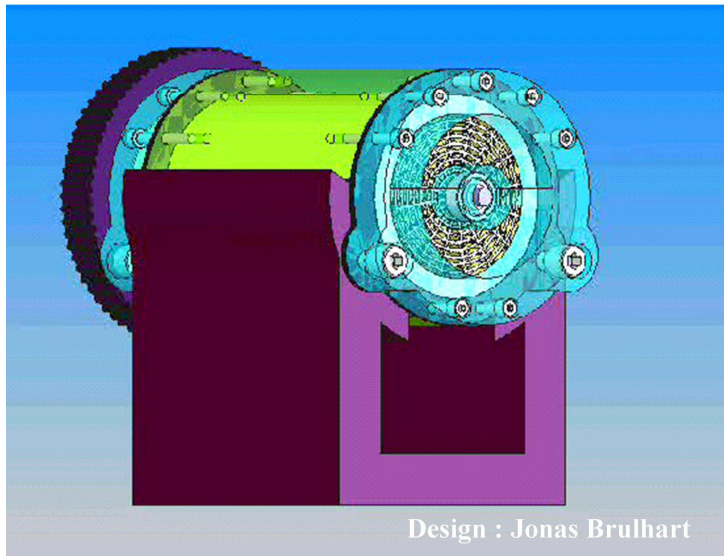


Figure 4: Une représentation tridimensionnelle d'un réfrigérateur magnétique rotatif.

Les canaux de connexion manquent ici. Les aimants ainsi que leur positionnement n'ont pas encore été optimisés. L'institut de génie thermique de la Haute Ecole spécialisée de Suisse occidentale a également breveté des modifications et améliorations de ce système.

Dans un autre système, un coulis magnétocalorique s'écoule dans un champ magnétique.

Les premières analyses numériques du réfrigérateur magnétique rotatif (RMC) montrent d'excellentes performances et cela même sans processus d'optimisation initial de l'appareil et des écoulements de ses fluides. Et cela, bien que nos connaissances actuelles de cette technologie montrent que les applications pratiques conduiront probablement à des chillers à régénération ou en cascades. La fabrication d'appareils assez sophistiqués, pour qu'ils puissent atteindre de grandes différences de températures, imposera l'utilisation de matériaux magnétocaloriques différents. Pour les systèmes en cascade, la direction ainsi que la vitesse de chaque roue doivent pouvoir être réglées séparément.

Nous présumons que des fluides à haute densité et chaleur spécifique ainsi que de grands transferts de chaleur entre le fluide et le matériau solide, comme l'eau, conduiront à des structures de taille moyenne dont le rapport surface à volume et surface de contact est typiquement de type structure poreuse. Par opposition, des fluides à basse densité, chaleur spécifique et faibles coefficients de transfert de chaleur, comme l'air, conduiront à de très grands rapports surface à volume. Dans le second cas, le volume relatif du matériau est beaucoup plus petit que dans le premier.

Actuellement, le dessin, la construction ainsi que l'optimisation de nouveaux prototypes de tels systèmes fonctionnant à l'air ou à l'eau est en cours. L'objectif est de développer la technologie de la réfrigération magnétique au stade où elle peut être économiquement et énergétiquement compétitive avec les techniques de refroidissement conventionnelles. La simplicité du système rotatif, basé sur une technologie éprouvée, conduira à de faibles coûts de maintenance et d'investissement. L'invention présentée dans cet article peut être également employée en pompe à chaleur. Il ne fait aucun doute que le refroidissement magnétique à température ambiante et au dessus est une technologie "verte".

4. COLLABORATION INTERNATIONALE FUTURE

Deux des auteurs de cet article ont lancé un nouveau groupe de travail à l'Institut International du Froid dans le domaine de la réfrigération magnétique (voir FIG. 5).

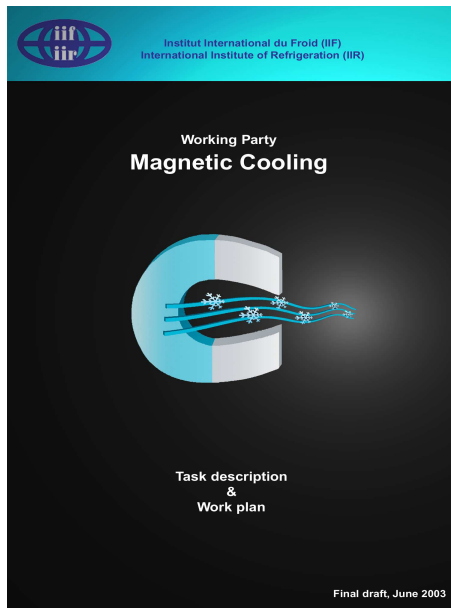


Figure 5: La page de titre de la description des tâches et du plan de travail du nouveau groupe de travail réfrigération magnétique de l'Institut International du Froid IIF/IIR (<http://www.iifir.org>). Le logo représente un aimant et un liquide magnéto-calorique s'écoulant dans son champ. Ce groupe de travail est actif depuis l'été 2004. Ses objectifs principaux sont de coordonner les activités de recherche à un niveau international et d'organiser un atelier annuel pour des échanges mutuels d'information. Le premier atelier aura lieu à l'automne 2005 à Yverdon-les-Bains, Suisse. Les scientifiques ou industriels intéressés peuvent prendre contact à l'adresse de l'organisateur à l'Ecole d'ingénieurs du Canton de Vaud: katy.winkelmann@eivd.ch.

REMERCIEMENTS

Nous sommes reconnaissants à l'Office Fédéral de l'Energie (Th. Kopp), à la fondation Gebert Rüt Stiftung (Ph. Egger) et à Arçelik A. S. (F. Oezkadi) pour leur support à nos travaux de recherche.

REFERENCES

- [1] Warburg E., Magnetische Untersuchungen über einige Wirkungen der Koerzitivkraft, Ann. Phys., 1881, **13**, pp. 141 –164.
- [2] Debye P., Einige Bemerkungen zur Magnetisierung bei tiefer Temperatur, Ann Phys. 1926, **81**, pp. 1154 –1160.
- [3] Brown G.V., Magnetic heat pumping near room temperature. J. Appl. Phys. 1976, Vol. 47, pp. 3673 –3680.
- [4] Zimm C.B., Sternberg A., Jastrab A.G., Boeder A.M., Lawton L.M., Chell J.J., Rotating bed magnetic refrigeration apparatus. US Patent 6.526.759.4, 2003 (Filed Aug. 2001).
- [5] Pecharsky, V.K., Gschneidner, K.A., Jr., Effect of alloying on the giant magnetocaloric effect of Gd₅(Si₂Ge₂), J. Magnetism and Magnetic Materials, Vol. 167, 1997, pp. 179-184.
- [6] Pecharsky V.K., Gschneidner K.A. Jr., Tunable magnetic regenerator alloys with a giant magnetocaloric effect for magnetic refrigeration from ~ 20 to ~ 290 K, Applied Physics Letters **70** (24), 1997, pp. 3299-3301.
- [7] Wada H., Tamabe Y., Giant magnetocaloric effect of MnAs_{1-x}Sb_x, Appl. Phy. Lett., **79**, No. 20, 2001, pp. 3302-3304.
- [8] Brück, E., Tegus O., Li X.W., de Boer F.R., Buschow K.H.J., Magnetic refrigeration towards room-temperature applications. Physica B, **327**, 2003, pp.431 -437.
- [9] Tishin, A.M., Spichkin, Y.I, The Magnetocaloric Effect and its Applications, Institute of Physics, Series in Condensed Matter Physics, Institute of Physics Publishing, 2003.
- [10] Yu, B.F., Gao, Q, Zhang, B, Meng, X.Z, Chen, Z., Review on research of room temperature magnetic refrigeration, Int. Journal of Refrigeration **26**, 2003, pp.1-15.