

Introduction au froid magnétique

Souheila Mellari

Université Mentouri, Constantine 1, Algérie

Mellari_a@yahoo.fr

Introduction

Après l'élimination des CFC, HCFC et maintenant les HFC, beaucoup de solutions ont été proposées, maintenir en fonctionnement les machines frigorifiques existantes par la récupération et le recyclage des fluides frigorigènes halogènes usagés pour la réparation et le renforcement de l'étanchéité des installations frigorifiques. Deuxième solution est la mise au points des fluides de substitution avec ODP bas qu'il s'agisse de corps pur ou mélange, troisième est le confinement de la charge avec l'application du circuit secondaire à frigoporteur qui peuvent être monophasiques ou diphasiques et une autre alternative qui est bien l'utilisation de nouveaux systèmes de production de froid autres que ceux à compression, selon la 20^{ème} note d'information de l'IIF sur les techniques du froid (2007), il existe une possibilité de remplacer les frigorigènes HFC par des alliages magnéto-caloriques inoffensifs pour l'environnement en utilisant le froid magnétique à température ambiante.

Le réfrigérateur magnétique fait appel à une conception de type rotative. Un disque, de la taille d'un CD-Rom, dispose de segments qui contiennent une poudre de gadolinium. En passant devant l'aimant permanent, les atomes du gadolinium s'alignent et dégagent de la chaleur, évacuée par un circuit d'eau. En quittant le champ magnétique, le processus s'inverse : le matériau refroidit, et absorbe les calories d'un second circuit d'eau utilisé pour refroidir le compartiment du réfrigérateur. Actuellement, la mise au point d'alliage à base de cobalt, manganèse, silicium et germanium ou de céramiques présentant des propriétés analogues au gadolinium a rendu la réalisation et la commercialisation à destination du marché grand public de réfrigérateurs magnétique possible.

Historique

Effet magnéto-calorique découvert par le physicien allemand Emil Warburg en 1881, où il observa une élévation de la 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]. Les

principes de la réfrigération magnétique étaient établis en 1926 par Debye et ont permis de descendre jusqu'à (1/100) [2].

Le 1^{er} système atteignant 0,25 K mais à des puissances très faibles <1W a été réalisé par le chimiste Nobélien W.F.Giauque en 1933. Où Il a utilisé le sel de gadolinium $Gd_2(SO_4)_3 \cdot 8H_2O$ dans sa démonstration en cryogénie [3].

Le froid magnétique au voisinage de la température ambiante a vu le jour presque cent ans après la découverte de l'EMC quand Brown en 1976 a développé un système de réfrigération performant en utilisant le gadolinium comme matériau actif et un électroaimant développant un champ magnétique de 7 Teslas, il a obtenu un écart de température entre la source chaude et la source froide de l'ordre de 47 K. Pour le transfert thermique, il a utilisé un fluide à base d'eau et d'alcool [4].

En 1997 Gschneidner a découvert des « matériaux à effet magnétocalorique géant » à température ambiante dans des alliages de Gadolinium –germanium-silicium (Ga-Ge-Si) avec $EMC = 3,65 \text{ K/ Teslas}$ autour de la température de curie $T_C = 276 \text{ K}$ [5]. C'est la notion principale qui a révolutionné le domaine de la réfrigération magnétique à l'ambiante.

En 1998, Zimm a mis au point un prototype démontrant la faisabilité de la réfrigération magnétique au voisinage de l'ambiante. Pour un écart entre la source froide et la source chaude de 10 K et sous un champ de 5 Teslas [6]. Ce système développé a permis d'atteindre pour la première fois une puissance de 600 W et un coefficient de performance de 10 avec une efficacité de 60 % par rapport au cycle de Carnot.

Puis les membres de l'Astronautics Cooperation of America ont remplacés les aimants supraconducteurs par des simples aimants permanents ($Nd_2Fe_{14}B$) pour produire un effet magnétocalorique et par suite l'apparition du premier réfrigérateur magnétique fonctionnant à température ambiante et pourvu d'aimant permanent en 2001 et de ce faite une énergie gratuite pour réaliser des cycles magnétocaloriques [7].

Ces trois dernières avancées ont permis à la réfrigération magnétique de connaître un développement exponentiel.

Mohamed Balli 2014, a observé qu'un effet magnétocalorique géant peut être obtenu par une simple rotation autour d'un petit cristal de $HoMn_2O_5$, et ce, dans un champ magnétique fixe.

À la suite de cette découverte, les chercheurs de l'université de Sherbrooke ont proposé un concept innovant pour la liquéfaction de l'hélium et de l'hydrogène en utilisant l'effet magnétocalorique rotatif [8].

Définition

La réfrigération magnétique est un système de « réduction d'entropie d'un matériau paramagnétique » ou même ferromagnétique, reposant sur la propriété physique de certains matériaux magnétiques qui voient leur température intrinsèque s'élever quand ils sont soumis à un champ magnétique ; inversement la désaimantation entraîne un refroidissement .Ce phénomène dénommé effet magnéto-calorique ou « EMC ».

Cet effet repose sur la transition critique paramagnétique (spins orientés au hasard) /ferromagnétique (spins alignés et parallèles) du matériau, qui se traduit par une augmentation de la température lorsqu'on lui applique rapidement un champ magnétique ; inversement la désaimantation entraîne un refroidissement.

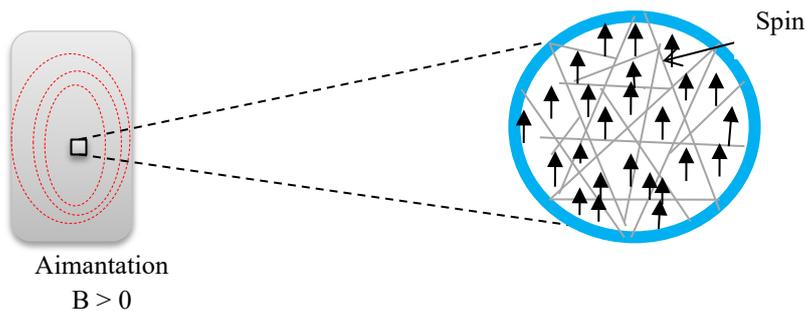


Figure 1 : Comportement ferromagnétique ; Moments magnétiques alignés et parallèles

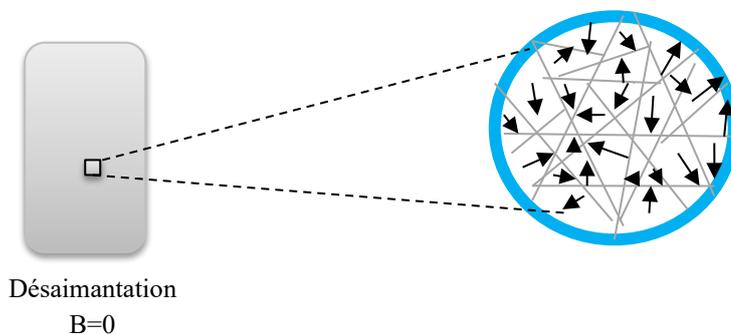


Figure 2: Comportement paramagnétique ; Moments magnétiques orientés au hasard

Transition de phases

L'entropie magnétique est maximale à champ nul (état désaimanté) dans la phase paramagnétique au-dessus de la température de transition appelée température de Curie T_C . Elle diminue sous l'action d'un champ magnétique, ce qui s'explique par l'alignement des moments magnétiques dans la phase ferromagnétique. Ainsi, l'effet magnétocalorique est maximal autour de la température de Curie.

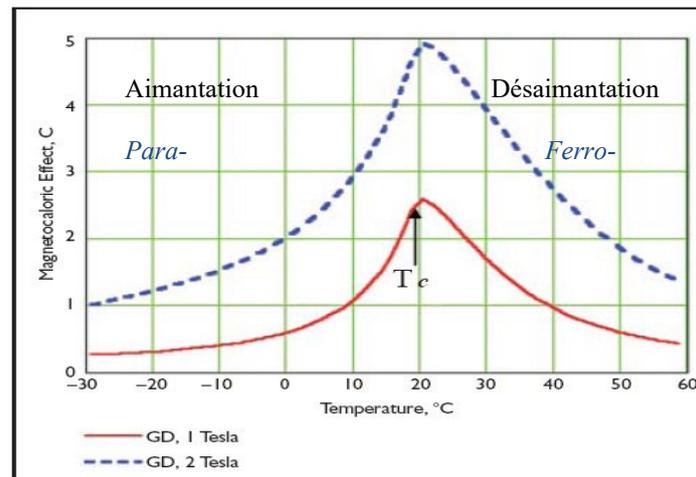


Figure 3 : Effet magnétocalorique avec le gadolinium [9]

La transition de phase est de deux natures, 1^{er} et 2^{ème} ordre, la figure 4 illustre ceci. Les matériaux possédant une transition de phase du premier ordre, présentent :

- fortes variations de l'entropie magnétique $\Delta S_m(T)$;
- fortes variations de la température ΔT_{ad} mais sur une faible plage de température δT car les transitions du premier ordre sont brusques et l'aimantation évolue très rapidement avec la température ;
- Toutefois, les pertes par hystérésis (ou pertes magnétiques) conduisant aux irréversibilités de ces systèmes car l'aimantation d'un circuit magnétique absorbe de l'énergie, cette énergie n'est pas totalement restituée lors de la désaimantation. Une partie de l'énergie est dissipée en chaleur ;
- leur cinétique lente peut réduire l'efficacité des matériaux à effet magnétocalorique, car la relation de Maxwell qui relie l'entropie et l'aimantation ne peut être utilisée que dans le cas d'un système à l'équilibre;
- De plus, ces matériaux peuvent présenter d'autres inconvénients comme le vieillissement précoce dû aux modifications structurales accompagnant généralement ces transitions.

Les matériaux de transition de phase du second ordre impliquent :

- faible variation d'entropie magnétique $\Delta S_m(T)$;
- faible variation ΔT_{ad} mais leurs effets s'étendent sur une plus large gamme de température δT ;
- exempts de phénomènes pénalisants tels que l'hystérésis, la cinétique lente et les modifications structurales.

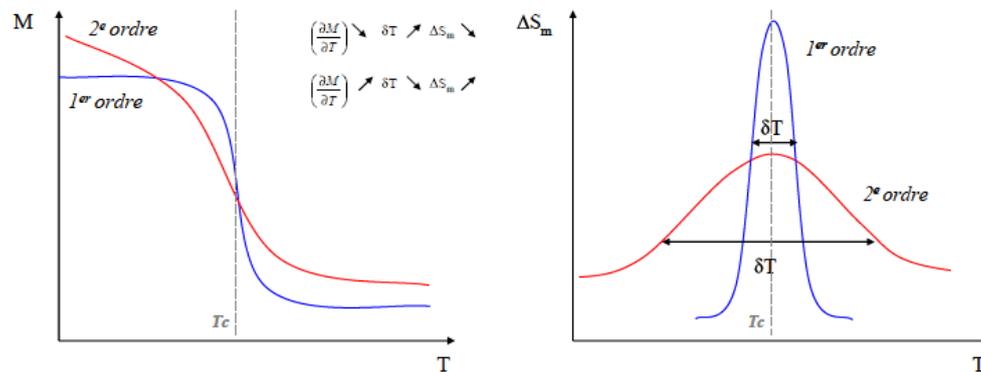


Figure 4 : Transitions de phases et variations de l'entropie magnétique associées [10]

Intérêts de la réfrigération magnétique

Pas de compresseur ;

Exempt de gaz destructeur de la couche d'ozone ;

Diminution de l'énergie requise à peu près de 35 % d'après certaines études (la seule énergie requise est celle nécessaire pour faire tourner le moteur et les pompes à eau) ;

Refroidissement avec toute sécurité et sans impact sur l'environnement ;

Peut atteindre des températures à 4K (-269°C) ;

Grande réversibilité (quasi réversibilité) et donc efficacité plus grande Cela entraîne un rendement énergétique nettement meilleur ;

Mécanisme compact, silencieux, quasiment sans vibration ;

Ces avantages offrent à la réfrigération magnétique un potentiel d'applications dans de nombreux domaines de l'industrie où elle peut concurrencer les systèmes de réfrigération thermodynamique classique, par exemple :

- réfrigération domestique ou industrielle ;
- climatisation de bâtiment ;

- climatisation de véhicule ;
- refroidissement de systèmes portables : électronique, médical, etc. ;
- liquéfaction de gaz.

Matériaux magnétiques

- Matériaux ferromagnétiques: les alliages comme Nickel, Fer, Cobalt et certaines terres rares comme gadolinium, dysprosium, terbium.
- Matériaux paramagnétiques: Aluminium, chrome, manganese, platine, potassium.

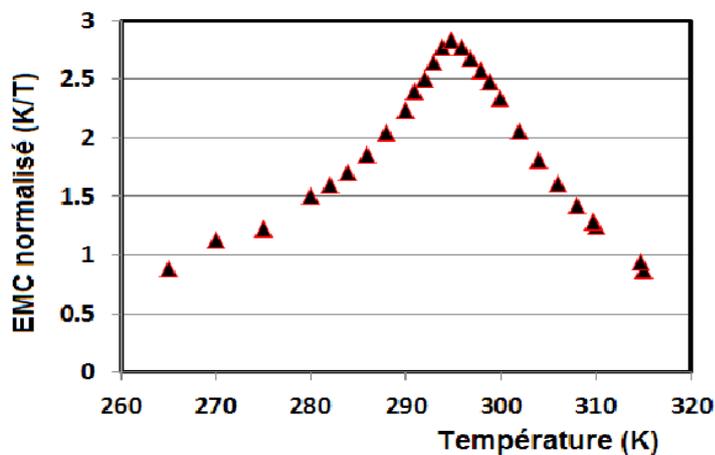


Fig. 6: Evolution de l'effet magnétocalorique du gadolinium [10]

Pourquoi le gadolinium ? Le gadolinium est un élément gris qui est ductile et malléable. Il attire des aimants, ce qui signifie qu'il est ferromagnétique. Sa variation adiabatique de température aux alentours de la température de Curie 294 K est de l'ordre de 2.6 K/Teslas. Toutefois, en dépit de son pouvoir magnétocalorique, le gadolinium n'est pas adapté pour des applications destinées au marché, en raison de son prix très élevé et les ressources mondiales sont insuffisantes pour entrevoir l'application à grande échelle. Sa capacité de réfrigération est limitée au voisinage de 300 K. En outre, le gadolinium n'est pas très réactif à l'eau et dissout dans l'acide qui a été dilué.

Aimants

Les aimants choisis peuvent être :

- aimants supraconducteurs atteignant de très hauts champs magnétiques conduisant à un EMC très intense. Toutefois, leurs coûts prohibent une application à la technologie de réfrigération usuelle ;

- 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 ;
- aimants permanents, les futurs réfrigérateurs seront équipés d'aimants permanents. Le système de réfrigération magnétique qui fonctionne avec un champ magnétique permanent emploie une série de cycles de magnétisation-démagnétisation sur des alliages magnéto-caloriques. Chacun de ces cycles va créer une différence de température dans le matériau qui, du fait de la répétition de ces cycles, crée une source chaude et une source froide dans le système frigorifique (équivalent à une pompe thermique).

Notions de base

Pour mieux comprendre l'origine physique de l'effet magnéto-calorique, il est utile de rappeler les propriétés thermodynamiques d'une substance magnétique plongée dans un champ magnétique. Premièrement on sait que l'entropie désigne l'état de désordre d'un système [11], avec T température du matériau et B champ magnétique appliqué.

$$dS = \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_R \quad (Eq.1)$$

Dans le cas d'une transformation réversible, la différentielle de l'entropie S peut s'écrire selon l'Eq. 2 :

$$dS(T, B) = \left(\frac{\partial S}{\partial T} \right)_B dT + \left(\frac{\partial S}{\partial B} \right)_T dB \quad (Eq.2)$$

La capacité calorifique spécifique isomagnétique du matériau C_B est :

$$C_B = \left(\frac{\partial S}{\partial T} \right)_B T \quad (Eq.3)$$

La relation de Maxwell-Weiss

$$\left(\frac{\partial S}{\partial B} \right)_T = \left(\frac{\partial \vec{M}}{\partial T} \right)_B \quad (Eq.4)$$

En remplaçant les deux relations l'Eq.3 et l'Eq.4 c'est-à-dire la capacité calorifique spécifique isomagnétique du matériau et la relation de Maxwell–Weiss qui relie l'entropie et l'aimantation dans l'Eq. 2, la différentielle de l'entropie S sera exprimée par l'Eq. 5 :

$$dS(T, B) = \frac{C_B}{T} dT + \left(\frac{\partial M}{\partial T} \right)_B dB \quad (Eq.5)$$

Dans le cas d'une transformation adiabatique, l'effet magnétocalorique est exprimé par l'Eq. 6:

$$EMC = \Delta T_{ad} = -\frac{T}{C_B} \int_{B_i}^{B_f} \left(\frac{\partial M}{\partial T} \right)_B dB \quad (Eq.6)$$

Ou encore par l'Eq. 7 :

$$EMC = \Delta T_{ad} = \frac{T \cdot \Delta S_m(T, \Delta B)}{C_B(T, B)} \quad (Eq.7)$$

D'un point de vue thermodynamique, l'entropie d'un composé magnétocalorique est une combinaison de l'entropie magnétique S_m , l'entropie de réseau S_r , et l'entropie électronique S_e .

L'entropie magnétique se caractérise par les moments magnétiques propres aux électrons.

L'entropie de réseau porte sur le réseau cristallin des atomes et l'entropie électronique est associée à la contribution thermique des électrons dans le matériau. Cette dernière peut être considérée comme négligeable dans certains matériaux. De ce fait, lorsque le composé à la température T est soumis à un champ magnétique B, l'entropie totale de ce dernier peut se traduire par l'Eq. 8 :

$$S_{TOTALE}(T, B) = S_m(T, B) + S_r(T) + S_e(T) \quad (Eq.8)$$

Ou simplement par l'Eq.9 :

$$S_{TOTALE} = S_m + S_{TH} \quad (Eq.9)$$

Il est clair que pour que le matériau possède un EMC géant, il faut qu'il réunisse au mieux les conditions suivantes :

- variation d'entropie magnétique ΔS_m élevée. Cela se traduit par un moment magnétique élevé ;
- faible capacité thermique massique C_B .

Caractérisation de l'EMC

Pour caractériser l'EMC, on a 3 méthodes [11] :

- La 1^{ère} celle des mesures directes : c'est la méthode la plus évidente. Il s'agit de mesurer grâce à un capteur de température en contact direct avec l'échantillon l'échauffement et le refroidissement du matériau. Ce principe ne permet que des mesures à température fixe et à des champs relativement faibles (de l'ordre de 1 Teslas).
- La 2^{ème} celles des mesures calorimétriques, que veut dire, les mesures de capacité thermique massique isomagnétique $C_B(T, B)$, cette méthode nous permette de déduire l'entropie magnétique $S_m(T, B)$ et sa variation $\Delta S_m(T, \Delta B)$ ainsi que l'EMC exprimé en variation de température ΔT_{ad} ; T_f température froide.

$$S_m(T, B) = \int_{T_f}^T \frac{C_B(T, B)}{T} dT \quad (Eq.10)$$

$$\Delta T_{ad}(T, \Delta B) = \frac{T}{C_B(T, B)} \Delta S_m(T, \Delta B) \quad (Eq.11)$$

- La dernière est celle des mesures magnétiques car la variation de l'entropie magnétique est reliée à l'aimantation $M(T, B)$ par l'équation de Maxwell. L'intégration numérique de cette dernière donne les valeurs de ΔS_m à différents champs et températures :

$$\Delta S_m(T_j, \Delta B) = - \sum_j \frac{M_{i+1}(T_{i+1}, B_j) - M_i(T_i, B_j)}{T_{i+1} - T_i} \quad (Eq.12)$$

M_{i+1} et M_i sont respectivement les aimantations aux températures T_{i+1} ; T_i et dans un champ B
C'est la meilleure méthode et la plus utilisée, en particulier au voisinage de la température ambiante ; elle permet une évaluation rapide des performances magnéto-caloriques des matériaux avec une erreur relative de 3 à 10 %.

Principe de la réfrigération magnétique à température ambiante

La réfrigération magnétique à température ambiante se fonde sur le cycle suivant (voir figure 6) :

(a) Au départ, le matériau est en équilibre thermique avec le système à réfrigérer, lorsqu'on applique un champ magnétique ($B \neq 0$), les moments magnétiques du matériau s'orientent dans la direction du champ et l'entropie magnétique diminue. Dans des conditions adiabatiques ($Q=0$), l'entropie totale reste constante ($S_{TOT} = S_m + S_{TH} = CONST$) et par conséquent cette diminution de l'entropie magnétique (S_m) est compensée par une augmentation de l'entropie de réseau (S_{TH}) qui a pour effet une augmentation de la température du matériau.

(b) En gardant B constant, le matériau est mis en contact thermique avec le réservoir chaud. De l'énergie thermique est alors transférée du matériau vers le réservoir par le biais d'un liquide caloporteur neutre (eau glycolée).

(c) Le matériau est à nouveau isolé thermiquement, le champ magnétique étant annulé ($B = 0$), le retour des moments magnétiques à leur état désordonné provoque une augmentation de l'entropie magnétique. De même, dans des conditions adiabatiques ($Q = 0$), l'entropie totale reste constante ($S_{TOT} = S_m + S_{TH} = CONST$) et par conséquent cette augmentation de l'entropie magnétique (S_m) est compensée par une diminution de l'entropie de réseau (S_{TH}) qui a pour effet une diminution de la température en dessous de celle du système à réfrigérer.

(d) Le matériau est maintenant mis en contact thermique avec le système à réfrigérer. Il en résulte un transfert d'énergie thermique du système vers le matériau toujours par le biais d'un liquide caloporteur neutre (eau glycolée) qui assure le transfert de chaleur entre les sources froide et chaude jusqu'à ce que l'équilibre thermique s'établisse. Le cycle peut alors recommencer.

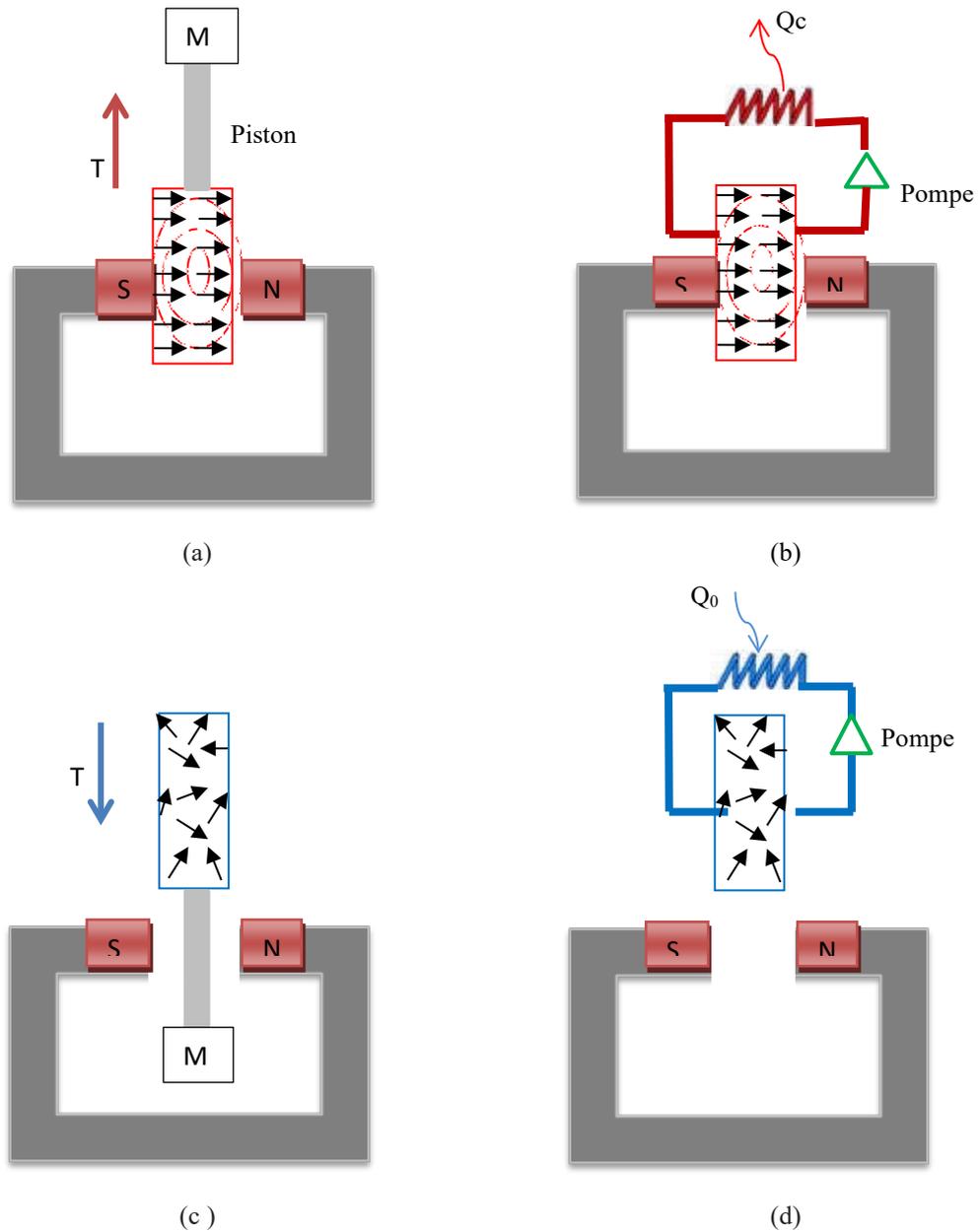


Figure 6 : Schéma de principe de la réfrigération magnétique

Etapes thermodynamiques

Les étapes thermodynamiques sont présentées sur le cycle magnétique de Brayton composé de 4 étapes :

A-B : Aimantation adiabatique ;

B-C : Transfert isomagnétique ou isochamps d'entropie on peut dire aussi refroidissement isomagnétique du matériau ;

C-D : Désaimantation adiabatique ;

D-A : Transfert isomagnétique ou iso-champs d'entropie comme on peut dire aussi chauffage isomagnétique du matériau.

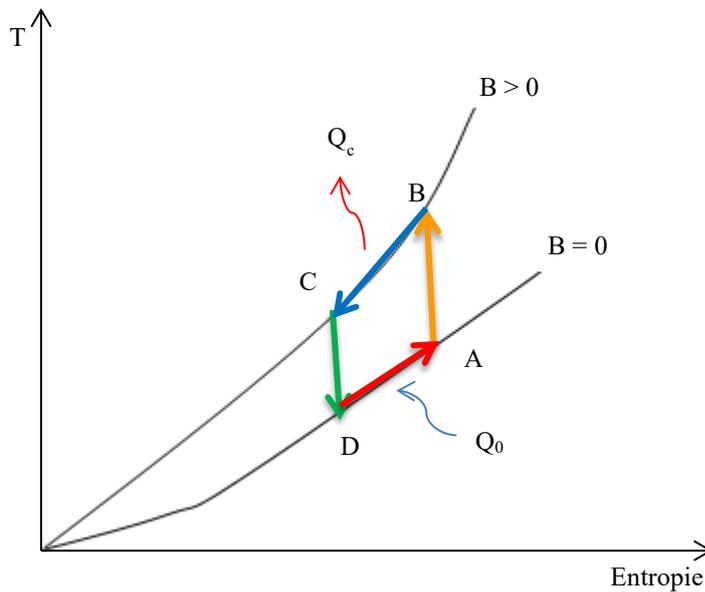


Figure 7 : Cycle magnétique de Brayton

Mais comme L'EMC étant relativement modeste (3 à 5 K/teslass), il n'est pas possible de l'exploiter directement et d'atteindre des écarts de température entre la source chaude et la source froide de 40 à 50 °C requises pour les applications conventionnelles de production de froid. Pour contourner cette difficulté, un système étant techniquement mis en place appelé réfrigérateur régénératif magnétique actif ou par l'acronyme AMRR. Ici on cascade plusieurs cycles de Brayton ie chaque élément de matériau subit un cycle de Brayton qui se compose des 4 phases: aimantation adiabatique du matériau, refroidissement iso-champ, désaimantation adiabatique, échauffement iso-champ.

Cette succession de cycles dans l'espace et le temps crée un gradient de température important de 40 à 50K. On peut atteindre un EMC 20 fois plus celui de gadolinium et des puissances supérieures à 20kW.

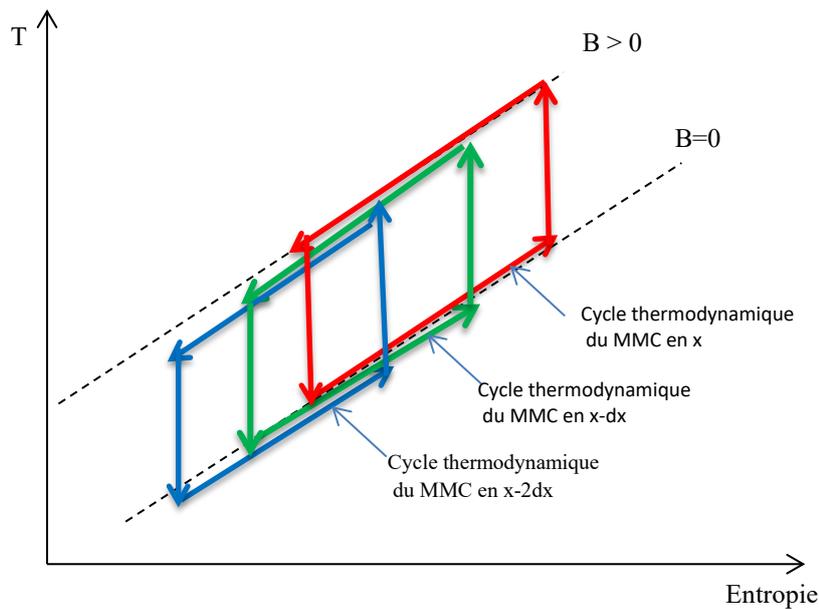


Figure 8 : Cycle magnétique de Brayton en cascade

La Figure 8, présente le principe de cette mise en cascade. Les flèches en pointillés représentent les échanges de chaleur et MMC désigne Matériau MagnétoCalorique :

- Phase 1 : le MMC du 1^{er} étage est désaimanté et il prélève de la chaleur à la source froide tandis que le 2nd étage est aimanté et donne de la chaleur à la source chaude ;
- Phase 2 : le MMC du 1^{er} étage s'aimante et augmente sa température tandis que le 2nd étage se désaimante et diminue sa température ;
- Phase 3 : le 1^{er} étage donne de la chaleur au 2nd étage ;
- Phase 4 : le MMC du 1^{er} étage se désaimante et diminue sa température tandis que le 2nd étage s'aimante et augmente sa température.

Dans les systèmes à réfrigération magnétique actuels, on utilise un fluide pour véhiculer la chaleur d'un étage à un autre. Afin d'augmenter les performances d'un cycle, le MMC peut être régénéré par le fluide avant de s'aimanter et de se désaimanter.

Analogie entre le froid classique et le froid magnétique

La Figure 9, montre une analogie entre la production du froid classique et la production du froid magnétique.

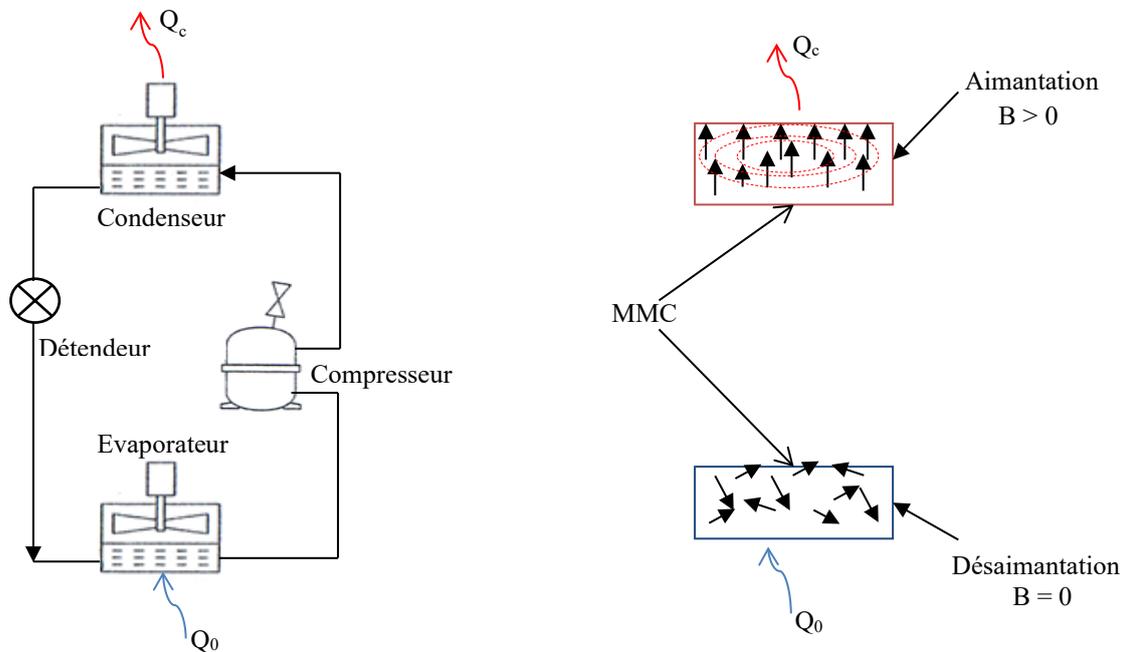


Figure 9 : Analogie entre le froid classique et le froid magnétique

Nouveaux matériaux à EMC Géant

Il faut noter qu'on parle de l'EMC géant lorsque ce dernier est presque deux fois supérieur à celui du gadolinium.

Depuis 2002 les scientifiques cherchent à remplacer le gadolinium pour les applications de la réfrigération magnétique, de nouveaux matériaux magnétocaloriques ont été mis au point. Parmi ces matériaux, les composés de lanthane, de type $\text{MnFeP}_{1-x}\text{As}_x$ [12], MnAs [13] et de $\text{LaFe}_{13-x}\text{Si}_x$ [14].

Dans cette optique, les composés à base de $\text{LaFe}_{13-x}\text{Si}_x$ sont les plus prometteurs, ils sont considérés comme la meilleure alternative au gadolinium en raison de leurs excellentes propriétés magnétiques et magnétocaloriques, ainsi que de leur prix intéressant. Ils présentent généralement un EMC géant à basses températures au voisinage de leur point de Curie proche de 200 K et un faible hystérésis. Pour les applications au voisinage de la température

ambiante (domestiques et industrielles), le point de Curie peut être augmenté par deux façons:

- insertion de certains éléments interstitiels en particulier l'hydrogène, sans affecter l'EMC [14]. $\text{LaFe}_{13-x}\text{Si}_x\text{H}_y$

- substitution d'une faible quantité de fer par du cobalt $\text{La}(\text{Fe}, \text{Co})_{13-x}\text{Si}_x$ [15] pour augmenter la température de Curie au voisinage de 300 K.

Vu l'instabilité chimique et mécanique des hydrures les composés $\text{La}(\text{Fe}, \text{Co})_{13-x}\text{Si}_x$ semblent actuellement être les plus adaptés pour les applications de la réfrigération magnétique.

Au Danemark, les scientifiques du Riso National Laboratory (fondé par Niels Bohr, situé dans le fjord de Roskilde) ont trouvés une autre voie : celle des céramiques, elles présentent l'avantage sur les métaux de mieux résister à la corrosion induite par l'eau du circuit de refroidissement [16].

Problématiques actuelles ou Recherche

Axe 1 : Optimisation de l'EMC

Maximum, il faut :

(i) maximum de variation d'entropie (ΔS_m) et de température (Δt_{ad}).

(ii) large gamme de température d'application (δT) et comme les matériaux à effet magnéto-calorique géant sont de transition du 1^{er} ordre et par conséquent ont une marge d'application réduite. Pour cela les composés de $\text{Gd}_2\text{Ge}_2\text{Si}_2$ permettent de couvrir une large gamme d'applications par une simple variation des concentrations de germanium et du silicium, une concentration allant de 0,5 à 1,0 permettent d'avoir une température de curie entre 290 et 335 K, mais ces composés présentent des principaux inconvénients comme le prix élevé et une large hystérésis. Les 2^{ème} composés sont les phospho-arséniures $\text{MnFeP}_{1-x}\text{As}_x$, la variation de la fraction du phosphore et de l'arsenic entre 0,25 à 0,65 donne une variation de la température de Curie de 150 à 340 K. Leur point négatif est la présence de l'arsenic qui est toxique. Une autre solution qui est le cycle à cascade, il augmente la plage d'application aussi.

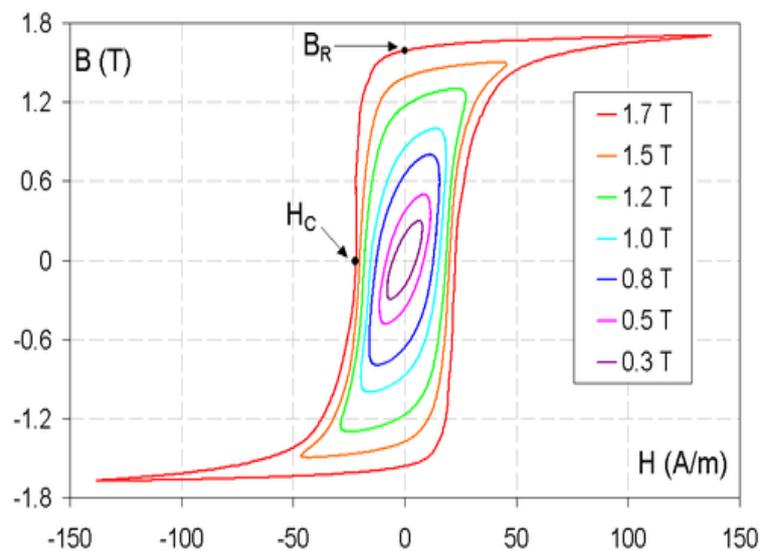
(iii) grande réversibilité, pour cela il faut minimiser les pertes magnétiques.

(iv) conductivité thermique élevée dans le sens des échanges avec le fluide caloporteur et faible dans les autres directions afin de limiter les pertes par diffusion dans le matériau.

Minimum, il faut :

(i) Pertes d'hystérésis inhérentes au 1^{er} ordre de transition. On sait que les pertes hystérésis sont proportionnelles à l'aire du cycle hystérésis, on peut alors limiter les pertes magnétiques, en utilisant des matériaux ayant un cycle étroit comme le montre la figure 10, sous l'effet d'un champ magnétique extérieur H (créé par exemple par circulation d'un courant dans un solénoïde et exprimé en Am^{-1}) il se crée dans le vide un champ d'induction magnétique B_0 , capable de susciter un comportement magnétique dans un matériau.

B étant proportionnel au champ H , la coalition du champ coercitif H_C et de l'induction rémanente B_R implique que la courbe présente une boucle d'hystérésis.



(ii) Champ magnétique appliqué faible. Par exemple avec les supraconducteurs, le principal obstacle à une industrialisation est le champ magnétique particulièrement élevé (5 teslass) qu'il faut générer pour pouvoir obtenir des rendements importants. Les aimants permanents constituent une solution intéressante de source de champ pour des dispositifs de réfrigération magnétiques en particulier pour des puissances relativement faibles (<10 kW).

(iii) Fatigue du matériel, les matériaux à effet magnéto-calorique géant sont de transition du 1^{er} ordre donc présente l'inconvénient qui est le vieillissement précoce dû aux modifications structurales accompagnant généralement ces transitions, aussi les aimants permanents les plus utilisés sont obtenus par frittage, donc cassants.

(iv) Impact sur l'environnement, une absence de polluant atmosphérique comme le CFC, HCFC et HFC. Les fluides utilisés dans les démonstrateurs sont l'eau ou le glycol.

(v) Coût.

Axe 2 : Il s'agit aussi de développer des mini- et micro-échangeurs thermiques pour arriver à des puissances supérieures à 20 kW dans les années à venir.

Conclusion

Il s'agit notamment de trouver des compositions non polluantes et stables permettant de disposer d'un EMC élevé sous un champ magnétique faible tout en assurant des coûts de matière première et de mise en œuvre réduits, éventuellement à l'échelle de nanomatériaux ou dans le domaine des terres rares.

Il faut miniaturiser et sécuriser les systèmes d'induction magnétique qui doivent si possible être produits avec des éco-matériaux ou des matériaux facilement recyclables.

Il s'agit aussi de développer des mini- et micro-échangeurs thermiques, d'étudier et évaluer le vieillissement et notamment la résistance à la corrosion (moyen et long terme) des matériaux magnéto-caloriques en contact avec le fluide caloporteur et soumis à des cycles de aimantation/désaimantation.

References

- [1] Warburg, E. G. (1881), Magnetische Untersuchungen, Ann. Phys. (Leipzig), volume 249, pp.141–164.
- [2] Debye P., Einige Bemerkungen zur Magnetisierung bei tiefer Temperatur, (1926), Ann. Phys. (Leipzig), volume 81, pp. 1154 –1160.
- [3] Giauque, W. F.; MacDougall, D. P. (1933), Attainment of Temperatures Below 1° Absolute by Demagnetization of $Gd_2(SO_4)_3 \cdot 8H_2O$, Phys. Rev. Lett. 43 : 768.
- [4] Brown G.V. (1976), Magnetic heat pumping near room temperature, J. Appl. Phys., Vol. 47, pp. 3673 –3680.
- [5] Gschneidner, K. A. Jr.; Pecharsky, V. K. ;Bautista, R. G.; et al.(1997), eds, Rare Earths: Science, Technology and Applications III. Warrendale, PA: The Minerals, Metals and Materials Society, p. 209.
- [6] Zimm, C; Jastrab, A.; Sternberg, A.; Pecharsky, V.K.; Gschneidner, K.A. Jr.; Osborne, M.; Anderson, I. (1998), Description and Performance of a Near-Room Temperature Magnetic Refrigerator, Adv. Cryog. Eng. 43: 1759.

- [7] Gschneidner, K.A., Pecharsky, V.K. (2008), Thirty years of near room temperature magnetic cooling: where we are today and future prospects, *Int. J. Ref.*, volume 31, pp 945-961.
- [8] Balli M. ; Jandl S. ; Fournier P. ; Gospodinov M.M. (2014), Anisotropy-enhanced giant reversible rotating magnetocaloric effect in HoMn_2O_5 single crystals, , *App. Phys. Lett.*, 104 (23) 232402
- [9] Dieckman J.; Roth, K.; Brodrick J., (2007), Magnetic refrigeration, *ASHRAE Journal*.
- [10] Balli M. ; Cyril M. ; Duc D. ; Nikkola P. ;Sari O., (2012),Le renouveau de la réfrigération magnétique, p17
- [11] Techniques de l'ingénieur RE 28- 3
- [12] Tegus O.; Brück E.; Buschow K. H. J.; de Boer F. R., (2002), Transition metal based magnetic refrigerants for room temperature applications, *Nature* , volume 415, pp. 150-152.
- [13] Wada H.; Tanabe Y., (2001), Giant magnetocaloric effect of $\text{MnAs}_{1-x}\text{Sb}_x$, *Appl. Phys. Lett.* , 79 (20) 3302-3304.
- [14] Fujita A.; Fujieda S.; Hasegawa Y.; Fukamichi K., (2003), Itinerant-electron metamagnetic transition and large magnetocaloric effects in $\text{La}(\text{Fe}_x\text{Si}_{1-x})_{13}$ compounds and their hydrides, *Phys.Rev.B.* , 67 104416.
- [15] Balli M.; Fruchart D.; Gignoux D., (2007), Optimization of $\text{La}(\text{Fe}, \text{Co})_{13-x}\text{Si}_x$ based compounds for magnetic refrigeration, *J. Phys.: Condens. Matter* , 19 236230.
- [16] Riso National Laboratory of Danemark founded in 1956.
- [17] Introduction à l'électromagnétisme des milieux matériels: Types de magnétisme, fr. wikiversité.org