

Effet magnétocalorique du gadolinium : aspects thermodynamiques et optimisation pour la réfrigération magnétique

L'électromagnétisme et la thermodynamique constituent les domaines de la physique pour lesquels je porte un intérêt particulier. L'effet magnétocalorique, qui établit un lien naturel entre ces deux disciplines et trouve une application concrète dans la réfrigération, s'est ainsi imposé comme un sujet à la fois cohérent et stimulant.

Cette étude s'appuie en partie sur la modélisation numérique du cycle de réfrigération magnétique à régénération active (AMR), dans le but d'optimiser l'effet magnétocalorique du gadolinium.

Le candidat atteste avoir travaillé en monôme.

Positionnement thématique (ÉTAPE 1) :

- *PHYSIQUE (Physique Ondulatoire)*
- *PHYSIQUE (Physique de la Matière)*
- *INFORMATIQUE (Informatique pratique)*

Mots-clés (ÉTAPE 1) :

Mots-clés (en français)	Mots-clés (en anglais)
<i>Effet magnétocalorique</i>	<i>Magnetocaloric effect</i>
<i>Machine thermique</i>	<i>Thermal machines</i>
<i>Matériaux magnétocaloriques</i>	<i>Magnetocaloric materials</i>
<i>Cycle de réfrigération</i>	<i>Refrigeration cycle</i>
<i>Régénérateurs actifs</i>	<i>Active regenerators</i>

Bibliographie commentée

L'effet magnétocalorique, mis en évidence par Emil Warburg en 1881, constitue le fondement physique sur lequel s'est développée l'étude de la réfrigération magnétique. Cependant, le développement de cette technologie a longtemps été limité aux domaines cryogéniques, en

raison de la domination du procédé conventionnel à compression de vapeur. Les limitations de ce dernier, couplées au renforcement des réglementations sur les gaz fluorés, ont provoqué un renouveau d'intérêt pour la réfrigération magnétique à partir de la fin des années 1990, donnant lieu à de nombreuses publications scientifiques. [1]

D'un point de vue physique, l'effet magnétocalorique (EMC) se définit comme une propriété intrinsèque des matériaux magnétiques (ferromagnétiques ou antiferromagnétiques), se manifestant par une variation réversible de leur température sous l'action d'un champ magnétique externe, dans des conditions adiabatiques. D'un point de vue thermodynamique, cet effet résulte d'un couplage magnétothermique. Lors de l'aimantation sous un champ appliqué, l'ordre magnétique augmente, ce qui réduit l'entropie magnétique. Pour maintenir l'entropie totale constante dans des conditions adiabatiques, cette diminution est compensée par une augmentation de l'entropie du réseau cristallin, se traduisant par un échauffement du matériau. Le processus inverse se produit lors de la désaimantation. L'intensité de cet effet est maximale autour de la température de transition magnétique du matériau, dite température de Curie, où la sensibilité du désordre magnétique à un champ externe est la plus forte. [4]

Trois types de sources de champ magnétique sont envisageables : électroaimants, bobines supraconductrices et aimants permanents. Les électroaimants sont souvent écartés en raison de leurs pertes énergétiques élevées. Bien que peu énergivores, les bobines supraconductrices nécessitent un refroidissement cryogénique complexe, les rendant plus adaptées aux applications industrielles qu'aux usages domestiques. Les aimants permanents s'imposent donc comme la solution la plus viable pour des systèmes de réfrigération magnétique compacts et efficaces. [1]

Pour des applications à température ambiante, un matériau magnétocalorique doit présenter un EMC important, caractérisé par une forte variation d'entropie magnétique et une élévation de température significative sous l'action d'un champ de quelques teslas. Ces propriétés sont idéalement réunies dans le gadolinium ($T_c = 293 \text{ K}$), dont l'EMC, de l'ordre de 2 K/T , en fait le matériau de référence. Sa disponibilité limitée et son coût motivent toutefois la recherche d'alliages alternatifs offrant un compromis similaire entre performance magnétocalorique et viabilité économique. [3][1]

L'exploitation directe de l'effet magnétocalorique pour le refroidissement autour de la température ambiante reste limitée par les faibles écarts de température atteignables, notamment avec des aimants permanents. Pour amplifier cet effet, le cycle de réfrigération magnétique à régénération active (AMR) a été proposé par Barclay et Steyert en 1982. Ce principe repose sur la combinaison de l'EMC avec un procédé de régénération thermique : un fluide caloporteur circule à travers un lit de matériau magnétocalorique, permettant de transférer et d'amplifier la différence de température au sein du système. Ce concept a conduit au dépôt d'un brevet pour un nouveau cycle magnétothermodynamique en 1983. [2]

Le cycle AMR est particulièrement adapté aux systèmes fonctionnant à température ambiante. Il se déroule en quatre étapes successives : une aimantation adiabatique, suivie d'un refroidissement isochamp durant lequel un fluide caloporteur évacue la chaleur vers l'extérieur ;

une désaimantation adiabatique, puis un chauffage isochamp à champ nul, permettant le transfert du froid vers la source à refroidir. La répétition de ce cycle permet d'amplifier et de stabiliser un gradient de température exploitable. [2]

Problématique retenue

Comment l'effet magnétocalorique du gadolinium peut-il être caractérisé, puis optimisé autour de sa température de Curie, notamment à l'aide de la modélisation d'un cycle de réfrigération active (AMR) ?

Objectifs du TIPE du candidat

- 1-Comprendre les mécanismes physiques et thermodynamiques de l'effet magnétocalorique.
- 2-Identifier les principaux matériaux magnétocaloriques et déterminer quantitativement l'effet magnétocalorique du gadolinium.
- 3-Mettre en place une modélisation numérique du cycle de réfrigération active (AMR)

Références bibliographiques (ÉTAPE 1)

- [1] JULIEN ROUDAU : Modélisation et conception de systèmes de réfrigération magnétique autour de la température ambiante : <https://theses.hal.science/tel-00652481v2>
- [2] RADIA HAMANE : Alliages à transition ferromagnétique de 1er ordre pour applications magnétocaloriques : propriétés magnétiques et thermiques : <https://hal.science/tel-03639081>
- [3] BOUDJELAL HICHAM : Etude technique d'un dispositif de réfrigération magnétique opérant près de la température ambiante : <https://repository.enp.edu.dz/jspui/handle/123456789/1718>
- [4] SONIA KHADECHI-HAJ KHLIFA : Propriétés structurales, magnétiques et magnétocaloriques de pnictures isotopes de Mn(Fe,Co)P : <https://theses.hal.science/tel-01496267>
- [5] HOUSSEM RAFIK EL-HANA BOUCHEKARA : RECHERCHE SUR LES SYSTEMES DE REFRIGERATION MAGNETIQUE. MODELISATION NUMERIQUE, CONCEPTION ET OPTIMISATION : <https://theses.hal.science/tel-00331526v1>

Références bibliographiques (ÉTAPE 2)

- [1] CÉDRIC DUPUIS : Matériaux à effet magnétocalorique géant et systèmes de réfrigération magnétique : <https://www.researchgate.net/publication/48907258>

DOT

[1] : *[Octobre 2025] : Étude bibliographique et compréhension de l'effet magnétocalorique (EMC) et de son rôle dans la réfrigération magnétique.*

[2] : *[Décembre 2025] : Rédaction du code Python pour la simulation du cycle AMR, visant à optimiser l'effet magnétocalorique du gadolinium.*

[3] : *[Février 2026] : Première tentative de mesure de l'EMC du gadolinium – échec dû à un électroaimant non fonctionnel. Analyse des causes et recherche d'une solution alternative.*

[4] : *[Mars-Mai 2026] : Recherche d'un électroaimant fonctionnel pour la mesure expérimentale de l'EMC du gadolinium – prospection auprès de laboratoires et fournisseurs spécialisés.*