

# الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

## وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR  
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE MOHAMED SEDDIK BENYAHIA JIJEL

Faculté des sciences et de la technologie

Département de l'Electrotechnique

N° : ...../2024

### MEMOIRE DE MASTER

DOMAINE : Sciences et Technologies

FILIERE : électromécanique

SPECIALITE : électromécanique

### Thème

**Etude d'un système de réfrigération magnétique active à  
régénération fonctionnant autour de la température ambiante**

Présenté Par :  
Badis Niboucha  
Aymene Bouabdallah

Encadrés Par :  
Abdeldjalil Ghediri

Date de soutenance : 01/07/2024

### Jury de Soutenance

Président : Tarik Hacib                      Professeur Univ MSB Jijel  
Encadreur : Abdeldjalil Ghediri          MAB Univ MSB Jijel  
Examineur : Mohamed Chelabi           MAB Univ MSB Jijel

Promotion : 2023 /2024

## **Remerciements**

*Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de ce mémoire.*

*Tout d'abord, je remercie mon directeur de recherche, A.GHEDIRI, pour ses conseils avisés, son soutien constant et sa patience tout au long de ce travail. Ses connaissances approfondies et sa rigueur scientifique ont été une source d'inspiration et ont grandement enrichi ce projet.*

*Je souhaite également remercier l'ensemble des enseignants et chercheurs de l'Université Mohammed Seddik Benyahia – JIJEL pour leur expertise et leur disponibilité. Leur enseignement et leurs suggestions ont été précieux pour approfondir mes connaissances en Électromagnétisme et Compatibilité Électromagnétique.*

*Je suis reconnaissant envers mes collègues et amis, pour leur soutien moral et leurs encouragements. Les discussions et échanges que nous avons eus ont été une source de motivation et d'enrichissement personnel.*

*Enfin, j'adresse un remerciement tout particulier à ma famille pour leur amour et leur soutien indéfectible. Leur compréhension et leurs encouragements m'ont permis de mener à bien ce travail.*

**Merci à tous.**



## SOMMAIRE

<b>INTRODUCTION GENERALE.....</b>	<b>1</b>
-----------------------------------	----------

### **Chapitre I : Réfrigération magnétique : effet magnétocalorique et matériaux**

I.1 Introduction .....	4
I.2 Historique .....	4
I.2.1 Découverte .....	4
I.2.2 Vers des températures de plus en plus basses .....	4
I.2.3 Une application à température ambiante .....	5
I.3 Principe physique .....	6
I.4 Analyse thermodynamique de l'effet magnétocalorique .....	8
I.4.1 Relations de Maxwell .....	8
I.5 Matériaux Magnétocaloriques .....	11
I.5.1 Nature de la transition magnétique .....	12
I.5.1.1 Matériaux dits « du premier ordre» .....	12
I.5.1.2 Matériaux du second ordre .....	13
I.5.2 Principaux matériaux magnétocaloriques .....	13
I.6. Conclusion .....	16

### **Chapitre II : Systèmes de réfrigération magnétique**

II.1 Introduction .....	17
II.2 Application de l'EMC à la production de froid .....	17
II.3 Composition et fonctionnement .....	19



II.3.1 Composition .....19

II.3.2 Fonctionnement .....20

II.3.2.1 Différentes phases d'un cycle .....20

II.3.2.2 Système linéaire/rotatif .....20

II.3.2.3 Déplacement du régénérateur/de la structure d'aimants .....21

II.3.2.4 Transferts thermiques .....21

II.3.2.4 Association série/parallèle .....23

II.3.3 Cycles de réfrigération magnétique .....24

II.3.3.1 Cycle magnétique de Carnot .....24

II.3.3.2 Cycle magnétique d'Ericsson .....25

II.3.3.3 Cycle magnétique de Brayton .....26

II.3.3.4 Cycle magnétique d'AMRR (Réfrigération par régénération magnétique active) .....27

II.4 Critères de choix .....29

II.5 Conclusion.....30

**Chapitre III : Modélisation de cycle de réfrigération magnétique active (AMR)**

II.1 Introduction .....32

III-2 Formulations .....32

III.3 Application à l'AMRR.....33

III.3.1 Mise en équation.....34

III.3.1.1 Elément de référence du fluide.....34

III.3.1.2 Elément de référence du matériau magnétocalorique.....35

III.3.1.3 Système d'équations final .....36



III.3.2 Discrétisation numérique et résolution .....	37
III.4 Résultats du modèle.....	40
III.5 Conclusion .....	45
<b>Chapitre IV : Optimisation des systèmes AMR par algorithmes génétiques</b>	
IV.1 INTRODUCTION .....	46
IV.2 Définition des Algorithmes Génétiques .....	47
IV.3 L'algorithme génétique hybride .....	48
IV.4 Optimisation de système AMR par algorithmes génétiques .....	48
IV.4.1 Optimisation de système AMR par algorithmes génétiques .....	49
IV.4.1.1 Optimisation mono-objectif .....	49
IV.4.1.2 Optimisation multi-objectifs .....	51
IV. 6 CONCLUSION .....	53
<b>CONCLUSION GENERALE</b> .....	54
<b>BIBLIOGRAPHIE</b> .....	56

## LISTE DES FIGURES

<b>Figure 1.1:</b> Schématisation de l'effet magnétocalorique. ....	7
<b>Figure I.2 :</b> Schéma de principe de l'effet magnétocalorique. ....	7
<b>Figure I.3 :</b> Evolution de l'entropie magnétique en fonction de la température. ....	8
<b>Figure I.4 :</b> La représentation de la transition de phase et la variation de l'entropie en fonction du type de matériau. ....	13
<b>Figure I.5 :</b> Évolution en fonction de la température de l'aimantation et de l'entropie du gadolinium autour de sa température de Curie $T_C$ .....	14

<b>Figure I.6 :</b> Évolution de l'entropie magnétique en fonction de la température .....	14
<b>Figure II.1 :</b> Analogie entre les cycles thermomagnétique et thermodynamique.....	18
<b>Figure II.2:</b> Comparaison des coefficients de performance des différentes techniques de production de froid.....	18
<b>Figure II.3 :</b> Composition d'un système de réfrigération magnétique. ....	19
<b>Figure II.4 :</b> Les deux grandes familles de systèmes de réfrigération magnétique. ....	21
<b>Figure II.5 :</b> Double circuit hydraulique utilisé par Sarlah et al. ....	22
<b>Figure II.6 :</b> Système à fluide oscillant. ....	22
<b>Figure II.7 :</b> Double circuit hydraulique utilisé par Cooltech Applications .....	23
<b>Figure II.8 :</b> Illustration des différentes possibilités d'association des régénérateurs. ....	23
<b>Figure II.9 :</b> La représentation du cycle magnétique de Carnot.....	24
<b>Figure II.10 :</b> La représentation du cycle magnétique d'Ericsson .....	26
<b>Figure II.11 :</b> La représentation du cycle magnétique de Brayton.....	27
<b>Figure II.12 :</b> La représentation du cycle magnétique d'AMRR.....	28
<b>Figure II.13 :</b> Cycle de réfrigérateur AMR .....	29
<b>Figure II.14 :</b> Différentes configurations du régénérateur magnétique actif.....	30
<b>Figure III.1 :</b> Schéma du modèle thermique AMRR avec les paramètres les plus importants ..	34
<b>Figure III.2 :</b> Représentation schématique du système de réfrigération magnétique étudié .....	34
<b>Figure III.3 :</b> Élément de référence du fluide .....	35
<b>Figure III.4 :</b> Élément de référence du matériau magnétocalorique .....	36
<b>Figure III.5 :</b> Algorithme de résolution numérique .....	39
<b>Figure III.6 :</b> Régénérateur en plaques et Cellule équivalente (plaque + fluide) .....	40



**Figure III.7** : Schéma d'un réfrigérateur magnétique actif (AMR) .....40

**Figure III.8** : Caractéristique du cycle magnétothermique .....41

**Figure III.9** : Évolution du span de température : Comparaison entre les résultats expérimentaux et prédictions numériques, utilisant Gd comme réfrigérant magnétique .....43

**Figure III.10** : Evolution de la température aux deux extrémités du matériau Gd .....43

**Figure III.11** : Variation temporelle et cyclique de la température aux deux extrémités du matériau .....44

**Figure III.12** : Répartition spatiale de la température dans le matériau .....44

**Figure III.13** : Energies donnés par le modèle AMRR .....45

**Figure IV.1** : Organigramme d'un Algorithme Génétique .....48

**Figure IV.2** : Evolution de la valeur fitness du meilleur individu en fonction de la génération..50

**Figure IV.3** : Optimisation Multi-Objectifs avec Algorithme Génétique .....53

**LISTE DES TABLEAUX**

**Tableau I.1** : Tableau de synthèse des caractéristiques magnéto-caloriques de certains matériaux.....15

**Tableau III.1** : Paramètres utilisés dans le modèle numérique de l'AMR .....42

**Tableau IV.1** : Paramètres d'optimisation avec leurs limites (contraintes) .....49

**Tableau IV.2** : Paramètres de conception optimaux obtenus .....50

**Tableau IV.3** : Objectifs optimaux atteints .....51

**Tableau IV.4** : Paramètres de conception optimaux "front de Pareto" obtenus .....52

---

---

INTRODUCTION GENERALE

---

---



## INTRODUCTION GENERALE

La production de froid est omniprésente dans notre vie quotidienne. On la retrouve dans des applications très diverses telles que la climatisation de bâtiments et de véhicules, la conservation d'aliments, de médicaments et de produits chimiques, la liquéfaction de gaz (hydrogène, azote, hélium) ou encore le refroidissement d'appareils électroniques. Au total, la production de froid représente près de 15% de la consommation électrique mondiale et son utilisation ne cesse de croître dans les pays développés. Elle représente 20% de la consommation électrique aux États-Unis et jusqu'à 25% au Japon [1].

La technologie la plus utilisée à l'heure actuelle est celle du réfrigérateur à compression. Elle est basée sur le principe thermodynamique de compression et de détente d'un fluide frigorigène. Cette technologie est utilisée depuis sa mise au point en 1835 par Perkins [2], qui réalisa un réfrigérateur basé sur la compression/détente d'éther éthylique [3]. Trois fluides frigorigènes s'imposent à cette époque : le dioxyde de carbone, l'ammoniac et le dioxyde de soufre.

Par la suite les chimistes ont proposé les chlorofluorocarbures (CFC) et les hydrochlorofluorocarbures (HCFC) comme fluides frigorigènes en raison de leur absence de toxicité et de leur facilité de manipulation (car ininflammables). Ces fluides ont été utilisés pendant près de 60 ans jusqu'à ce que leur responsabilité dans la destruction de la couche d'ozone soit établie. La production et l'utilisation (pour l'entretien et la maintenance) des CFC a donc été interdite au 1<sup>er</sup> janvier 2001, suite au protocole de Montréal (1987). Quand aux HCFC, leur utilisation est interdite après 2015 [1]. Ces fluides frigorigènes ont donc été remplacés dans les équipements neufs par les hydrofluorocarbures (HFC), inoffensifs pour la couche d'ozone. Malheureusement ces composés sont de puissants gaz à effet de serre (par exemple le potentiel de réchauffement global du R23 est de 12 100 kg eq. CO<sub>2</sub>).

Depuis peu, on propose un retour aux fluides naturels et aux hydrocarbures pour remplacer les HFC. Les principaux fluides naturels étudiés sont le dioxyde de carbone (R744), l'ammoniac (R717) et l'eau (R718). Néanmoins tous ces fluides naturels et hydrocarbures possèdent des inconvénients :

- Le dioxyde de carbone fonctionne à haute pression ce qui nécessite l'utilisation de composants peu compétitifs sur le plan économique.
- L'ammoniac est un fluide toxique soumis à une réglementation très contraignante.

- Les hydrocarbures sont fortement inflammables et ne peuvent être distribués dans des applications domestiques
- L'eau nécessite un circuit sous vide (car sa pression saturante est très basse) et l'ajout d'un antigel (car sa température de solidification est de 0°C). Mais son principal inconvénient reste sa puissance volumique excessivement faible qui nécessite le recours à des débits très élevés.

En plus des contraintes environnementales, la réfrigération à compression a atteint sa limite d'efficacité, c'est pourquoi la recherche s'oriente vers des technologies de rupture pour la production de froid telles que la réfrigération thermoélectrique, la réfrigération thermoacoustique, la réfrigération barocalorique et la réfrigération magnétique.

Nous nous intéressons ici à la réfrigération magnétique qui semble être une des technologies les plus prometteuses. Cette technologie est basée sur l'effet magnétocalorique, une propriété intrinsèque de certains matériaux magnétiques, qui se traduit par un changement de température de ces matériaux lorsqu'ils sont soumis à une variation de champ magnétique. Plusieurs prototypes de réfrigération magnétique ont été réalisés à travers le monde mais il reste encore des progrès à faire tant sur le plan fondamental que pratique pour rendre cette technologie industrialisable et compétitive.

### **Objectifs de ce mémoire**

Ce mémoire s'articulera autour de trois objectifs principaux :

- Comprendre le principe de base de la technologie de réfrigération magnétique.
- Effectuer une modélisation 1D d'un système de réfrigération magnétique à régénération active (AMR).
- Optimiser ce système en tenant compte des divers paramètres pour améliorer ses performances globales.

### **Structure du mémoire**

Ce travail est structuré en quatre chapitres :

Le premier chapitre retrace l'histoire de la réfrigération magnétique. Il décrit l'effet magnétocalorique et sa modélisation thermodynamique et il présente succinctement les matériaux magnétocaloriques les plus propices à des applications à température ambiante.

Le deuxième chapitre détaille la mise en œuvre de l'effet magnétocalorique au sein de systèmes de réfrigération. Il décrit les différents cycles de réfrigération magnétique possibles.

Il définit enfin des critères de performance représentatifs des systèmes de réfrigération magnétique autour de la température ambiante.

Le troisième chapitre se concentre sur les formulations mathématiques et physiques nécessaires pour modéliser les processus de transfert de chaleur dans les systèmes de réfrigération magnétique. Nous développerons un modèle numérique 1D pour simuler le comportement thermique des régénérateurs et validerons ce modèle à l'aide de données expérimentales.

Au dernier chapitre nous aborderons l'optimisation des systèmes de réfrigération magnétique à régénération active, en utilisant des techniques d'optimisation multi-objectifs. Ce chapitre explorera les paramètres à optimiser et les méthodes employées, telles que les algorithmes génétiques, pour améliorer les performances du système en respectant les contraintes et les spécifications de conception.

Ce mémoire s'achèvera par une conclusion générale résumant les principaux résultats obtenus.

# CHAPITRE 1

---

---

Réfrigération magnétique : effet magnéto-calorique et  
matériaux

---

---

## **I.1 Introduction**

Répondre aux besoins croissants en réfrigération et climatisation et réduire en même temps les émissions de gaz à effet de serre passe par la recherche de nouveaux principes et techniques de production de froid. C'est pourquoi la réfrigération magnétique suscite actuellement l'intérêt des nombreuses équipes de recherche en Europe, aux Etats Unis, en Chine et au Japon.

Le principe du froid magnétique repose sur l'exploitation de l'effet magnéto-calorique qui se traduit par une variation instantanée et réversible de la température des certains matériaux lorsqu'ils sont soumis à une variation de l'entropie magnétique.

## **1.2 Historique**

### **1.2.1 Découverte**

L'effet magnéto-calorique (EMC) a été découvert il y a plus d'un siècle lors du fourmillement d'idées lié à l'explosion industrielle, mais son application effective à température ambiante n'a pas plus d'un quart de siècle [2]. Ce phénomène fut observé pour la première fois par Warburg en 1881 dans le fer [4]. Des systèmes de conversion d'énergie seront alors développés plus tard par Tesla [5] puis par Edison [6] utilisant cet effet avec des matériaux dont l'aimantation possède une forte dépendance à la température.

Il faudra attendre 1905 pour que Paul Langevin démontre pour la première fois que la variation de l'aimantation d'une substance magnétique induisait un changement réversible de sa température [7].

En 1918, Auguste Piccard et son directeur de thèse Pierre Weiss avancent la première interprétation théorique de ce phénomène [8]. Ils observent dans le nickel un échauffement et un refroidissement au voisinage de sa température de Curie, température limite au-delà de laquelle un matériau ferromagnétique devient paramagnétique. Ils lui donnèrent le nom d'effet magnéto-calorique

### **I.2.2 Vers des températures de plus en plus basses**

Debye [9] et Giauque [10] proposeront dans les années vingt d'utiliser l'effet magnéto-calorique afin d'atteindre des températures très basses, proches du zéro absolu (0 K) grâce à un sel paramagnétique. Cette application est appelée désaimantation adiabatique. Il faudra cependant attendre 1933 pour que cette théorie puisse être validée expérimentalement par Giauque et MacDougall [11] qui réussirent la première désaimantation adiabatique avec

du sulfate de gadolinium en obtenant la température de 0,5 K sous un champ magnétique de 0,8 T. Ils seront nobélisés pour leurs travaux en 1949 et ouvriront la voie à la recherche de nouveaux systèmes pour atteindre des températures de plus en plus basses.

Les recherches de Haas *et al* [12] sur la désaimantation adiabatique de différents matériaux comme le fluorure de cérium ( $\text{CeF}_3$ ), de l'éthylsulfate de dysprosium ( $\text{Dy}(\text{C}_2\text{H}_5\text{SO}_4)_3$ ) et de l'éthylsulfate de cérium ( $\text{Ce}(\text{C}_2\text{H}_5\text{SO}_4)_3$ ) leur permettent d'obtenir une température de 0,08 K avec l'éthylsulfate de cérium pour un champ de 2,76 Tesla en 1934. De leur côté, la même année, Kürti et Simon [13] obtiennent une température de 0,1 K avec du sulfate d'ammonium et manganèse ( $\text{MnSO}_4(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ) sous un champ de 0,6 Tesla.

Heer et Daunt [14] proposeront de mettre en place des prototypes utilisant l'EMC dans un cycle de réfrigération. Leur premier prototype réalisé en 1953 [15] permettra de maintenir un réservoir à une température de 0,3 K en utilisant la désaimantation d'alun de chrome ( $\text{KCr}(\text{SO}_4)_2$ ) avec une puissance de 17  $\mu\text{W}$ . Leur deuxième prototype [16] utilisera de l'alun de fer et permettra de maintenir une température de 0,26 K pour une puissance de 7  $\mu\text{W}$ .

En 1951, Darby *et al* [17] mettent en place un système de réfrigération magnétique utilisant des matériaux avec des températures de Curie différentes afin de créer une réfrigération à deux étages. Ils utiliseront un composé d'alun de fer dans le premier étage et un mélange d'alun d'aluminium et d'alun de chrome dans le second étage. Ce système leur permettra d'atteindre une température de 3 mK avec un champ de 0,42 Tesla. Les systèmes multi-étages se multiplieront par la suite et permettront d'atteindre des températures extrêmes (jusqu'à  $10^{-8}$  K) favorisant les études des propriétés physiques des matériaux à proximité du zéro absolu et permettant ainsi la conception de systèmes fonctionnant à très faible température.

### **I.2.3 Une application à température ambiante**

En 1966, van Geuns [18] suggère d'utiliser l'effet magnéto-calorique à des températures supérieures à 1 K avec des écarts de température plus importants en utilisant un cycle de régénération passive (voir section II.3.3). Pour cela, il utilise de l'hélium comme fluide caloporteur et comme régénérateur thermique. Ceci permettra de produire de l'hélium superfluide lorsque le réfrigérateur fonctionne entre 1 K et 20 K ou de l'hydrogène liquide pour des températures de fonctionnement comprises entre 20 K et 70 K.

Ce système sera aussi utilisé pour le refroidissement des aimants supraconducteurs. Pratt *et al* [19] testeront plusieurs matériaux dans ce but et obtiendront les meilleurs résultats

avec le sulfate de gadolinium, matériau permettant de faire fonctionner leur système entre 2,1 K et 4 K et d'obtenir une puissance froide de 0,2 W.

Brown proposera en 1976 la première pompe à chaleur magnétique fonctionnant à température ambiante avec laquelle il réalisera un écart de température proche des 50°C [20].

Depuis, l'effet magnétocalorique est reconnu comme un phénomène intéressant pouvant être utilisé dans la réfrigération à température ambiante mais aussi comme technique de chauffage (fonctionnement en pompe à chaleur), et pourrait concurrencer les systèmes conventionnels actuels.

### I.3 Principe physique

L'effet magnétocalorique est une propriété intrinsèque des matériaux paramagnétiques et ferromagnétiques qui se traduit par une variation de leur température lorsqu'ils sont soumis à une variation de champ magnétique dans des conditions adiabatiques. La plupart des matériaux magnétocaloriques s'échauffent lorsqu'on les aimante et se refroidissent lorsqu'on les désaimante, on parle d'effet magnétocalorique direct.

L'effet magnétocalorique considéré comme le résultat d'un changement d'entropie du solide est la conséquence d'un couplage magnétothermique entre les différentes contributions de l'entropie totale  $S$  [3]. L'entropie totale d'un matériau magnétique est la somme de l'entropie magnétique  $S_m$ , l'entropie de réseau  $S_r$  et l'entropie électronique  $S_e$ . Suite à l'application d'un champ magnétique extérieur, les moments magnétiques s'alignent et s'orientent dans la même direction que le champ magnétique appliqué, conduisant à une réduction de l'entropie magnétique (ordre magnétique). Dans des conditions adiabatiques (sans échange de chaleur avec le milieu extérieur), l'entropie totale doit rester constante si on tient  $S_e$  pour négligeable. La mise en ordre des moments magnétiques sera essentiellement compensée par l'apparition d'un désordre dans les arrangements atomiques, c'est-à-dire d'un échauffement par aimantation adiabatique. Inversement, la suppression du champ favorise le désordre des moments magnétiques au détriment des arrangements atomiques et se traduira par la diminution de la température du matériau : c'est le refroidissement par désaimantation adiabatique (**Figures I.1 et I.2**). L'effet magnétocalorique est la différence de température adiabatique  $\Delta T_{ad}$  associée à la variation de champ appliqué  $\Delta H = H_{max} - H_{min}$ .

L'effet magnétique est maximal autour de la température de Curie  $T_C$  des matériaux magnétiques, qui correspond à la transition de la phase ferromagnétique ou ferrimagnétique (état ordonné) à la phase paramagnétique (état désordonné). On cherche donc à utiliser les matériaux magnétocaloriques à une température proche de  $T_C$ .

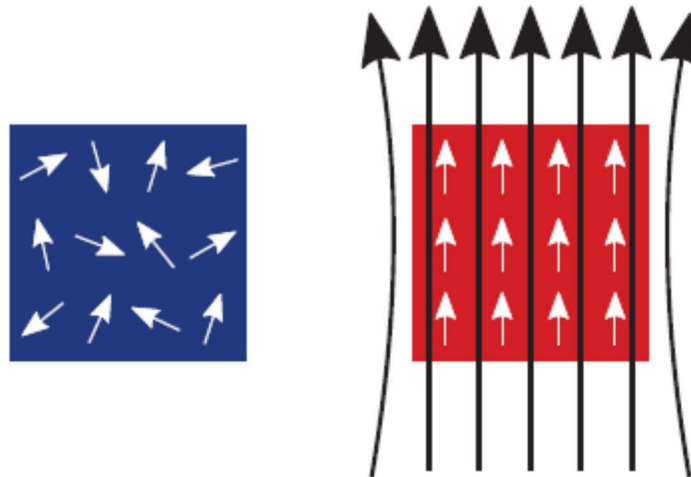


Figure 1.1 – Schématisation de l'effet magnéto-calorique

Dans la figure ci-dessus, à gauche : sans champ magnétique appliqué, les moments magnétiques sont dirigés de façon aléatoire. A droite : Lorsqu'on applique un champ magnétique, les moments magnétiques s'alignent et la température du matériau augmente.

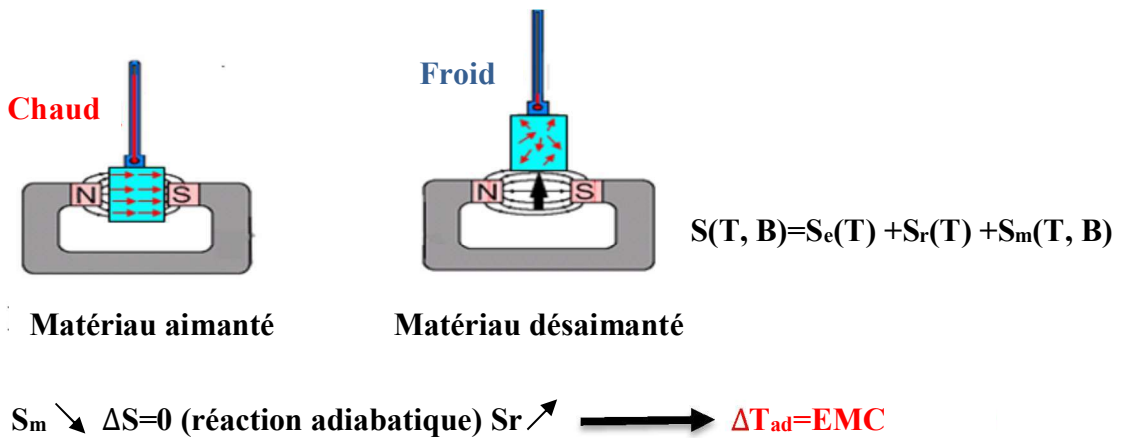
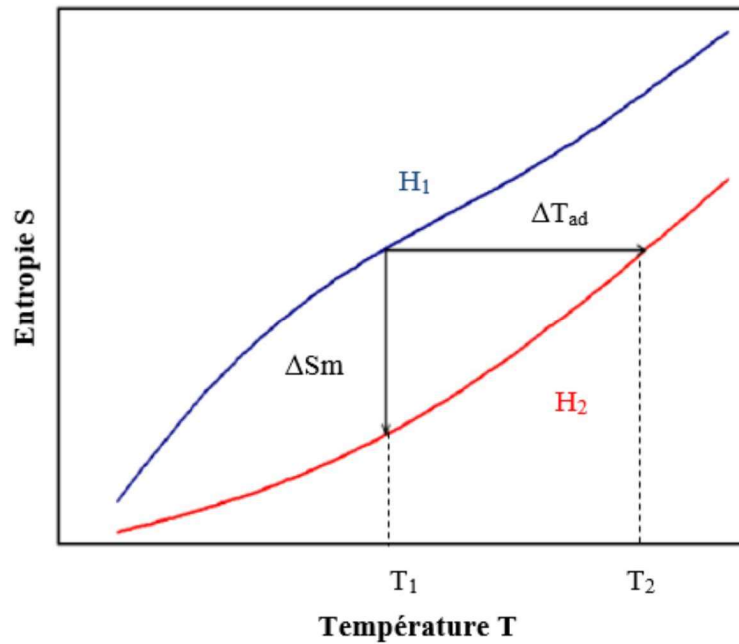


Figure I.2 : Schéma de principe de l'effet magnéto-calorique.

La variation adiabatique de température  $\Delta T_{ad}$ , est la différence entre la température de l'état final et celle de l'état initial dans des conditions adiabatiques (entropie constante), (Figure I.3).





**Figure I.3 :** Evolution de l'entropie magnétique en fonction de la température pour deux variations de champ  $H_1$  et  $H_2$  avec  $H_2 > H_1$ .

#### I.4 Analyse thermodynamique de l'effet magnéto-calorique

Un système thermodynamique est caractérisé par des variables d'état. On distingue les variables extensives qui dépendent de la taille du système considéré, des variables intensives qui n'en dépendent pas. Dans le cas d'un matériau magnétique, les variables extensives sont le volume  $V$ , l'aimantation  $M$  et l'entropie  $S$ . Les variables intensives sont la pression  $P$ , la température  $T$  et l'amplitude du champ magnétique  $H$ . L'énergie interne  $U$  est une fonction thermodynamique qui caractérise l'énergie d'un système fermé et l'entropie  $S$  caractérise son désordre [1], [21], [22].

##### I.4.1 Relations de Maxwell

Un matériau magnétique plongé dans un champ magnétique est décrit, thermodynamiquement parlant, par l'enthalpie libre  $G$  :

$$G(P, H, T) = U + P.V - \mu_0.M.H - TS \quad (\text{I.1})$$

Où  $\mu_0$  est la perméabilité magnétique du vide.

La différentielle totale de  $G$  a pour expression :

$$dG(P, H, T) = dU + P.dV - \mu_0.H.dM - T.dS + V.dP - \mu_0.M.dH - S.dT \quad (\text{I.2})$$

Si l'on considère P, H et T comme variables d'état, l'équation I.2 se réduit à :

$$dG(P, H, T) = \left(\frac{\partial G}{\partial P}\right)_{H,T} dP + \left(\frac{\partial G}{\partial H}\right)_{P,T} dH + \left(\frac{\partial G}{\partial T}\right)_{P,H} dT \quad (I.3)$$

En identifiant les équations I.2 et I.3, on retrouve d'une part la variation d'énergie interne donnée par le premier principe de la thermodynamique :

$$dU = TdS + \mu_0 HdM - pdV \quad (I.4)$$

Et d'autre part, dG qui se réduit à :

$$dG(P, H, T) = VdP - \mu_0 MdH - SdT \quad (I.5)$$

En identifiant maintenant l'expression I.5 à l'expression I.3, on obtient les équations d'état suivantes :

$$V = \left(\frac{\partial G}{\partial P}\right)_{H,T} \quad (I.6)$$

$$\mu_0 M = - \left(\frac{\partial G}{\partial H}\right)_{P,T} \quad (I.7)$$

$$S = - \left(\frac{\partial G}{\partial T}\right)_{P,H} \quad (I.8)$$

En dérivant ces expressions on en déduit les relations dites de Maxwell. Par exemple, avec les équations I.7 et I.8 :

$$\begin{aligned} \mu_0 \left(\frac{\partial M}{\partial T}\right)_{P,H} &= - \frac{\partial}{\partial T} \left( \left(\frac{\partial G}{\partial H}\right)_{P,T} \right)_{P,H} = - \frac{\partial}{\partial H} \left( \left(\frac{\partial G}{\partial T}\right)_{P,H} \right)_{P,T} = \left(\frac{\partial S}{\partial H}\right)_{P,T} \\ \mu_0 \left(\frac{\partial M}{\partial T}\right)_{P,H} &= \left(\frac{\partial S}{\partial H}\right)_{P,T} \end{aligned} \quad (I.9)$$

Grâce à cette équation, la variation d'entropie associée à l'effet magnétocalorique à pression et température constante correspondant au  $\Delta S_{isoT}$  de la figure I.2 peut être déterminée :

$$\begin{aligned} \int_{H_1}^{H_2} \mu_0 \left(\frac{\partial M}{\partial T}\right)_{P,H} dH &= \int_{H_1}^{H_2} \left(\frac{\partial S}{\partial H}\right)_{P,T} dH = \Delta S(T, H_1 \rightarrow H_2) \\ \Delta S(T, H_1 \rightarrow H_2) &= \int_{H_1}^{H_2} \mu_0 \left(\frac{\partial M}{\partial T}\right)_{P,H} dH \end{aligned} \quad (I.10)$$

Cette variation d'entropie est souvent appelée variation d'entropie magnétique  $\Delta S_m$ . Cela se justifie dans le cas où l'application du champ magnétique change uniquement l'ordre magnétique du matériau.

De cette équation, on voit que l'on peut utiliser une mesure magnétique pour obtenir cette variation d'entropie. L'équivalent discret de l'équation I.10 est :

$$\Delta S = \sum_i \frac{M_{i+1} - M_i}{T_{i+1} - T_i} \mu_0 \Delta H_i \quad (\text{I. 11})$$

Cette équation est applicable soit sur une mesure d'aimantation en fonction de la température pour différents champs constants soit sur une mesure d'aimantation en fonction du champ pour différentes températures constantes ce qui est généralement le cas car ce dernier type de mesure est plus rapide.

La grandeur  $\Delta S_m$  est reliée à la quantité de chaleur qui peut être transférée du côté froid  $T_1$  au côté chaud  $T_2$ . Cette quantité, appelée capacité de réfrigération est définie comme :

$$q = \int_{T_1}^{T_2} \Delta S_m(T, H_1 \rightarrow H_2) dT \quad (\text{I. 12})$$

S étant une variable de P, H et T, sa différentielle prend la forme :

$$S = S(P, H, T)$$

$$dS = \left(\frac{\partial S}{\partial P}\right)_{H,T} dP + \left(\frac{\partial S}{\partial H}\right)_{P,T} dH + \left(\frac{\partial S}{\partial T}\right)_{P,H} dT \quad (\text{I. 13})$$

On définit la capacité calorifique à pression et champ constants comme :

$$C_{P,H} = T \left(\frac{\partial S}{\partial T}\right)_{P,H} \quad (\text{I. 14})$$

En utilisant la relation de Maxwell (éq. I.9) et la capacité calorifique ainsi définie et, en considérant le système à pression constante, on peut réécrire l'équation I.13 de la différentielle de l'entropie :

$$dS = \mu_0 \left(\frac{\partial M}{\partial T}\right)_{P,H} dH + \frac{C_{P,H}}{T} dT \quad (\text{I. 15})$$

En considérant un environnement isotherme ( $dT = 0$ ),  $dS$  est la variation d'entropie correspondant à la variation infinitésimale  $dH$ . On retrouve la variation d'entropie définie à la figure I.2 de l'équation I.10 en considérant une variation  $\Delta H = H_2 - H_1$  c'est à dire une intégration de  $H_1$  à  $H_2$ . On note ici que la variation d'entropie sera d'autant plus élevée que la variation d'aimantation ( $\partial M / \partial T$ ) sera importante. C'est le cas dans un composé magnétique autour de sa température critique ; par exemple, autour de la température de Curie  $T_C$  pour un ferromagnétique. Pour un champ donné ( $dH = 0$ ), on peut déterminer l'entropie à partir de la capacité calorifique grâce à l'équation I.15 :

$$dS = \frac{C_{P,H}}{T} dT \quad (\text{I. 16})$$

$$S(T, H) = \int_0^T \frac{C_{P,H}}{T} dT \quad (\text{I. 17})$$

Ainsi, la variation d'entropie due à  $\Delta H = H_2 - H_1$  peut aussi s'écrire [9] :

$$\Delta S(T, H_1 \rightarrow H_2) = \int_0^T \frac{C_{P,H_2} - C_{P,H_1}}{T} dT \quad (I.18)$$

Cette formulation montre que la variation d'entropie, dépendant de l'inverse de la température, augmente lorsqu'on se rapproche du zéro absolu. De plus, cela donne une autre méthode pour déterminer la variation d'entropie à partir de mesures de capacité calorifique.

En considérant un environnement adiabatique ( $dS = 0$ ), on peut obtenir de l'équation I.15 l'expression de la variation de température  $\Delta T$  à pression constante correspondant au  $\Delta T_{ad}$  de la figure I.2 :

$$\Delta T = -\frac{T}{C_{P,H}} \mu_0 \left( \frac{\partial M}{\partial T} \right)_{P,H} dH \quad (I.19)$$

$$\Delta T(T, H_1 \rightarrow H_2) = -\int_{H_1}^{H_2} \frac{T}{C_{P,H}} \mu_0 \left( \frac{\partial M}{\partial T} \right)_{P,H} dH \quad (I.20)$$

Il y a donc deux situations où l'effet magnétocalorique est maximal. D'abord à basse température car  $T$  intervient au numérateur de l'équation I.20 et la capacité calorifique chute vers zéro (voir plus loin). Ensuite, au voisinage d'une transition magnétique où  $(\partial M/\partial T)$  est maximal. On peut ainsi espérer appliquer l'effet magnétocalorique dans toute la gamme des températures soit en jouant sur le terme  $T/C_{P,H}$  soit sur le terme  $(\partial M/\partial T)$  en utilisant un matériau présentant une transition magnétique proche de la température à laquelle on souhaite travailler.

## I.5 Matériaux Magnétocaloriques

Pour les applications de la réfrigération magnétique autour de la température ambiante, le matériau doit présenter un EMC géant autour de cette température [23], [42]. Par EMC géant, nous entendons des variations de températures élevées (quelques kelvins à quelques dizaines de kelvins) pour des valeurs d'inductions magnétiques accessibles par des aimants ou des électroaimants supraconducteurs (quelques teslas) [23]. Même si une large gamme de matériaux avec un EMC géant existe déjà, la recherche et le développement de nouveaux matériaux magnétocaloriques est toujours active afin de les améliorer ou d'en créer d'autres. Comme le matériau magnétocalorique est le noyau principal de la réfrigération magnétique, il doit disposer de certaines caractéristiques pour être intéressant [24], [25] :

- ✓ Une température de transition proche de la température ambiante.
- ✓ Un effet magnétocalorique le plus large possible sur une large plage de température.
- ✓ Des hystérésis magnétique et thermique minimales permettant d'avoir des fréquences de fonctionnement élevées et donc une grande puissance froide.
- ✓ Une grande résistance électrique pour diminuer les pertes par courant de Foucault.
- ✓ Une grande conductivité thermique pour améliorer l'efficacité des échanges.
- ✓ De bonnes propriétés mécaniques afin de simplifier les processus de fabrication.
- ✓ Un coût d'élaboration et de production faible, nécessaire pour les applications commerciales.

### **I.5.1 Nature de la transition magnétique**

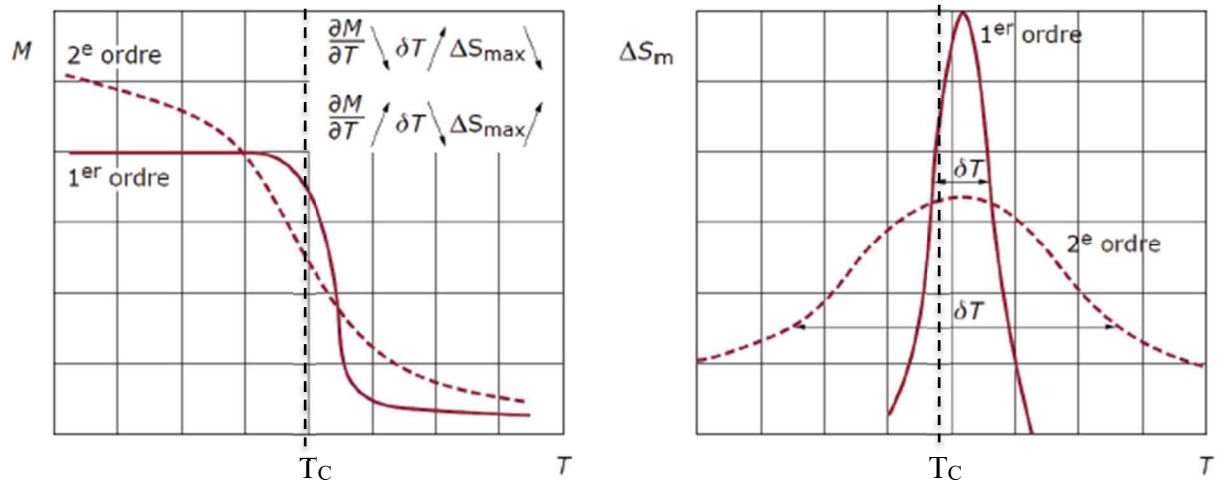
L'effet magnétocalorique apparaît dans tous les matériaux magnétiques mais ils ne réagissent pas tous de la même manière. L'effet est maximal lorsque le matériau est proche de la température de Curie, température à laquelle le matériau change d'ordre magnétique [2].

Suivant les matériaux, le changement d'ordre magnétique (par exemple de ferromagnétique à paramagnétique) ne se fait pas aux mêmes températures et les variations engendrées dépendent du type de transition de phase rencontré dans le matériau. On distingue en effet deux cas de transition de phase :

#### **I.5.1.1 Matériaux dits « du premier ordre »**

Les matériaux dits « du premier ordre », c'est-à-dire possédant une transition de phase du premier ordre, présentent de fortes variations de l'entropie magnétique  $\Delta S_M(T)$  et de la température  $\Delta T_{ad}$  mais sur un faible domaine de température  $\delta T_{FWHM}$ . C'est dans cette famille que l'on retrouve les matériaux à effet magnétocalorique géant. Toutefois, l'irréversibilité de ces systèmes et leur cinétique lente peuvent entraîner des artefacts de mesures [26].

De plus, ces matériaux peuvent présenter quelques inconvénients comme un vieillissement précoce dû aux modifications structurales accompagnant généralement ces transitions. Enfin, les pertes par hystérèse ainsi que les cinétiques assez lentes de ces transitions pourraient réduire l'efficacité des matériaux à effet magnétocalorique géant dans les systèmes de réfrigération à cycle rapide [27].



*Figure I.4 : La représentation de la transition de phase et la variation de l'entropie en fonction du type de matériau.*

### I.5.1.2 Matériaux du second ordre

Les matériaux du second ordre possèdent de plus faibles amplitudes de  $\Delta S_M(T)$  et  $\Delta T_{ad}$  mais leurs effets s'étendent sur une plus large plage de température  $\delta T_{FWHM}$  (Figure I.4) et sont exempts de phénomènes pénalisants tels que l'hystérèse, la cinétique lente et les modifications structurales.

### I.5.2 Principaux matériaux magnétocaloriques

Le premier matériau faisant référence dans le domaine de l'effet magnétocalorique à température ambiante est incontestablement le gadolinium [2], [23]. Il présente une transition magnétique de second ordre à 294 K et son effet magnétocalorique associé est d'environ 4  $K \cdot T^{-1}$  le classant ainsi dans les matériaux avec un EMC géant, c'est-à-dire de quelques  $K \cdot T^{-1}$ .

Ce matériau possède d'importantes qualités, la première étant qu'il est le seul à l'état pur à posséder un EMC aussi important. Il possède aussi une facilité de mise en forme qui lui confère une grande adaptabilité en fonction de la géométrie du système. Il est pour toutes ces qualités rapidement devenu le matériau le plus utilisé dans les prototypes actuels. Néanmoins, c'est une terre rare disponible en faible quantité, les réserves mondiales étant évaluées à 1000 tonnes. C'est pourquoi la recherche sur la découverte, la synthèse et la mise en forme de nouveaux matériaux à EMC géant est en plein essor

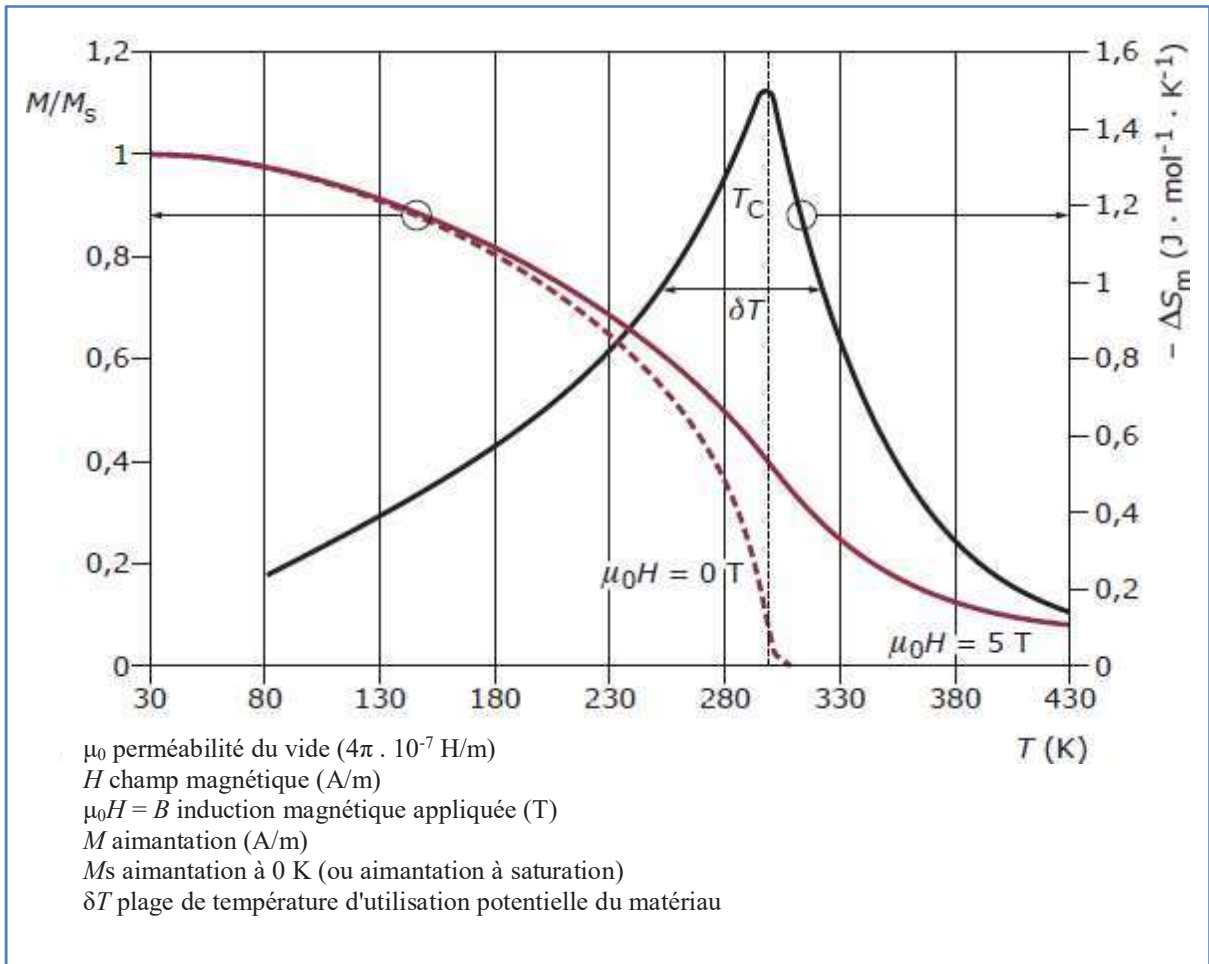


Figure I.5 : Évolution en fonction de la température de l'aimantation et de l'entropie du gadolinium autour de sa température de Curie  $T_c$

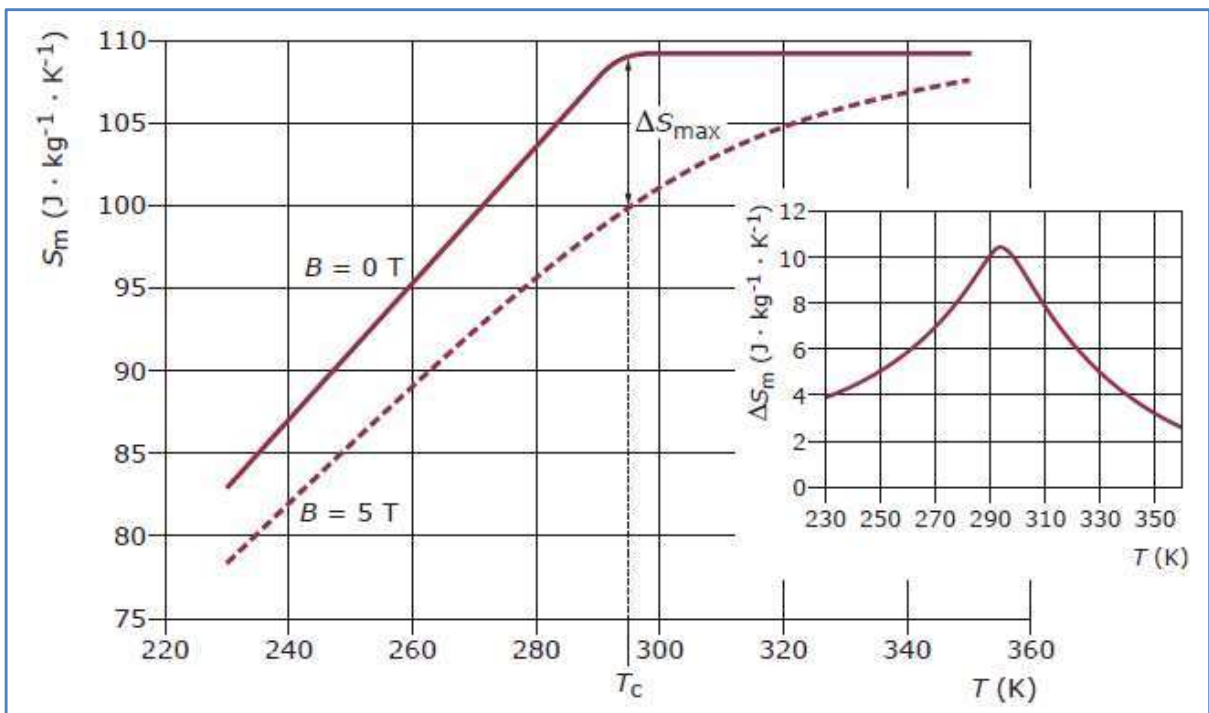


Figure I.6 : Évolution de l'entropie magnétique en fonction de la température pour 0 et 5 T et variation associée

Plusieurs matériaux répondent à certains de ces critères mais il est difficile de répondre à tous les critères. Parmi eux, il y a ceux qui possèdent un EMC géant mais dont le pic d'entropie magnétique se trouve à une température relativement éloignée de la température ambiante. La plupart des matériaux possédant un effet magnétocalorique assez intéressant pour une utilisation a été référencé [28]. On peut citer :

- **Gd<sub>5</sub>Si<sub>2</sub>Ge<sub>2</sub>** : composé ayant une variation d'entropie 5 fois supérieure à celle du gadolinium pur, avec une température de Curie de 276 K.
- **Mn<sub>1.0</sub>Fe<sub>1.0</sub>P<sub>0.6</sub>Si<sub>0.3</sub>Ge<sub>0.1</sub>** : composé ayant une variation d'entropie magnétique d'environ 14 J.kg<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup> pour une variation de champ de 2 T et pour une température de transition à 260 K .
- **LaFe<sub>x</sub>Si<sub>x</sub>Co** : ce composé permet d'atteindre une variation d'entropie magnétique d'environ 3 fois celle du Gd
- **MnFeP<sub>0.5</sub>As<sub>0.3</sub>Si<sub>0.2</sub>** : ce composé possède une variation d'entropie de 35 J.kg<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup> pour un champ de 2 T. La température de transition est T = 294 K.
- **MnAs<sub>0.9</sub>Sb<sub>0.1</sub>** : ΔSm de 30 J.kg<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup> pour un champ de 2 T, à T = 290 K.
- **MnAs** : à base d'arsenic, ce composé présente une variation d'entropie magnétique de 30 J.kg<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup> pour une variation de champ de 5 T. Sa température de transition est T = 317 K.

Matériau	T <sub>c</sub>	ΔS <sub>m</sub>
Gadolinium (Gd)	294 K	3 J.K <sup>-1</sup> .Kg <sup>-1</sup> .T <sup>-1</sup>
Gd <sub>5</sub> Si <sub>2</sub> Ge <sub>2</sub>	276 K	15 J.K <sup>-1</sup> .Kg <sup>-1</sup> .T <sup>-1</sup>
Mn <sub>1.0</sub> Fe <sub>1.0</sub> P <sub>0.6</sub> Si <sub>0.3</sub> Ge <sub>0.1</sub>	260 K	7 J.K <sup>-1</sup> .Kg <sup>-1</sup> .T <sup>-1</sup>
LaFe <sub>x</sub> Si <sub>x</sub> Co	Variable	9 J.K <sup>-1</sup> .Kg <sup>-1</sup> .T <sup>-1</sup>
MnFeP <sub>0.5</sub> As <sub>0.3</sub> Si <sub>0.2</sub>	294 K	17.5 J.K <sup>-1</sup> .Kg <sup>-1</sup> .T <sup>-1</sup>
MnAs <sub>0.9</sub> Sb <sub>0.1</sub>	290 K	15 J.K <sup>-1</sup> .Kg <sup>-1</sup> .T <sup>-1</sup>
MnAs	317 K	6 J.K <sup>-1</sup> .Kg <sup>-1</sup> .T <sup>-1</sup>

**Tableau I.1** : Tableau de synthèse des caractéristiques magnétocaloriques de certains matériaux

La présence d'arsenic dans ces trois derniers composés leur donne une toxicité non négligeable pour une utilisation à grande échelle.

Le lanthane-fer-silicium-cobalt est l'un des composés le plus prometteur. Il comporte une phase de transition à une température de Curie variable suivant la composition. Le silicium joue le rôle de stabilisant puisque le composé lanthane-fer n'est pas stable. De nombreux composés La<sub>x</sub>Fe<sub>y</sub>Si<sub>z</sub> sont à l'étude avec des caractéristiques spécifiques à chacun.



Suivant la concentration de fer et de silicium, la température de Curie peut varier entre 198 K et 260 K. Par exemple, le composé  $\text{LaFe}_{11,4}\text{Si}_{1,6}$  présente un  $\Delta S_{m \text{ pic}}$  d'environ  $19,4 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ , sous une variation de champ magnétique de 5 T, à  $T_C = 208 \text{ K}$ . Cette température peut être élevée en augmentant la concentration de silicium, mais ceci s'accompagne par une diminution de l'EMC à cause de la dilution des moments magnétiques portés par le fer.

Pour éviter cela, l'une des solutions est l'insertion d'atomes légers comme de l'hydrogène ou du carbone dans le réseau cristallin. Ceci permet d'augmenter la température  $T_C$  indépendamment du rapport Fe/Si et sans modifier la nature de la transition. En revanche, des hystérésis thermiques et magnétiques apparaissent dans l'EMC du matériau mais des travaux prometteurs visent à réduire cela pour permettre une utilisation industrielle.

Une autre solution est de substituer une partie du fer par un autre élément comme le cobalt qui permet de maintenir un EMC élevé.

Ainsi ces matériaux présentent l'avantage d'avoir une transition de phase paramétrable avec une variation d'entropie conséquente. De plus, on pallie l'inconvénient d'avoir une faible plage de température en assemblant un matériau avec des blocs possédant des températures de Curie différentes, par exemple en faisant varier la concentration de cobalt. Ainsi on obtient un EMC réparti sur le matériau avec différentes températures de Curie suivant la position sur le matériau, ce qui permet de travailler avec une gamme de température plus importante.

## I.6 Conclusion

Ce chapitre a présenté un aperçu de l'histoire, du principe et des matériaux de la réfrigération magnétique. Après avoir retracé les étapes clés de sa découverte et de son développement, nous avons expliqué le fonctionnement de cette technologie en nous basant sur l'effet magnéto-calorique et sa relation avec la température de Curie. Ensuite, nous avons abordé les matériaux magnéto-caloriques les plus prometteurs pour des applications à température ambiante. Le gadolinium, matériau de référence, présente des limitations économiques qui entravent son utilisation à grande échelle. La recherche sur de nouveaux matériaux, tels que les  $\text{LaFeSi}$ , reste un domaine d'investigation très actif.

Si la découverte de nouveaux matériaux semble nécessaire pour assurer la viabilité économique de la réfrigération magnétique, la conception des systèmes de réfrigération magnétique reste un point clef de leur performance. Nous verrons dans le prochain chapitre comment utiliser l'effet magnéto-calorique pour réaliser des systèmes de réfrigération et comment caractériser leur performance.

## CHAPITRE 11

---

---

### *Systemes de réfrigération magnétique*

---

---

## II.1 Introduction

L'effet magnétocalorique, introduit dans les chapitres précédents, est à la base des systèmes de réfrigération magnétique. Mais sa mise en œuvre au sein de machines frigorifiques est complexe car elle fait appel à plusieurs domaines de la physique fortement couplés (magnétisme, thermique, hydraulique, . . .). Le fonctionnement général des systèmes de réfrigération magnétique est similaire à celui des systèmes de réfrigération conventionnels mais les phases de compression et de détente de gaz sont remplacées par l'aimantation et la désaimantation d'un matériau magnétocalorique.

## II.2 Application de l'EMC à la production de froid

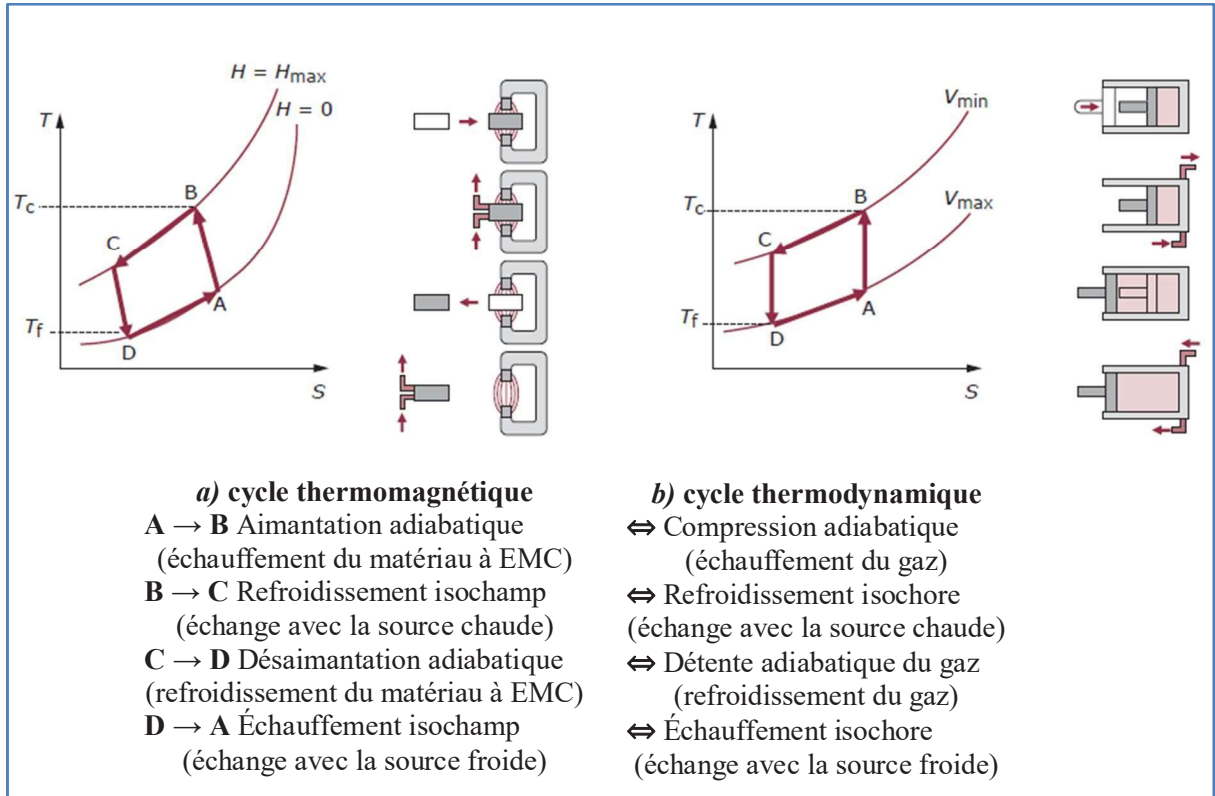
Nous avons vu qu'une aimantation adiabatique du matériau se traduit par une augmentation de sa température. Réciproquement, une désaimantation permet de le refroidir, et cela de façon réversible. On peut ainsi réaliser magnétiquement l'équivalent d'un cycle d'une machine thermique classique (figure II.1) [26]. L'aimantation du matériau est alors équivalente à la compression d'un gaz et sa désaimantation à la détente [29] [30] [31] [32].

Comparée aux autres techniques de production du froid, la réfrigération magnétique présente des avantages multiples :

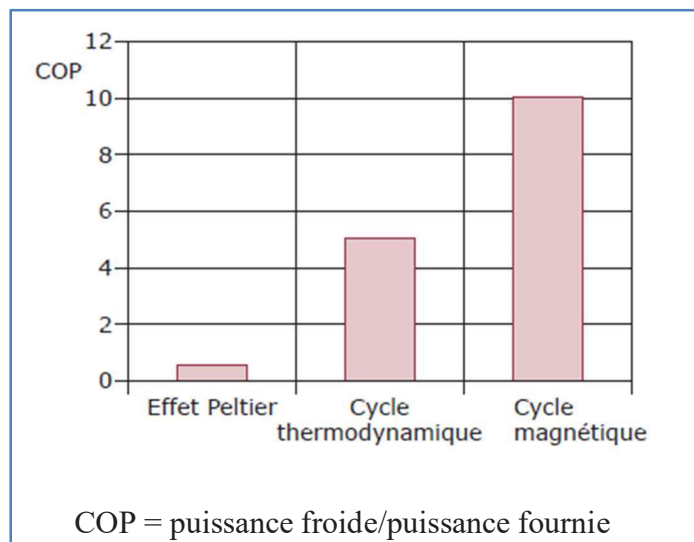
- une grande efficacité thermodynamique engendrée par la quasi-réversibilité de l'effet magnétocalorique. Avec l'EMC, les efficacités théoriques peuvent atteindre, voire dépasser, 60 % de l'efficacité limite de Carnot alors qu'elles ne dépassent pas 40 % dans les meilleurs systèmes thermodynamiques conventionnels. Cela entraîne un rendement énergétique nettement meilleur comme le montre la figure II.2 ;
- une absence de polluant atmosphérique comme le chlorofluorocarbure « CFC » ou ses substituts hydrochlorofluorocarbure « HCFC » et HFC. Les fluides utilisés dans les démonstrateurs sont l'eau ou le glycol ;
- une absence de bruits et de vibrations grâce à l'absence de compresseur ;
- une possibilité de réaliser des systèmes compacts avec de fortes densités d'énergie, le matériau étant solide et non gazeux.

Ces avantages offrent à la réfrigération magnétique un potentiel d'applications dans de nombreux domaines, de l'industrie aux technologies du quotidien, où elle peut concurrencer les systèmes de réfrigération thermodynamique classique ou encore de réfrigération thermoélectrique basée sur l'effet Peltier, par exemple : Réfrigération domestique ou

industrielle ; climatisation de bâtiment ; climatisation de véhicule ; refroidissement de systèmes portables : électronique, médical, etc. ; et liquéfaction de gaz.



*Figure II.1 : Analogie entre les cycles thermomagnétique et thermodynamique*



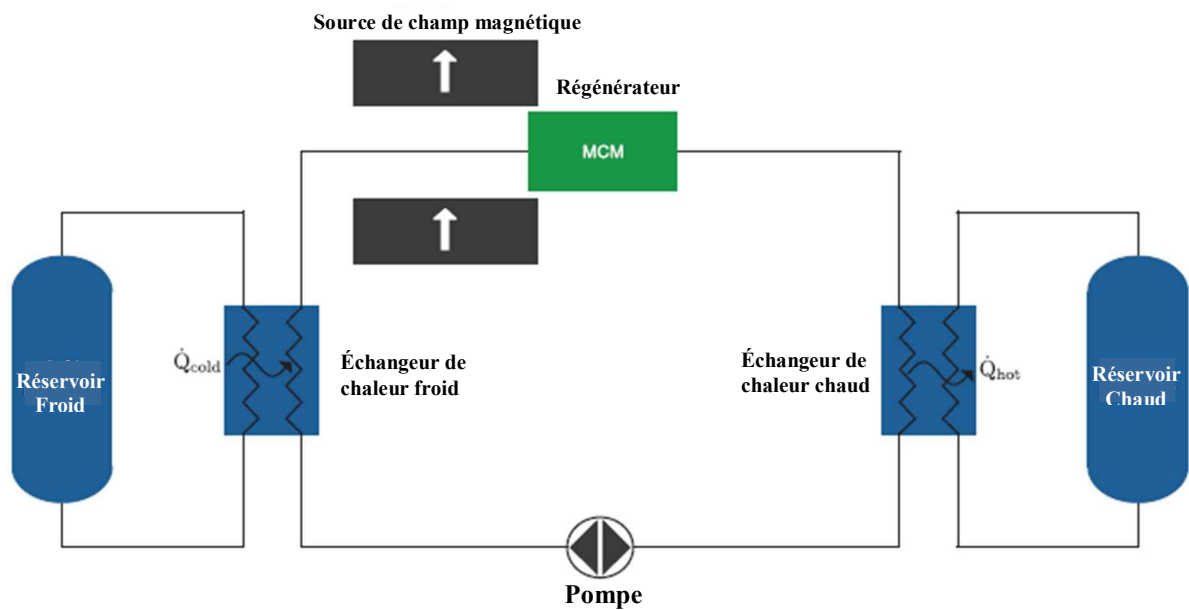
*Figure II.2 : Comparaison des coefficients de performance des différentes techniques de production de froid*

## II.3 Composition et fonctionnement

### II.3.1 Composition

Les systèmes de réfrigération magnétique sont composés de différents éléments représentés sur la Figure II.3. Le cœur des systèmes de réfrigération magnétique est constitué par un bloc de matériau magnéto-calorique. Soumis à un champ variable, le matériau va successivement s'échauffer et se refroidir [1]. Le champ magnétique variable peut être créé par un électro-aimant alimenté par un courant variable, par une bobine supraconductrice, ou encore par le déplacement d'une structure d'aimants permanents.

La chaleur ainsi dégagée (respectivement absorbée) est transportée grâce à un fluide caloporteur vers un échangeur thermique et cédée à la source chaude (respectivement prélevée à la source froide). Enfin, une pompe (ou des pistons) est nécessaire pour déplacer le fluide caloporteur.



*Figure II.3 : Composition d'un système de réfrigération magnétique.*

## **II.3.2 Fonctionnement**

### **II.3.2.1 Différentes phases d'un cycle**

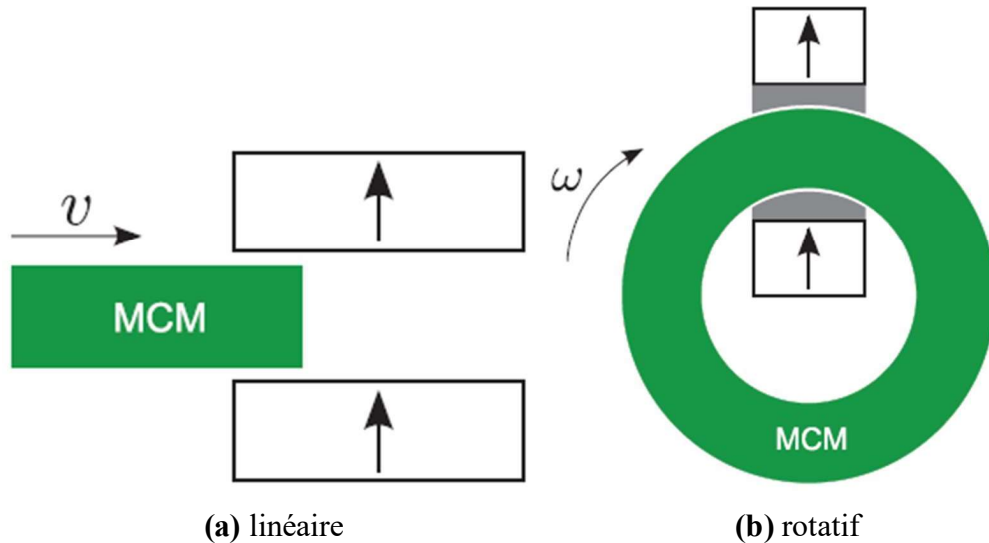
Les cycles de réfrigération magnétique sont composés de quatre phases qui peuvent se chevaucher selon le cycle utilisé :

1. L'aimantation du matériau magnétocalorique qui entraîne une augmentation de sa température.
2. L'écoulement du fluide caloporteur qui extrait une partie de la chaleur du matériau magnétocalorique pour la céder à la source chaude.
3. La désaimantation du matériau magnétocalorique qui entraîne une diminution de sa température.
4. L'écoulement du fluide caloporteur prélève de la chaleur à la source froide pour la céder au matériau magnétocalorique.

Ces quatre phases sont équivalentes aux phases d'un cycle thermodynamique classique (compression d'un gaz, rejet de chaleur à la source chaude, détente du gaz, absorption de chaleur de la source froide). Ces quatre phases peuvent se superposer et être réalisées selon différents cycles thermodynamiques qui seront présentés dans la Section II.3.3.

### **II.3.2.2 Système linéaire/rotatif**

Les phases d'aimantation et désaimantation sont assurées par la génération d'un champ variable dans le matériau magnétocalorique. Pour des applications à température ambiante, la génération de ce champ est réalisée par le déplacement relatif d'une structure à aimants par rapport au matériau magnétocalorique. Il est possible de réaliser deux types de mouvement, un mouvement linéaire (alternatif) ou un mouvement de rotation, illustrés sur la Figure II.4 [33]. S'il existe des systèmes de réfrigération magnétique des deux types, les systèmes rotatifs sont préférables pour plusieurs raisons. Premièrement ces systèmes ont généralement un encombrement plus réduit par rapport aux systèmes linéaires. Deuxièmement, les structures rotatives canalisent souvent mieux le flux magnétique que les structures linéaires. Enfin, avec des structures rotatives, il est envisageable de réaliser un mouvement à vitesse constante, ce qui est favorable à la réduction des dissipations de l'énergie.



**Figure II.4 :** Les deux grandes familles de systèmes de réfrigération magnétique.

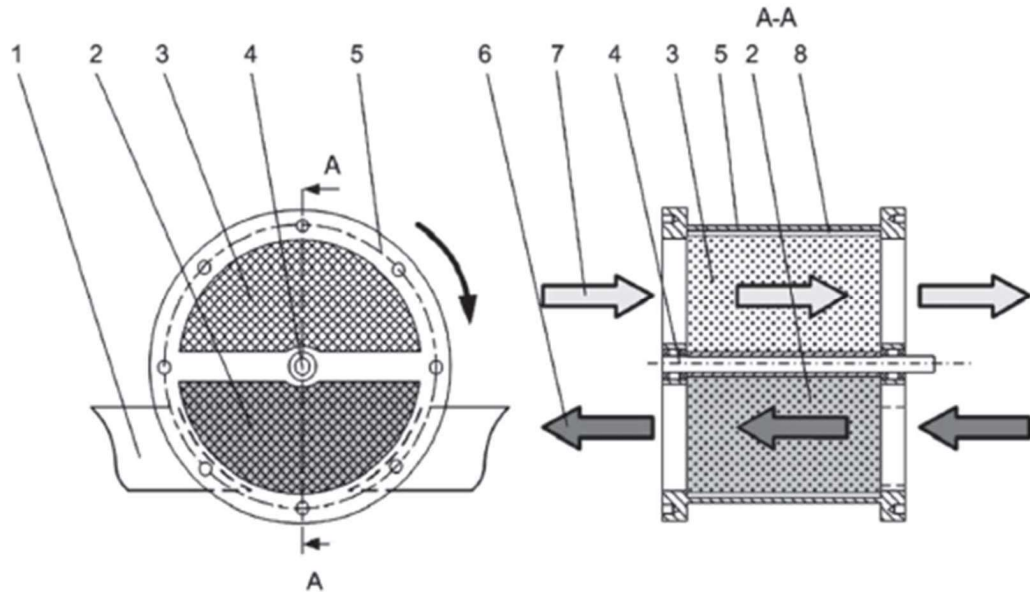
### II.3.2.3 Déplacement du régénérateur/de la structure d'aimants

La génération du champ variable peut se faire par le déplacement du régénérateur ou de la structure d'aimants. D'un point de vue énergétique, il semble plus favorable de déplacer les régénérateurs, dont la masse est en général plus faible que celle des structures d'aimants. Mais en pratique il est souvent préférable de déplacer la structure d'aimants et de garder le régénérateur fixe, pour éviter les problèmes d'étanchéité du circuit hydraulique raccordé au régénérateur. De plus, les régénérateurs mobiles entraînent une partie du liquide chaud dans le circuit hydraulique froid (et *vice versa*) ce qui diminue l'efficacité du régénérateur.

### II.3.2.4 Transferts thermiques

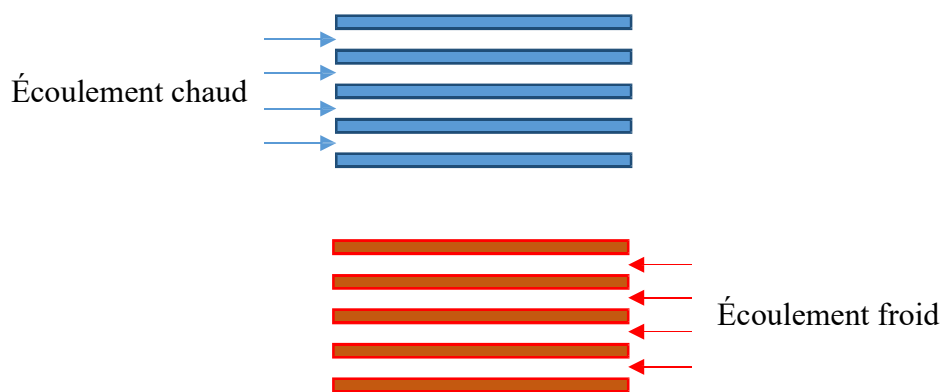
Comme expliqué précédemment, il est nécessaire de faire circuler un fluide caloporteur au contact du MCM pour extraire la chaleur dégagée et apporter la chaleur à absorber. Il existe différents moyens d'assurer les transferts thermiques du régénérateur vers les sources chaudes et froides [34].

- La première méthode repose sur l'utilisation de deux circuits hydrauliques distincts, l'un relié à la source chaude et l'autre à la source froide et de déplacer le régénérateur d'un circuit à l'autre (voire Figure II.5). Cependant, cette méthode nécessite l'utilisation de joints mobiles pour garantir l'étanchéité du système, qui sont extrêmement complexes à réaliser. Elle présente aussi l'inconvénient majeur d'avoir des pertes thermiques dues au fluide chaud "emprisonné" dans le régénérateur et déplacé dans le circuit hydraulique froid et *vice versa*.



**Figure II.5 :** Double circuit hydraulique utilisé par Sarlah et al. : (1) aimant ; (2) rotor magnéto-calorique (partie chaude) ; (3) rotor magnéto-calorique (partie froide) ; (4) axe de rotation ; (5) fourreau + flasque ; (6) fluide chaud ; (7) fluide froid ; (8) espace entre le fourreau et le rotor [35].

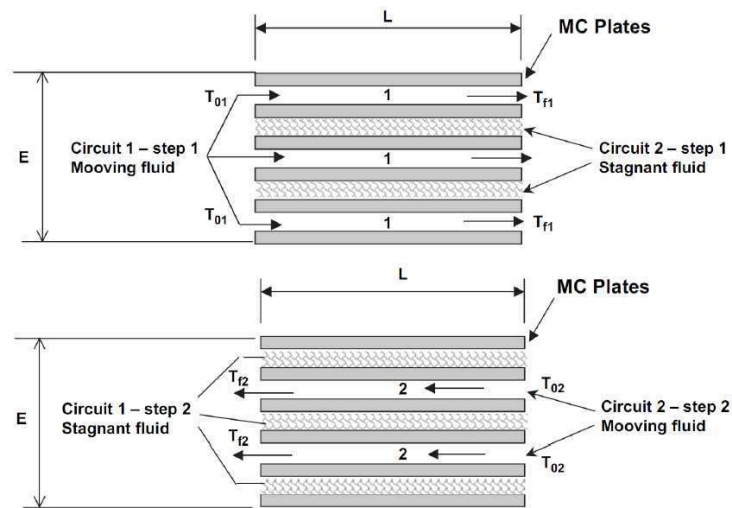
- La seconde méthode consiste à faire circuler un fluide oscillant dans un unique circuit hydraulique reliant la source chaude et la source froide au régénérateur (voir Figure II.6). Le principal inconvénient d'un tel système est sa limitation en fréquence puisque chaque particule de fluide doit transiter de la source froide jusqu'à la source chaude, en passant par le régénérateur puis revenir à sa position de départ au cours de chaque cycle.



**Figure II.6 :** Système à fluide oscillant.



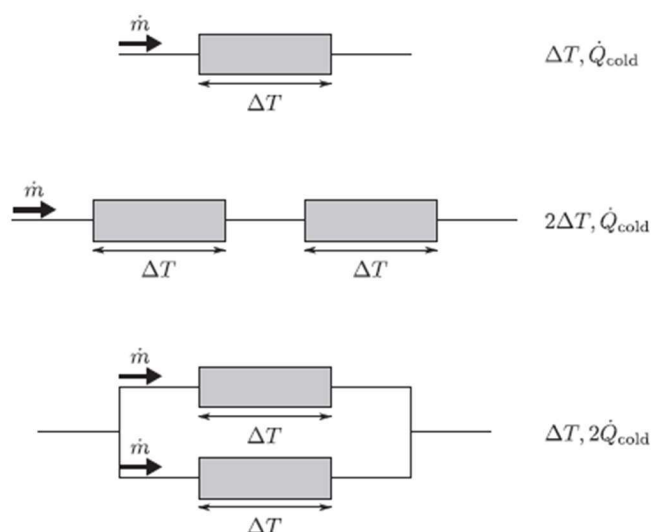
– Une troisième méthode a été proposée par Cooltech Applications [36]. Elle repose sur l'utilisation de deux circuits hydrauliques distincts mais sans joint mobile. Dans l'exemple de la Figure II.7, pendant une demi-période, le fluide circule uniquement de gauche à droite dans le circuit 1 et reste au repos dans le circuit 2. Et dans la demi-période suivante, le fluide reste au repos dans le circuit 1 et circule de droite à gauche dans le circuit 2. Il semblerait que cette méthode conduise à des performances moindres que celles des deux méthodes précédentes.



**Figure II.7 :** Double circuit hydraulique utilisé par Cooltech Applications [36].

### II.3.2.4 Association série/parallèle

Les régénérateurs actifs peuvent être associés en série si l'on souhaite augmenter l'écart de température, ou en parallèle si l'on souhaite augmenter la puissance froide, comme illustré sur la Figure II.8.



**Figure II.8 :** Illustration des différentes possibilités d'association des régénérateurs.

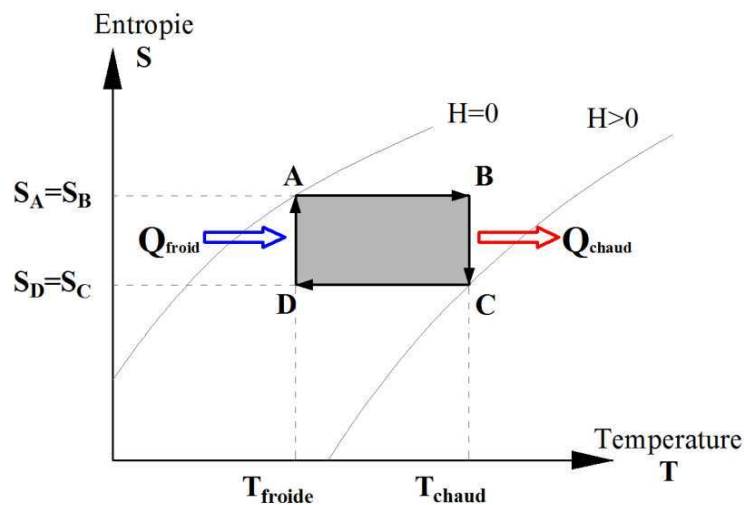
### II.3.3 Cycles de réfrigération magnétique

Afin de produire des écarts de température plus élevés le système doit fonctionner selon un cycle magnétique de réfrigération. Il existe plusieurs cycles magnétiques de réfrigération, avec leurs équivalents dans la thermodynamique conventionnelle. Les cycles les plus courants sont présentés ensuite: le cycle de Carnot, le cycle magnétique d'Ericsson, le cycle magnétique de Brayton et le cycle magnétique d'AMRR [37].

#### II.3.3.1 Cycle magnétique de Carnot

Le cycle de Carnot est composé de processus isentropiques et isothermes. La description de ce cycle sert uniquement à définir l'efficacité d'autres cycles. Considéré comme cycle idéal, il permet d'obtenir la meilleure efficacité possible, mais la mise en œuvre de ce cycle est complexe et difficile parce qu'elle nécessite l'utilisation de quatre amplitudes différentes de champ magnétique. Il est composé de quatre étapes :

- **Aimantation adiabatique** (A→B). Le matériau magnéto-calorique est aimanté et sa température augmente ;
- **Aimantation isotherme** (B→C). Le champ magnétique appliqué est augmenté. La température est maintenue constante en rejetant de la chaleur à la source chaude ;
- **Désaimantation adiabatique** (C→D). Le champ appliqué au matériau diminue et la température du matériau magnéto-calorique diminue aussi ;
- **Désaimantation isotherme** (D→A). Le matériau est désaimanté. La température est maintenue constante par une absorption de chaleur par le matériau de la source froide.



*Figure II.9: La représentation du cycle magnétique de Carnot*

Le coefficient de performance (COP) pour le cycle Carnot est défini comme le ratio de l'énergie prélevée à la source froide sur le travail fourni au système pour le cycle :

$$COP = \frac{Q_{froide}}{W} = \frac{T_{froide} \cdot (S_A - S_D)}{T_{chaude} \cdot (S_B - S_C) - T_{froide} \cdot (S_A - S_D)} \quad (II.1)$$

La différence d'entropie entre A et D est identique avec la différence d'entropie entre B et C, alors la relation du COP devient :

$$COP = \frac{T_{froide}}{T_{chaud} - T_{froide}} \quad (II.2)$$

Cette valeur de COP constitue la limite théorique du système de réfrigération qu'il sera impossible de dépasser. Le cycle de Carnot est inadapté aux systèmes industriels de la réfrigération magnétique parce que l'écart de température entre les échangeurs ne peut pas dépasser la différence adiabatique de température du matériau magnétocalorique, obtenu par la variation de champ magnétique. Pour obtenir des écarts de température utilisables dans l'industrie il faut utiliser des valeurs de champ magnétique très élevées produites par des aimants supraconducteurs, qui ne sont pas pratiques pour la plupart des applications industrielles.

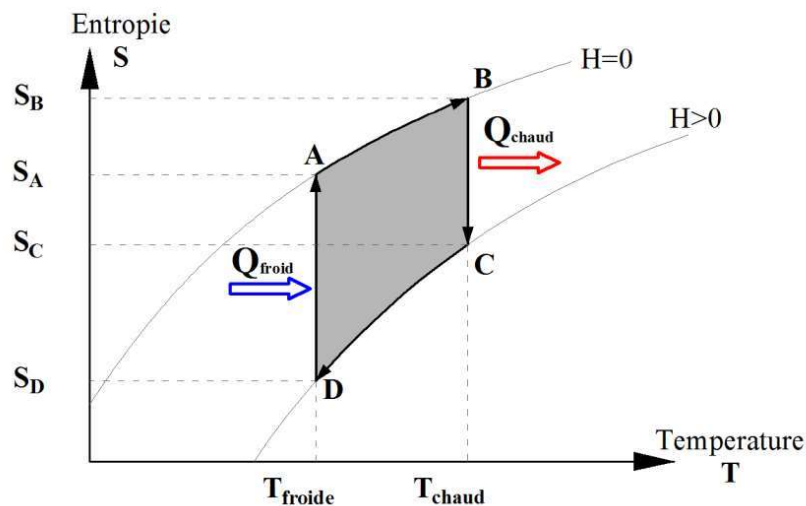
### II.3.3.2 Cycle magnétique d'Ericsson

Dans la pratique il est intéressant d'avoir un écart de température entre les sources qui est indépendant de la différence adiabatique de température.

Le cycle d'Ericsson est constitué de deux magnétisations isothermes, un refroidissement isochamp et un réchauffement isochamp. Ce cycle permet d'avoir cet écart de température entre les sources de chaleur qui est indépendant de la différence adiabatique de température. Il utilise la régénération thermique du fluide en contact avec le matériau magnétocalorique en respectant la condition isotherme lors de la variation du champ magnétique. Le découplage de l'écart de température avec  $\Delta T_{ad}$  est réalisé par réchauffage ou refroidissement du matériau lors de la circulation du fluide à champ constant.

Il est composé de quatre étapes :

- **Réchauffement isochamp** (A→B). Le matériau se réchauffe isochamp en prenant de la chaleur du fluide caloporteur ;
- **Aimantation isotherme** (B→C). Le matériau est aimanté et cède de la chaleur à la source chaude, en restant avec la même température ;
- **Refroidissement isochamp** (C→D). Le matériau se refroidit isochamp en rejetant de la chaleur au fluide caloporteur ;
- **Désaimantation isotherme** (D→A). Le matériau est désaimanté et absorbe de la chaleur en provenance de la source froide.



**Figure II.10:** La représentation du cycle magnétique d'Ericsson

Le coefficient de performance peut être donné par la relation suivante :

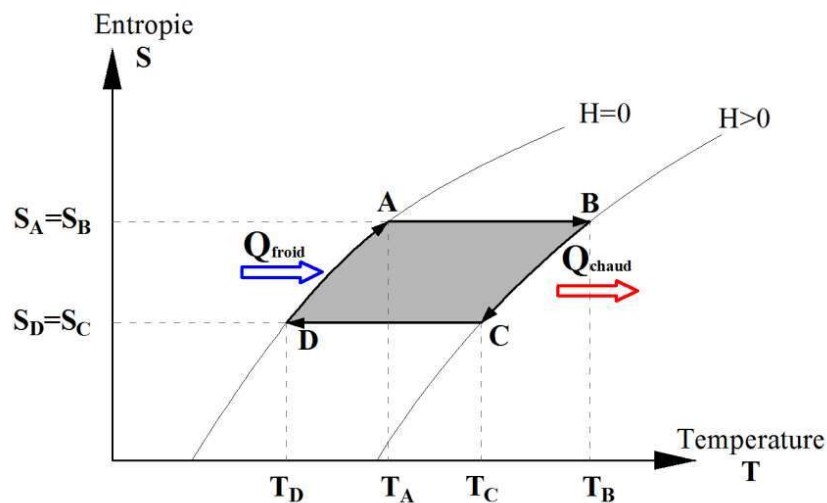
$$COP = \frac{Q_{froid}}{W} = \frac{T_{froid} \cdot (S_A - S_D)}{T_{chaud} \cdot (S_B - S_C) - T_{froid} \cdot (S_A - S_D)} \quad (II.3)$$

### II.3.3.3 Cycle magnétique de Brayton

Initialement conçu pour les turbines à gaz, le cycle de Brayton, ou le cycle de Joule, est le cycle idéal pour les systèmes destinés à récupérer un travail. Ce cycle se compose d'une aimantation et d'une désaimantation isentropiques avec un refroidissement et un réchauffage isochamps. Il présente la particularité que les travaux d'aimantation et de désaimantation sont faits de façon isentropique, pour le cycle idéal.

Il est composé de quatre étapes :

- **Aimantation adiabatique** (A→B). Le matériau est aimanté et sa température augmente.
- **Refroidissement isochamp** (B→C). Le matériau se refroidit isochamp en rejetant de la chaleur au fluide caloporteur.
- **Désaimantation adiabatique** (C→D). Le champ appliqué au matériau diminue et la température du matériau magnétocalorique diminue aussi.
- **Réchauffement isochamp** (D→A). Le matériau se réchauffe isochamp en prenant de la chaleur du fluide caloporteur.



*Figure II.11: La représentation du cycle magnétique de Brayton*

Le COP conserve sa forme générale:

$$COP = \frac{Q_{froide}}{W} \quad (II.4)$$

#### II.3.3.4 Cycle magnétique d'AMRR (Réfrigération par régénération magnétique active)

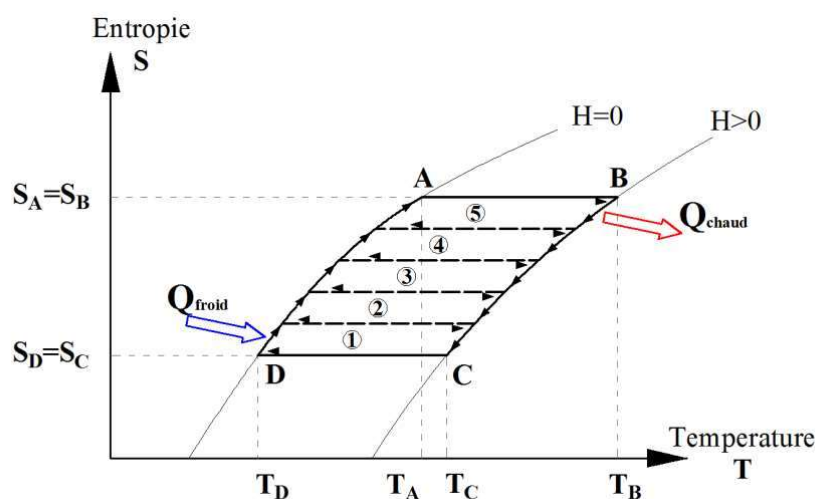
Le cycle d'AMRR est le cycle magnéto-thermodynamique le plus efficace pour un réfrigérateur magnétique opérant à température ambiante [38]. Ce cycle est basé sur le cycle de Brayton. Il se compose d'une aimantation et d'une désaimantation isentropiques et d'un refroidissement et un réchauffement isochamps. Ce cycle est basé sur le fait que l'AMR se résume à une multitude de petites machines thermodynamiques en série opérant chacune à un

niveau de température différent. Comme ça, chaque tranche de matériau magnéto-calorique est réchauffée par le fluide provenant des tranches adjacentes à un niveau de température supérieur. Ainsi, la circulation du fluide caloporteur, de façon synchrone avec la variation du champ magnétique, va créer un gradient thermique dans l'AMR.

Ce cycle est composé de quatre étapes principales :

- **Aimantation adiabatique** (A→B). Le matériau est aimanté et sa température augmente
- **Refroidissement isochamp** (B→C). Chaque tranche de matériau se refroidit isochamp en rejetant de la chaleur au fluide caloporteur. le fluide entre à une température égale  $T_C$  (celle de la source froide), en échangeant de la chaleur avec le matériau, la température de fluide augmente et devient égale à  $T_{f,H}$ , à la sortie (source chaude). Ainsi, en passant à travers l'échangeur de chaleur à la source chaude, le fluide rejette la quantité de chaleur  $Q_H$
- **Désaimantation adiabatique** (C→D). Le champ appliqué au matériau diminue et la température du matériau magnéto-calorique diminue aussi.
- **Réchauffement isochamp** (D→A). Chaque tranche de matériau se réchauffe isochamp par le fluide provenant des tranches adjacentes à un niveau de température supérieur. à l'entrée la température de fluide est égale à  $T_H$  (celle de la source chaude), en échangeant de la chaleur avec le matériau elle diminue à  $T_{f,C}$  à la sortie. En traversant l'échangeur de chaleur à la source froide, le fluide peut absorber la quantité de chaleur  $Q_C$

La figure (II.12) représente les schémas de principe d'un réfrigérateur magnétique actif :



**Figure II.12** : La représentation du cycle magnétique d'AMRR

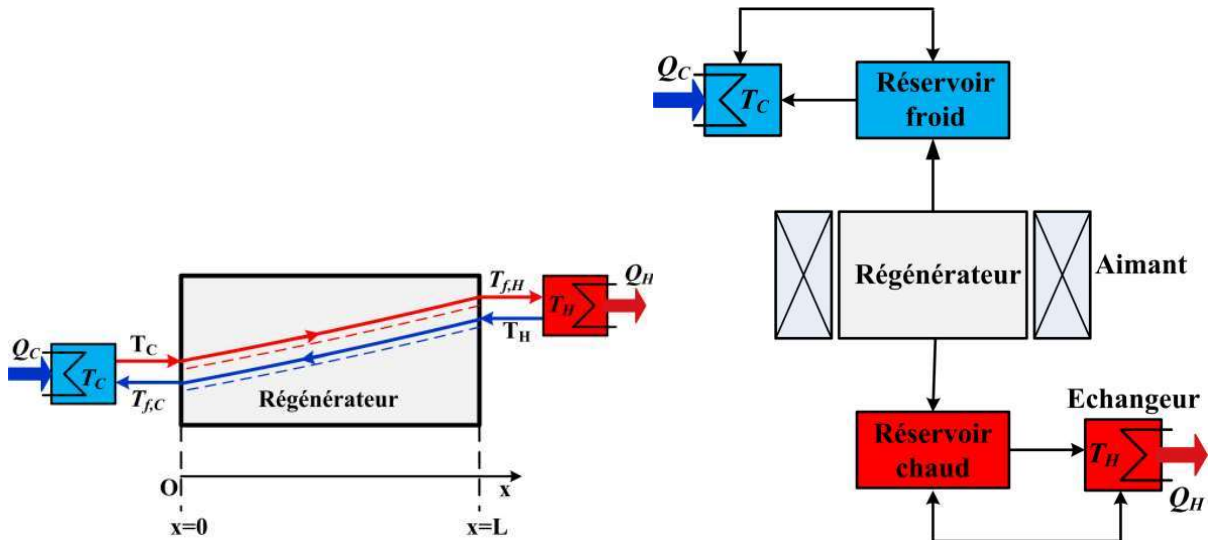
La quantité de chaleur absorbée à la source froide entre  $T_A$  et  $T_D$  est :

$$Q_{froide} = \int_D^A T \cdot ds \quad (III.5)$$

Le COP conserve sa forme générale:

$$COP = \frac{Q_{froide}}{W} \quad (III.6)$$

Le comportement d'un régénérateur qui fonctionne d'après un cycle d'AMRR est représenté dans la Figure II.13.



**Figure II.13 : Cycle de réfrigérateur AMR**

## II.4 Critères de choix

Le rendement et l'efficacité d'un système de réfrigération magnétique dépendent du matériau magnétocalorique, du fluide, de la source de champ et du cycle magnétothermique.

Les solutions envisagées doivent être guidées par les considérations suivantes [39] [40] [41]:

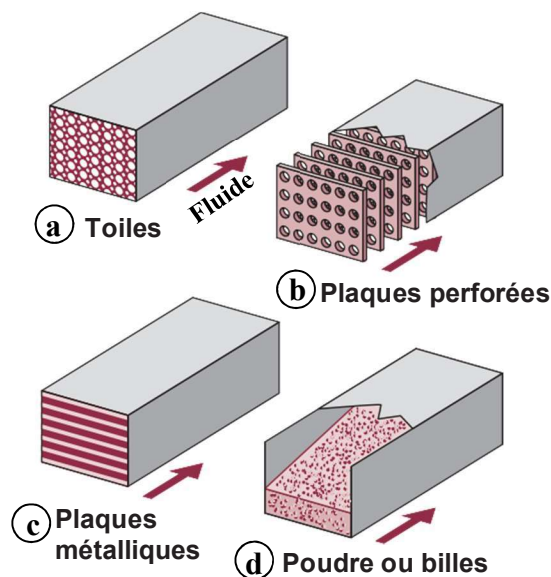
- forte variation d'entropie magnétique  $\Delta S_m(\mu_0 H, T)$  du matériau afin de disposer d'une forte puissance frigorifique ;
- fort effet magnétocalorique EMC (écart de température  $\Delta T_{ad}$ ) ;
- forte capacité thermique massique  $cp(\mu_0 H, T)$  pour réduire les oscillations en température lors des alternances des débits du fluide ;
- température de Curie  $T_C$  voisine de la température de la source froide ;
- conductivité thermique élevée dans le sens des échanges avec le fluide et faible dans les autres directions afin de limiter les pertes par diffusion dans le matériau ;
- faible porosité afin de limiter le volume mort ;

- faible rugosité du matériau et faible viscosité du fluide pour réduire les pertes de charge à l'écoulement ;
- fort coefficient d'échange thermique  $h$ .

Les quatre premiers critères sont propres au matériau et dépendent du champ magnétique. Les autres dépendent du matériau, de sa géométrie, de la nature du fluide et de la rhéologie de l'écoulement [23].

Ils sont incontournables pour optimiser les échanges thermiques. De nombreuses configurations du matériau sont possibles pour répondre à ces critères comme l'illustre la figure II.14 : plaques, poudres, billes, toiles ou grilles métalliques empilées, etc.

Le choix de la forme du régénérateur magnétique obéit au même critère que les échangeurs classiques, à savoir la compacité définie comme le rapport entre la surface d'échange et le volume total du régénérateur ( $m^2/m^3$ ). D'autres considérations peuvent également guider le choix du matériau ou du fluide, en particulier le coût, les propriétés physico-chimiques (oxydation), la toxicité, etc.



*Figure II.14 : Différentes configurations du régénérateur magnétique actif*

## II.5 Conclusion

Nous avons vu dans ce chapitre quels étaient les éléments constitutifs des systèmes de réfrigération magnétique, ainsi que les principes de fonctionnement et les choix possibles dans la conception d'un système. Les cycles de réfrigération magnétique sont équivalents aux cycles thermodynamiques classiques, à la différence près que les phases de compression



et détente des gaz sont remplacées par l'aimantation et la désaimantation de MCM. On retrouve les cycles de Brayton, d'Ericsson, et de Carnot magnétiques. Cependant pour atteindre les écarts de température requis pour des applications industrielles, il est nécessaire d'utiliser un cycle régénératif. Les chercheurs ont démontré que le cycle le plus performant est le cycle AMR pour lequel c'est le MCM qui joue le rôle de régénérateur.

Deux types de systèmes existent, les systèmes linéaires et les systèmes rotatifs et un grand nombre de prototypes des deux types ont été construits depuis le premier prototype réalisé par Brown en 1976. Ces dernières années, beaucoup de prototypes ont été conçus dans différents laboratoires. Leur plage de fonctionnement est définie par la puissance maximale et l'écart de température maximal.

Les performances d'un système de réfrigération magnétique dépendent du matériau magnétocalorique, du fluide, de la source de champ et du cycle magnétothermique. Les solutions envisagées doivent être guidées par quelques critères de choix caractéristiques de la performance.

## CHAPITRE III

---

---

*Modélisation de cycle de réfrigération magnétique active  
(AMR)*

---

---

## II.1 Introduction

Ce chapitre explore les formulations mathématiques et physiques qui décrivent les processus de transfert de chaleur dans les systèmes de réfrigération magnétique. Nous commencerons par établir les équations fondamentales de la convection et de la conduction thermique, puis nous développerons un modèle numérique appliqué à un système de régénération magnétique active. Ce modèle permettra de simuler le comportement thermique des régénérateurs en fonction des paramètres géométriques et physiques des matériaux et des fluides utilisés. Enfin, nous validerons notre modèle en le comparant à des données expérimentales obtenues à partir d'un prototype de réfrigération magnétique.

## III-2 Formulations

Dans le domaine de la réfrigération magnétique, la plupart des échanges thermiques s'effectuent par convection. Ce phénomène implique le transport de chaleur par le mouvement des fluides. En d'autres termes, la convection correspond à un transfert d'énergie thermique entre un fluide en mouvement et une surface solide à température différente, ou encore entre des parties distinctes d'un fluide en mouvement ayant des températures non uniformes [42]. La convection forcée, quant à elle, se caractérise par un mouvement du fluide induit par des forces extérieures, telles que des pompes ou des ventilateurs.

Dans un solide (indice  $s$ ) en contact, comme dans le fluide (indice  $f$ ), les flux peuvent donc s'écrire sur la paroi (indice  $p$ ) :

$$\lambda_s \left( \frac{\partial T}{\partial n} \right)_{ps} = \lambda_f \left( \frac{\partial T}{\partial n} \right)_f = \varphi_p \quad III.1$$

Où :  $n$  est la normale à la paroi et  $\lambda [W/(mK)]$  est la conductivité thermique.

Tandis que la continuité des températures peut s'exprimer par :

$$(T_s)_{pM} = (T_f)_{pM} \quad III.2$$

Où :  $(T_s)_{pM}$  est la température du solide en un point  $M$  de la paroi et  $(T_f)_{pM}$  représente la température du fluide en ce même point.

Par analogie avec la loi de Fourier sur la conduction de la chaleur, Newton a établi une relation linéaire entre la densité de flux de chaleur  $\varphi$  et la différence de température  $\Delta T = T_p - T_f$  entre la paroi d'un corps solide à la température  $T_p$  et le fluide à la température  $T_f$  :

$$\varphi = h\Delta T = h(T_p - T_f) \quad III.3$$

Où :  $h[W/Km^2]$  représente le coefficient de transfert thermique par convection ou simplement le coefficient de convection.

Le premier principe de la thermodynamique nous permet de faire le bilan énergétique complet du système. En enlevant la partie mécanique de ce bilan, on obtient le bilan d'énergie interne, qui se traduit par l'équation de la chaleur décrivant la répartition de la température dans tout le domaine [43] :

$$\rho \cdot C_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \text{grad}T \right) = \beta T \left( \frac{\partial p}{\partial T} + \mathbf{V} \cdot \text{grad}T \right) + P + \Phi + \lambda \cdot \text{div}(\text{grad}T) \quad III.4$$

Avec:

$\rho[kg/m^3]$ : La masse volumique.

$C_p[J/(kgK)]$  : La chaleur spécifique.

$V[m/s]$  : La vitesse du fluide.

$p [Pa]$  : La pression.

$\beta[1/K]$  : Le coefficient de dilatation.

$\Phi[W]$  : La fonction de dissipation.

$P[W]$  : la puissance thermique locale produite ou absorbée.

Pour les fluides isochores et peu visqueux [43], l'équation de l'énergie se réduit à :

$$\rho \cdot C_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \text{grad}T \right) = P + \lambda \cdot \text{div}(\text{grad}T) \quad III.5$$

Si on définit  $a = \frac{\lambda}{\rho C_p}$  la diffusivité thermique du fluide, on peut écrire :

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \text{grad}T = \frac{P}{\rho C_p} + a \cdot \Delta T \quad III.6$$

L'équation (III.6) peut être donnée sous une forme différentielle :

$$\frac{\partial T}{\partial t} + V_x \frac{\partial T}{\partial x} + V_y \frac{\partial T}{\partial y} + V_z \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{P}{\rho C_p} + a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad III.7$$

### III.3 Application à l'AMRR

Dans cette section, nous explorons le cas simplifié d'un échange thermique entre une plaque de matériau magnétocalorique (lit en plaque superposé) et un film de fluide. Nous présentons les détails du modèle numérique utilisé pour simuler ce processus. Ce modèle, ainsi que sa solution, sont décrits en fonction de la géométrie et des propriétés du matériau et du fluide. Cette approche permet une grande flexibilité d'application de cet outil numérique.

La figure III.1 illustre le concept d'un système de réfrigération magnétique à régénération active, modélisé à l'aide d'une approximation monodimensionnelle (1D).

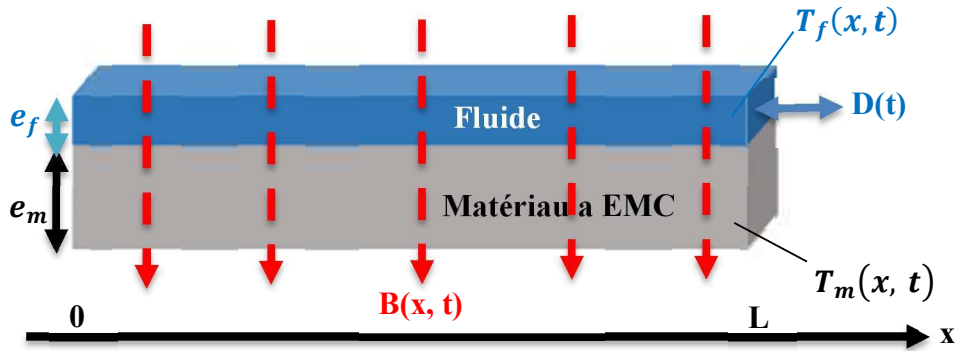


Figure III.1 : Schéma du modèle thermique AMRR avec les paramètres les plus importants

Quand le débit du fluide  $D(t)[m^3/s]$  est positif, l'écoulement est dans le sens de  $x$  (Figure III.1). Le fluide est supposé incompressible, donc la masse du fluide dans le lit régénérateur ne varie pas.

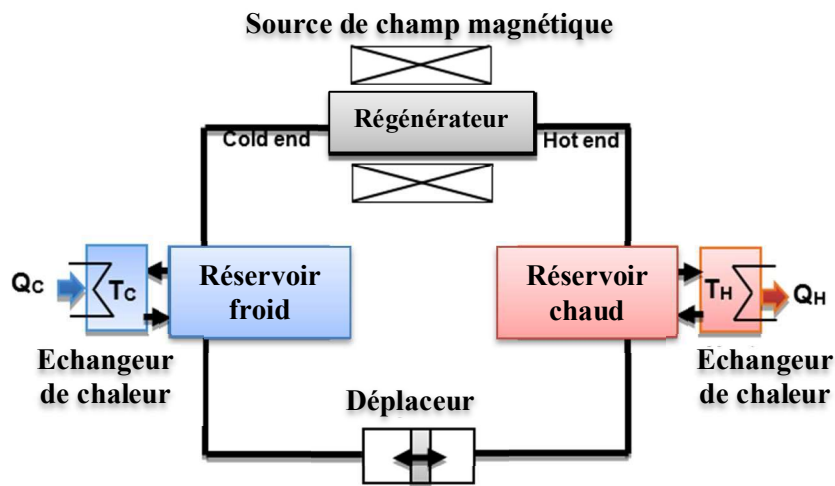


Figure III.2 : Représentation schématique du système de réfrigération magnétique étudié

### III.3.1 Mise en équation

#### III.3.1.1 Élément de référence du fluide

La figure III.3 illustre le bilan énergétique appliqué à un élément de référence du fluide circulant dans le lit régénérateur. Ce bilan se traduit par l'équation suivante :

$$D(t)C_f(T_f)T_f = \frac{\partial}{\partial t} (\rho_f C_f(T_f) S T_f) dx + D(t)C_f(T_f)T_f + \frac{\partial}{\partial x} (D(t)C_f(T_f)T_f) dx + \frac{Nu(Re, Pr)\lambda_f(T_f)S}{D_h} (T_f - T_m) dx \quad III.8$$

Avec :  $S[m^2]$  : la surface d'échange ;  $D_h[m]$  : Le diamètre hydraulique ;  $C_f [J/(kg.K)]$  : La chaleur spécifique de fluide ;  $\lambda_f [W/(m.K)]$  : Conductivité thermique de fluide ;  
 $\rho_f [kg/m^3]$  : Densité volumique de fluide ;  $Nu$  Le nombre de Nusselt,  $Re$  nombre de Reynolds et  $Pr$  nombre de Prandtl.

Pour tous les fluides, le produit de la température par la dérivée temporelle de la chaleur spécifique est négligeable par rapport à la chaleur spécifique elle-même [44]. Cela permet de simplifier l'équation (III.8) en la reformulant comme suit [42] :

$$m_f C_f (T_f) \left( \frac{\partial T_f}{\partial t} + d(t) \frac{\partial T_f}{\partial x} \right) = h S (T_m - T_f) \quad III.9$$

$$h = \frac{Nu(Re, Pr) \lambda_f (T_f)}{D_h} \quad III.10$$

Avec :  $d(t) [m/s]$ : la vitesse d'écoulement de fluide en  $[m/s]$  ;  $m_f [kg]$  : La masse du fluide.

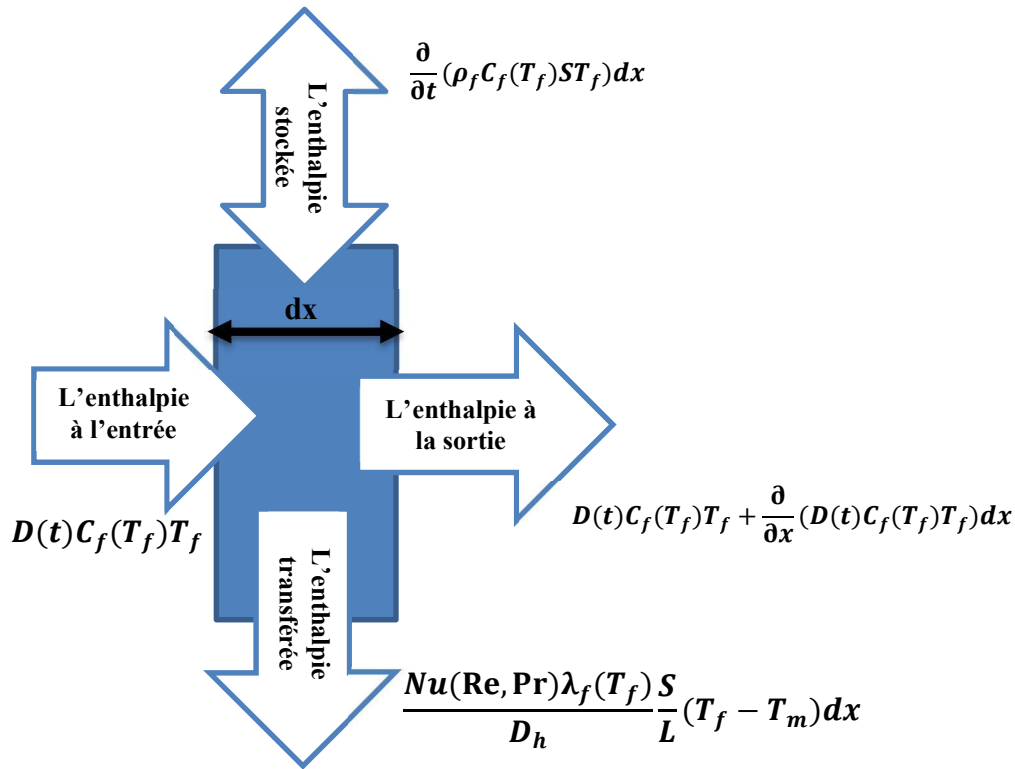


Figure III.3 : Elément de référence du fluide.

### III.3.1.2 Elément de référence du matériau magnétocalorique

L'analyse du bilan énergétique d'un élément de référence du matériau magnétocalorique « lit régénérateur » est illustrée à la figure III.4. Cette analyse permet d'établir l'équation suivante [42] :

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho_m C_m S T_m) dx + \lambda_{eff} S \frac{\partial T_m}{\partial x} + \lambda_{eff} S \frac{\partial^2 T_m}{\partial x^2} dx \\ = \lambda_{eff} S \frac{\partial T_m}{\partial x} + \frac{Nu(Re, Pr) \lambda_f(T_f) S}{D_h} \frac{1}{L} (T_f - T_m) dx \end{aligned} \quad III.11$$

Après quelques simplifications et en utilisant la relation (III. 10) on peut écrire l'équation (III. 11) sous la forme :

$$m_m C_m \frac{\partial T_m}{\partial t} + \lambda_{eff} \vartheta \frac{\partial^2 T_m}{\partial x^2} = h S (T_f - T_m) \quad III.12$$

Avec :  $\lambda_{eff}$  est la conductivité effective ;  $m_m$  [kg] : La masse du matériau magnéto-calorique.

$C_m$  : La chaleur spécifique du matériau magnéto-calorique ;  $\vartheta$  [m<sup>3</sup>] : Le volume du solide.

$\rho_m$  [kg/m<sup>3</sup>] : Densité volumique du solide.

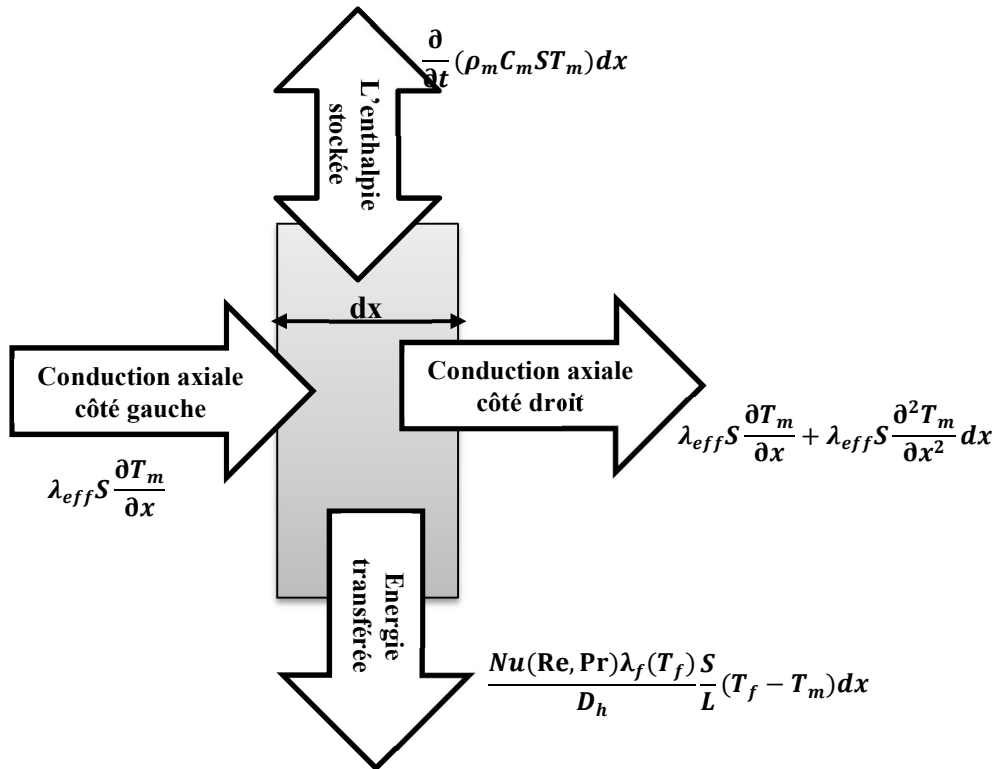


Figure III.4 : Elément de référence du matériau magnéto-calorique

### III.3.1.3 Système d'équations final

Les équations (III. 9) et (III. 12), en plus de l'équation de l'énergie échangée entre le fluide et le matériau, permettent d'écrire le système suivant :

$$\begin{cases} m_f C_f(T_f) \left( \frac{\partial T_f}{\partial t} + d(t) \frac{\partial T_f}{\partial x} \right) = hS(T_m - T_f) \\ m_m C_m \frac{\partial T_m}{\partial t} + \lambda_{eff} \vartheta \frac{\partial^2 T_m}{\partial x^2} = hS(T_f - T_m) \\ q = hS(T_m - T_f) \end{cases} \quad III.13$$

### III.3.2 Discrétisation numérique et résolution

Initialement, nous ferons l'hypothèse que la conduction thermique axiale au sein du matériau est négligeable. Cette simplification est justifiée dans diverses situations, telles qu'une faible conductivité thermique du matériau ou des plaques de très faible épaisseur. En conséquence, les équations thermiques régissant le système, décrites par les équations (III.13), peuvent être reformulées comme suit :

$$\begin{cases} m_f C_f(T_f) \left( \frac{\partial T_f}{\partial t} + d(t) \frac{\partial T_f}{\partial x} \right) = hS(T_m - T_f) \\ m_m C_m \frac{\partial T_m}{\partial t} = hS(T_f - T_m) \end{cases} \quad III.14$$

La résolution de ce système s'effectue par la méthode des différences finies. À cette fin, nous employons une grille d'éléments couvrant l'intervalle de 0 à L pour l'espace et de 0 à  $\tau$  pour le temps.

Les équations suivantes décrivent la position de chaque nœud, du fluide et du matériau :

$$\begin{cases} t_{f_i} = i \frac{\tau}{Nt} & i = 1 \dots Nt \\ x_{f_j} = j \frac{L}{Nx} & j = 1 \dots Nx \\ t_{m_i} = i \frac{\tau}{Nt} & i = 1 \dots Nt \\ x_{m_j} = j \frac{L}{Nx} & j = 1 \dots Nx \end{cases} \quad III.15$$

Dans le cadre de ce modèle, nous optons pour le calcul des dérivées temporelles à l'aide de différences à droite et des dérivées spatiales à l'aide de différences à gauche, ce qui aboutit à un schéma de discrétisation centré. Les développements correspondants s'expriment comme suit [42] :

$$\begin{cases} \frac{\partial T_f}{\partial t} = \frac{T_{f(i+1,j)} - T_{f(i,j)}}{\Delta t} \\ \frac{\partial T_f}{\partial x} = \frac{T_{f(i,j)} - T_{f(i,j-1)}}{\Delta x} \\ \frac{\partial T_m}{\partial t} = \frac{T_{m(i+1,j)} - T_{m(i,j)}}{\Delta t} \end{cases} \quad III.16$$



Le système (III.13) devient alors :

$$\begin{cases} m_f C_f (T_{f(i,j)}) \left( \frac{T_{f(i+1,j)} - T_{f(i,j)}}{\Delta t} + d(t) \frac{T_{f(i,j)} - T_{f(i,j-1)}}{\Delta x} \right) = hS(T_{m(i,j)} - T_{f(i,j)}) \\ m_m C_m \left( \frac{T_{m(i+1,j)} - T_{m(i,j)}}{\Delta t} \right) = hS(T_{f(i,j)} - T_{m(i,j)}) \end{cases} \quad III.17$$

Nous avons alors :

$$\begin{cases} T_{f(i+1,j)} = \left( 1 - \left( \frac{hS}{m_f C_f} \Delta t + d(t) \frac{\Delta t}{\Delta x} \right) \right) T_{f(i,j)} + d(t) \frac{\Delta t}{\Delta x} T_{f(i,j-1)} + \frac{hS}{m_f C_f} \Delta t T_{m(i,j)} \\ T_{m(i+1,j)} = \left( 1 - \frac{hS}{m_m C_m} \Delta t \right) T_{m(i,j)} + \frac{hS}{m_m C_m} \Delta t T_{f(i,j)} \end{cases} \quad III.18$$

Finalement, on peut écrire :

$$\begin{cases} T_{f(i+1,j)} = A_{f1} T_{f(i,j)} + A_{f2} T_{f(i,j-1)} + A_{f3} T_{m(i,j)} \\ T_{m(i+1,j)} = A_{m1} T_{m(i,j)} + A_{m2} T_{f(i,j)} \\ q_{(i+1,j)} = hS(T_{m(i+1,j)} - T_{f(i+1,j)}) \end{cases} \quad III.19$$

Avec :

$$\begin{cases} A_{f1} = \left( 1 - \left( d(t) \frac{\Delta t}{\Delta x} + \frac{hS}{m_f C_f} \Delta t \right) \right) \\ A_{f2} = \left( d(t) \frac{\Delta t}{\Delta x} \right) \\ A_{f3} = \left( \frac{h.S}{m_f C_f} \Delta t \right) \\ A_{m1} = \left( 1 - \frac{h.S}{m_m C_m} \Delta t \right) \\ A_{m2} = \left( \frac{h.S}{m_m \cdot C_m} \Delta t \right) \end{cases} \quad III.20$$

Le processus de calcul, englobant les quatre phases de la réfrigération magnétique active à régénération, est donné par l'algorithme de la figure III.5.

Le modèle numérique de l'AMRR, développé dans l'environnement MATLAB®, permet de simuler le comportement thermique du régénérateur. Il simule le profil de température à l'intérieur du régénérateur en fonction de divers paramètres tels que le cycle de fonctionnement, les propriétés du matériau et du fluide caloporteur. Le modèle permet également d'évaluer les puissances frigorifiques produites et les écarts de température atteints en régime permanent.

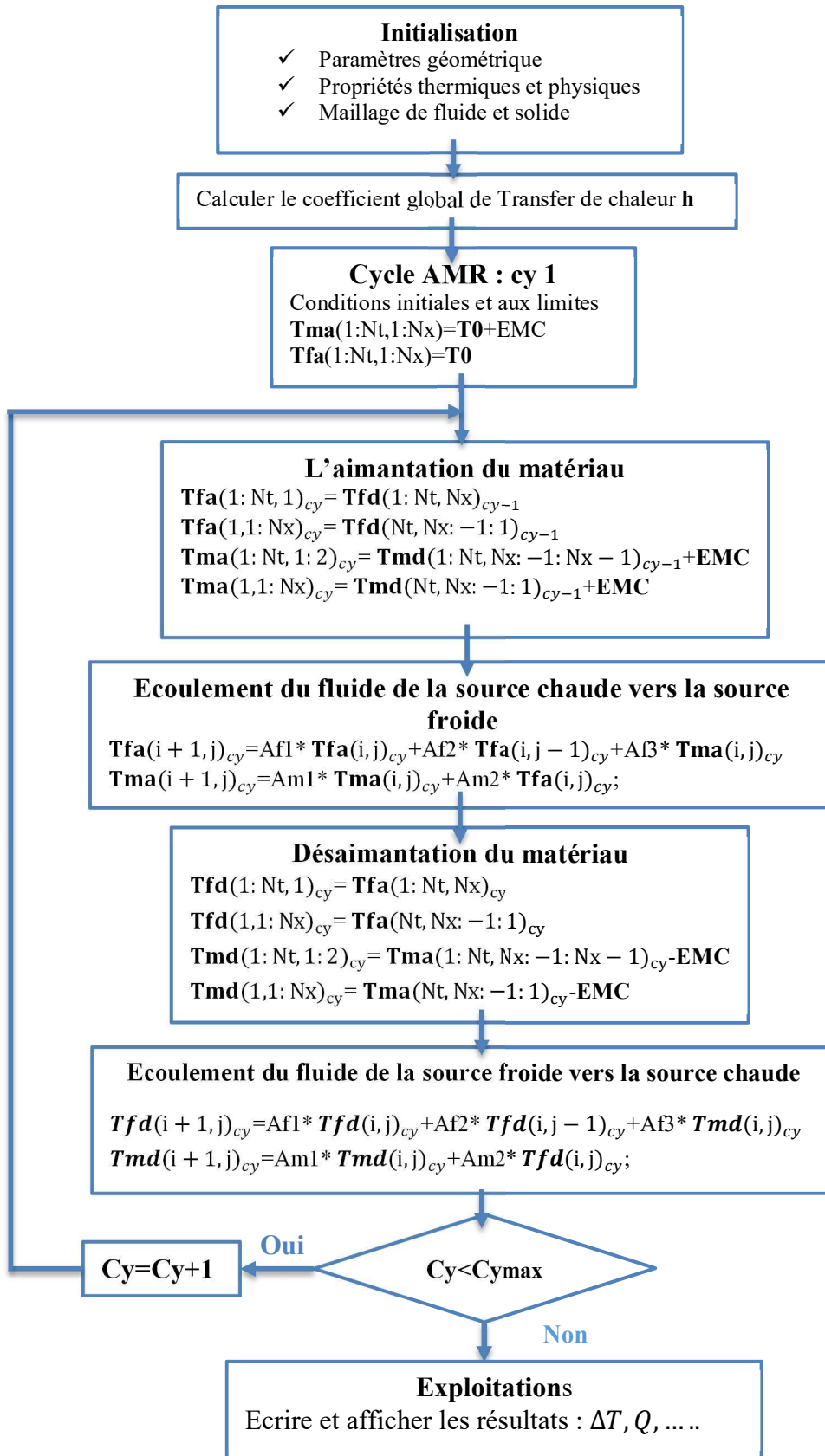


Figure III.5 : Algorithme de résolution numérique

### III.4 Résultats du modèle

Le modèle développé précédemment sera appliqué à un régénérateur en forme de plaques, tel que représenté par la figure III.6 (a). La figure III.6 (b) illustre la cellule équivalente à ce régénérateur, qui partage les mêmes paramètres que le régénérateur réel, à l'exception de la largeur, qui est égale à :

$$L_{eq} = N_p L_m \tag{III.21}$$

$L_{eq}$ : La largeur équivalente

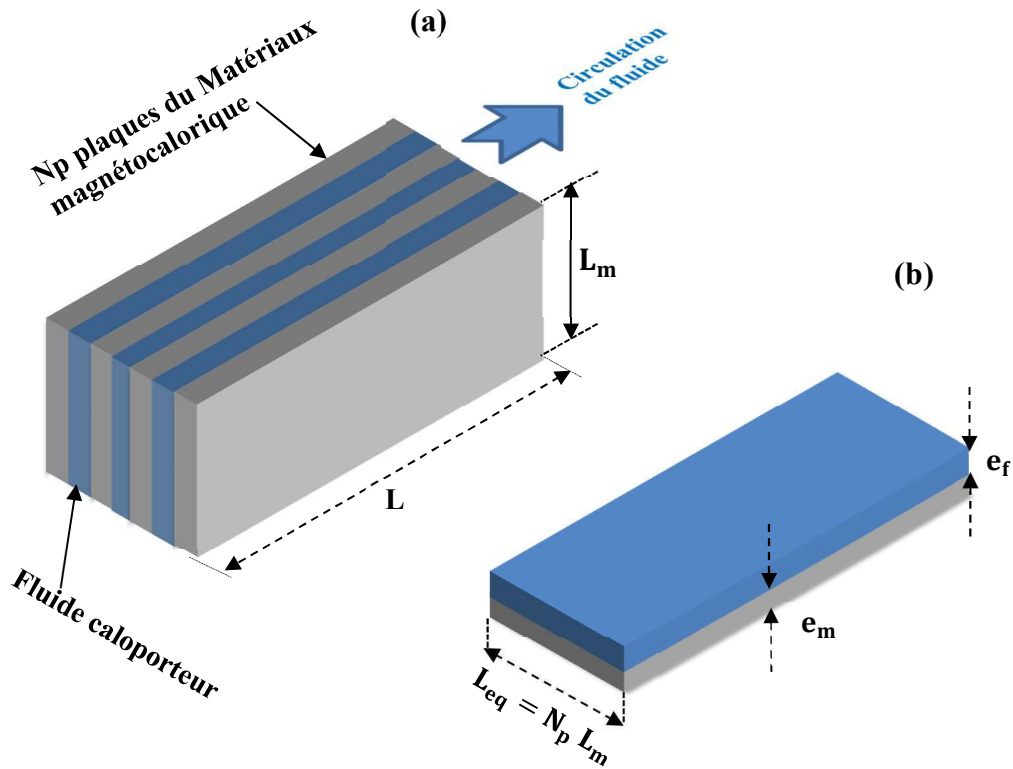


Figure III.6 : Régénérateur en plaques et Cellule équivalente (plaque + fluide).

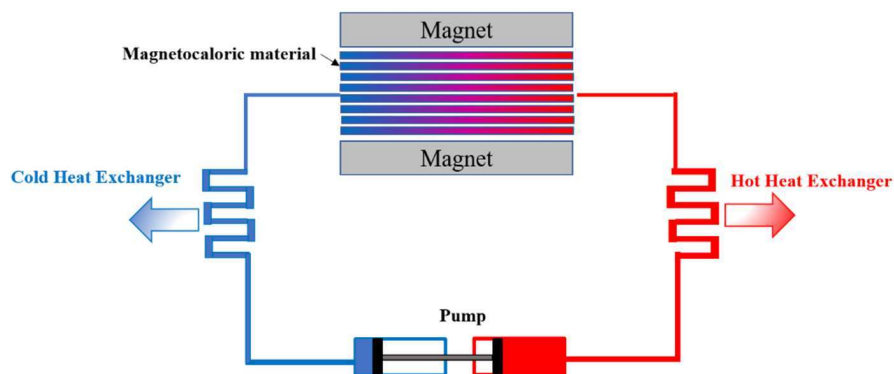
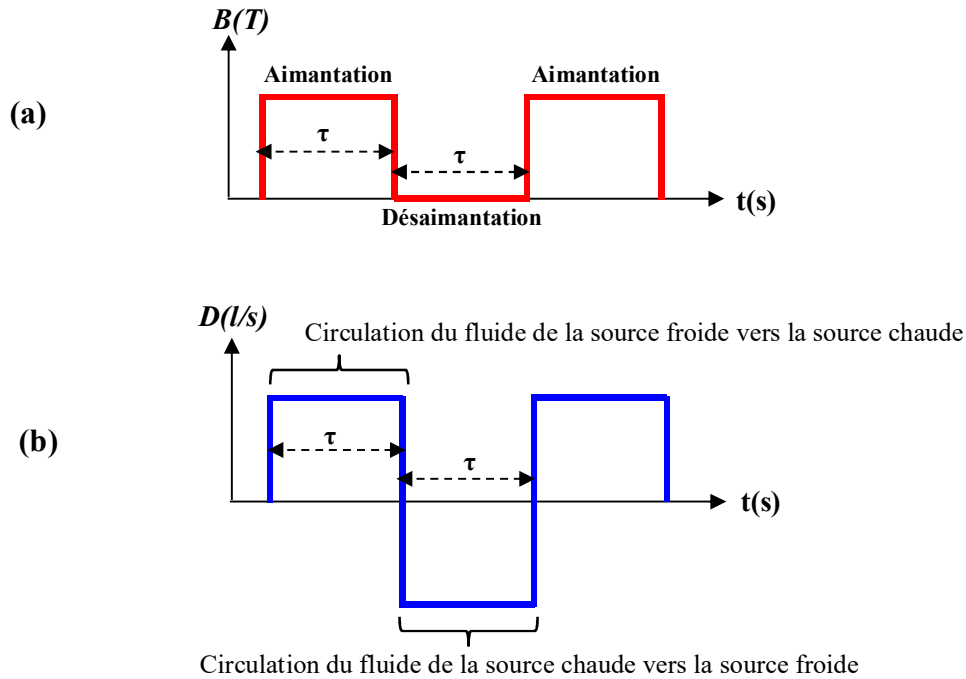


Figure III.7 : Schéma d'un réfrigérateur magnétique actif (AMR).

Le cycle magnétique, comprenant les phases d'aimantation et de désaimantation, est illustré par l'évolution temporelle du champ appliqué, comme montré dans la figure III.8 (a). Durant ces deux phases, le fluide traverse le matériau. La figure III.8 (b) illustre la variation du débit du fluide caloporteur employé dans ce genre de régénérateur.



**Figure III.8 :** Caractéristique du cycle magnétothermique

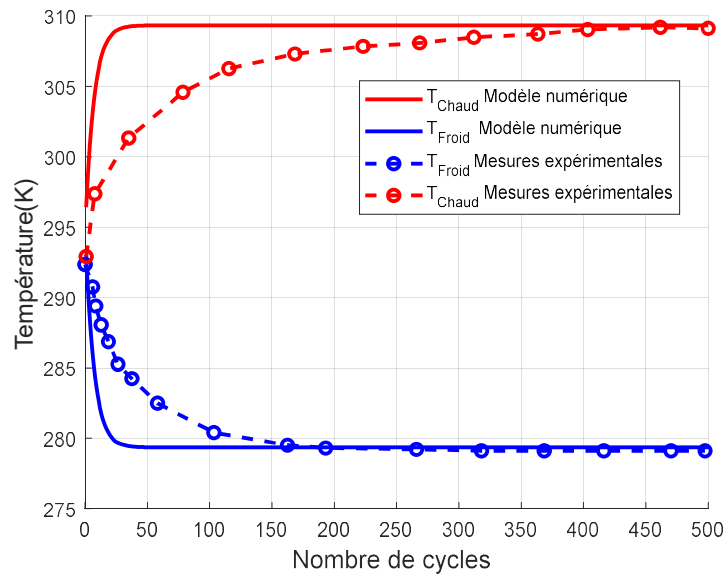
La fiabilité du modèle AMR proposé a été validée en utilisant des données expérimentales issues du prototype de refroidissement magnétique développé par Clean Cooling Systems SA (CCS) à la Haute École Spécialisée de Suisse occidentale [45]. Ce prototype est constitué de deux régénérateurs parallèles composés de plaques de gadolinium, chaque régénérateur étant divisé en deux parties séparées. Dans ce travail, nous nous concentrons principalement sur les performances de de notre système AMR lorsqu'il est utilisé les paramètres physiques est géométriques similaires à ceux décrits dans les références [46]. Les paramètres caractéristiques ainsi que les conditions de fonctionnement du régénérateur AMR à base gadolinium étudié sont détaillés dans le tableau III.1.



Paramètre	Symbole	Valeur	Unité
<b>Géométrie du régénérateur</b>			
Largeur d'une plaque	$L_m$	0.008	m
L'épaisseur d'une plaque	$e_m$	0.001	m
Longueur d'une plaque	$L$	0.1	m
L'épaisseur du fluide	$e_f$	0.0002	m
<b>Propriétés physiques</b>			
Nom du matériau	Gd : Gadolinium	-	-
Fluide caloporteur	H <sub>2</sub> O : Eau	-	-
Masse du matériau	$m_m$	0.8	kg
le débit massique du fluide	$\dot{m}_f$	0.02	Kg/s
la fréquence du cycle	$F$	0.5	Hz
Champ magnétique	$B$	1.5	Tesla
Viscosité dynamique du fluide	$\mu$	0.001	kg/(m.s)
La chaleur spécifique du fluide	$C_f$	4185	J/(kg.K)
La chaleur spécifique du matériau	$C_m$	240	J/(kg.K)
La densité volumique du fluide	$\rho_f$	1000	kg/m <sup>3</sup>
La densité volumique du matériau	$\rho_m$	7874	kg/m <sup>3</sup>
La conductivité thermique du fluide	$\lambda_f$	0.59	W/(m.K)
La conductivité thermique du matériau	$\lambda_m$	10.5	W/(m.K)
La température ambiante	$T_0$	293	K

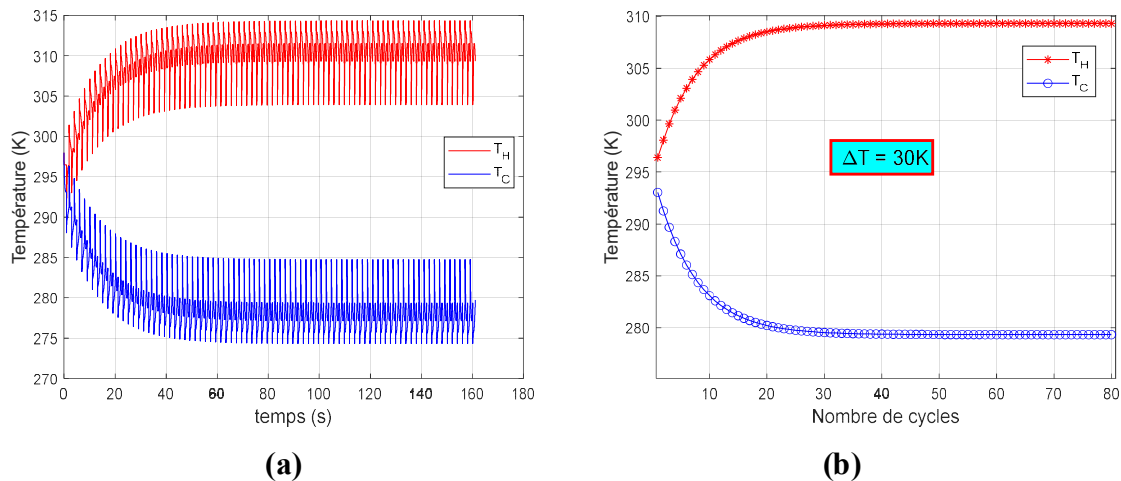
**Tableau III.1** : Paramètres utilisés dans le modèle numérique de l'AMR

La Figure III.9 présente une comparaison entre l'évolution de la température calculée et mesurée d'un régénérateur utilisant du gadolinium (Gd) comme réfrigérant. Les résultats de la simulation numérique (ligne continue) sont mis en regard des données expérimentales (ligne pointillée). Comme on peut l'observer, une excellente concordance est observée entre les deux ensembles de données, ce qui confirme la fiabilité du modèle AMR employé dans cette étude. Cette validation par des mesures expérimentales renforce la confiance dans la capacité du modèle à prédire le comportement thermique de cycle AMR à base de Gd.



**Figure III.9 :** Évolution du span de température : Comparaison entre les résultats expérimentaux et prédictions numériques, utilisant Gd comme réfrigérant magnétique.

La figure III.10 (a) montre l'évolution de la température aux deux extrémités (c'est-à-dire les extrémités chaude  $T_H$  et froide  $T_F$ ) du matériau Gd en fonction du temps. Comme on peut le voir, les deux courbes atteignent leur état stationnaire après un régime transitoire.



**Figure III.10 :** Evolution de la température aux deux extrémités du matériau Gd

La figure III.10 (b) illustre l'évolution de la température des deux extrémités du matériau à la fin de chaque cycle AMR. Cette représentation permet d'observer le comportement thermique du matériau en fonction du nombre de cycles. Le décalage observé entre les deux courbes de cette figure résulte de notre choix de programmation, où la phase d'aimantation est exécutée avant la phase de désaimantation. L'écart de température maximum



obtenu sous un champ magnétique de 1.5 T est d'environ 30 K après 50 cycles. Nous observons que cet écart de température final  $\Delta T$  (span de température) obtenu est environ 6 fois plus élevé que le  $\Delta T_{ad}$  initial (EMC).

La figure III.11 (a) offre une vue détaillée (zoom) d'un cycle AMR élémentaire, mettant en évidence les quatre étapes distinctes qui composent ce processus. Les changements simultanés de température en fonction du temps et des cycles sont révélés dans la figure III.11(b).

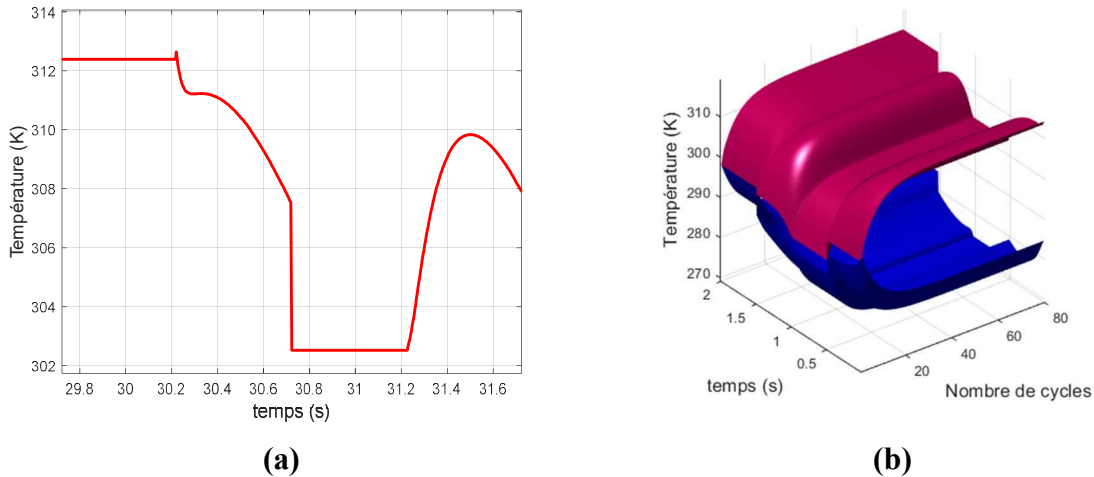


Figure III.11 : Variation temporelle et cyclique de la température aux deux extrémités du matériau.

La figure III.12 (a) donne la comparaison entre le profil de température suivant la longueur du matériau pour le premier et le dernier cycle. Une fois que le système a atteint son état stationnaire, nous traçons la distribution du gradient de température au sein de la plaque équivalente (figure III.12(b)). Cette représentation met en évidence la répartition spatiale de la température dans le matériau.

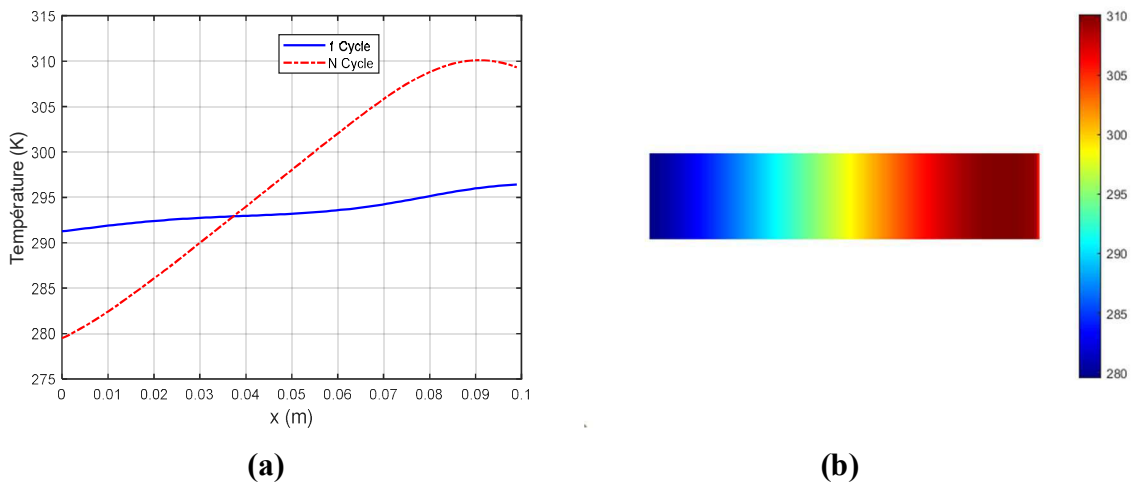


Figure III.12 : Répartition spatiale de la température dans le matériau.

L'échange thermique par convection entre le matériau magnétocalorique et le fluide se décompose en deux phases distinctes : l'énergie transférée durant l'aimantation et l'énergie transférée durant la désaimantation. Comme le montre la figure III.13(b), l'évolution de cette énergie échangée est caractérisée par une bascule entre deux niveaux distincts, correspondant à la transition entre les phases d'aimantation et de désaimantation.

La figure III.13 (a) illustre le profil énergétique du matériau. La courbe positive représente l'énergie thermique générée lors de la phase d'aimantation, tandis que la courbe négative montre l'énergie froide délivrée pendant la phase de désaimantation.

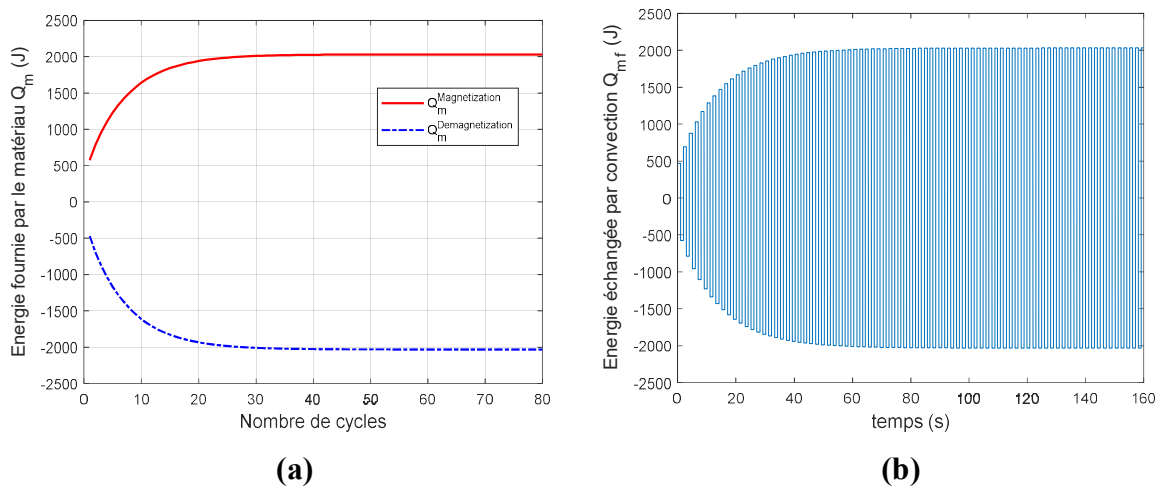


Figure III.13 : Energies données par le modèle AMRR

### III.5 Conclusion

Ce chapitre a exposé les formulations clés nécessaires pour modéliser les échanges thermiques dans les systèmes de réfrigération magnétique. En établissant les équations de base et en développant un modèle numérique précis, nous avons pu simuler et valider le comportement thermique des régénérateurs, en démontrant leur efficacité et fiabilité.

Dans le chapitre suivant, nous aborderons l'optimisation de ces systèmes afin d'améliorer leurs performances thermiques et énergétiques.



## CHAPITRE IV

---

---

*Optimisation des systèmes AMR par algorithmes génétiques*

---

---

## IV.1 INTRODUCTION

L'optimisation des systèmes de réfrigération magnétique active à régénération (AMR) représente une avancée cruciale pour maximiser l'efficacité et les performances de ces technologies émergentes. Bien que les formulations et les modèles numériques précédemment développés permettent de simuler et d'analyser le comportement thermique des régénérateurs, ils ne suffisent pas à garantir une performance optimale dans des conditions réelles. En effet, les systèmes AMR doivent répondre à des exigences diverses et souvent contradictoires, telles que la compacité, le coût, et la puissance de refroidissement.

L'optimisation permet d'aborder ces défis en ajustant de manière systématique et stratégique les différents paramètres du système pour atteindre un équilibre optimal entre ces objectifs. Contrairement à une optimisation à objectif unique (SOO) qui pourrait privilégier un seul aspect au détriment des autres, l'optimisation multi-objectifs (MOO) offre une solution plus holistique. Elle permet de trouver un compromis équilibré entre plusieurs critères de performance, garantissant ainsi que le système AMR est non seulement efficace, mais aussi viable d'un point de vue pratique et économique.

Par l'application de techniques d'optimisation avancées, il devient possible de développer des systèmes AMR qui offrent des performances supérieures, une meilleure utilisation des matériaux, et des coûts de fonctionnement réduits. Ce processus d'optimisation contribue à rendre les technologies de réfrigération magnétique plus compétitives et attrayantes pour une large gamme d'applications, tout en répondant aux défis énergétiques et environnementaux actuels.

Parmi ces méthodes, on trouve les méthodes déterministes classiques et les méthodes non-déterministes. Les méthodes déterministes telles que la méthode du gradient et la méthode de Newton-Raphson sont généralement efficaces quand l'évaluation de la fonction est très rapide, ou quand la forme de la fonction est connue a priori. Les cas les plus complexes (temps de calcul important, nombreux optima locaux, fonctions non-dérivables, fonctions fractales, fonctions bruitées...) seront souvent traités plus efficacement par des méthodes non-déterministes telles que la méthode des essais de particules et les algorithmes génétiques. D'après des analyses théoriques, les algorithmes génétiques représentent une bonne stratégie de recherche en réalisant un équilibre dans le compromis cité auparavant [47], Cela nous a amené à les adopter pour l'optimisation multi-objectifs de notre système AMR, afin de maximiser leur efficacité globale tout en respectant les contraintes et spécifications de conception prédéfinies. Avant d'aborder les grandeurs à optimiser, nous présenterons quelques définitions ainsi que le principe de l'optimisation par les algorithmes génétiques.

## IV.2 définition des Algorithmes Génétiques

Les algorithmes génétiques (AGs) sont des algorithmes d'optimisation stochastique fondés sur les mécanismes de la sélection naturelle et de la génétique. Leur fonctionnement est extrêmement simple. On part avec une population de solutions potentielles (*chromosomes*) initiales arbitrairement choisies. On évalue leur performance (*fitness*) relative. Sur la base de ces performances on crée une nouvelle population de solutions potentielles en utilisant des opérateurs évolutionnaires simples : la sélection, le croisement et la mutation. On recommence ce cycle jusqu'à ce que l'on trouve une solution satisfaisante [48].

Les algorithmes génétiques sont déjà une histoire relativement ancienne puisque les premiers travaux de John Holland sur les systèmes adaptatifs remontent à 1962. L'ouvrage de David Goldberg a largement contribué à les vulgariser. Un algorithme génétique recherche le ou les extrema d'une fonction définie sur un espace de données. Pour l'utiliser, on doit disposer des cinq éléments suivants [48]:

1. Un principe de codage de l'élément de population. Cette étape associe à chacun des points de l'espace d'état une structure de données. Elle se place généralement après une phase de modélisation mathématique du problème traité. La qualité du codage des données conditionne le succès des algorithmes génétiques. Les codages binaires ont été très utilisés à l'origine. Les codages réels sont désormais largement utilisés, notamment dans les domaines applicatifs pour l'optimisation de problèmes à variables réelles.
2. Un mécanisme de génération de la population initiale. Ce mécanisme doit être capable de produire une population d'individus non homogène qui servira de base pour les générations futures. Le choix de la population initiale est important car il peut rendre plus ou moins rapide la convergence vers l'optimum global. Dans le cas où l'on ne connaît rien du problème à résoudre, il est essentiel que la population initiale soit répartie sur tout le domaine de recherche.
3. Une fonction à optimiser. Celle-ci retourne une valeur appelée *fitness* ou fonction d'évaluation de l'individu.
4. Des opérateurs permettant de diversifier la population au cours des générations et d'explorer l'espace d'état. L'opérateur de croisement recompose les gènes d'individus existant dans la population, l'opérateur de mutation a pour but de garantir l'exploration de l'espace d'états.
5. Des paramètres de dimensionnement : taille de la population, nombre total de générations ou critère d'arrêt, probabilités d'application des opérateurs de croisement et de mutation.

La figure suivante illustre un organigramme simplifié de fonctionnement d'un algorithme génétique :

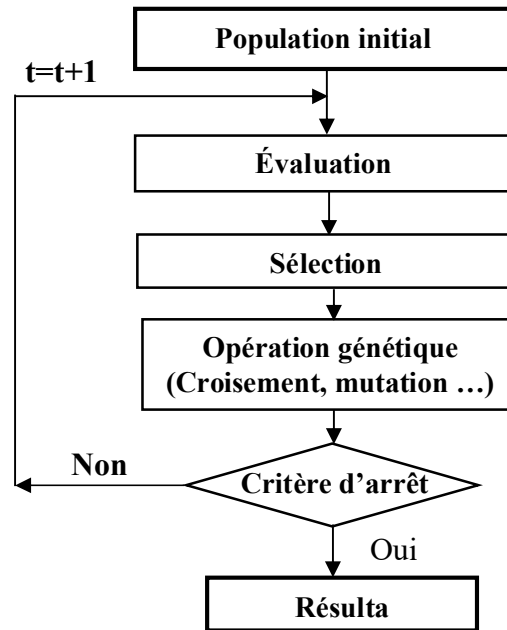


Figure IV.1 : Organigramme d'un Algorithme Génétique [45]

### IV.3 L'algorithme génétique hybride

La grande force des algorithmes génétiques est leur capacité à trouver la zone de l'espace des solutions contenant l'optimum global de la fonction objectif. En revanche, ils sont inefficaces lorsqu'il s'agit de trouver la valeur exacte de l'optimum dans cette zone.

Or, c'est précisément ce que les algorithmes locaux d'optimisation réalisent le mieux. Il est donc naturel de penser à associer un algorithme local à l'algorithme génétique de façon à trouver la valeur exacte de l'optimum global. On peut aisément le faire en appliquant à la fin de l'algorithme génétique un algorithme local sur le meilleur élément trouvé, tel que l'algorithme de gradient ou de simplex [49].

### IV.4 Optimisation de système AMR par algorithmes génétiques

Afin d'optimiser les performances globales de notre système AMR, nous proposons d'utiliser un algorithme génétique hybride comme outil d'optimisation. Cela nous permettra d'affiner ses paramètres pour atteindre une meilleure efficacité énergétique, une puissance de refroidissement maximale et des coûts de fonctionnement réduits, tout en respectant les contraintes de conception et les objectifs propres à notre système AMR.

Les performances du système AMR sont évaluées en fonction de trois critères principaux : l'écart de température ( $\Delta T$ ) entre les deux extrémités du matériau, l'énergie de refroidissement ( $Q$ ) générée, et la masse du matériau magnétocalorique (MCM) notée  $m_m$ . Par conséquent, cette étude prend en compte trois fonctions objectives lors de l'optimisation

du système AMR : maximiser  $\Delta T$ , maximiser  $Q$  et minimiser  $m_m$ . Le vecteur d'objectifs peut donc s'écrire comme suit :

$$F(x) = [f_1(x), f_2(x), f_3(x)]^T = [\Delta T, Q, m_m]^T \quad \text{IV.1}$$

Les paramètres de système ainsi que leurs limites (contraintes) sont détaillés dans le tableau IV.1. Ces paramètres sont issus d'un prototype développé par Clean Cooling Systems SA (CCS) à la Haute École Spécialisée de Suisse occidentale [45], [46]. La plage de variation de ces paramètres a été soigneusement choisie en tenant compte des limitations techniques et des considérations pratiques.

Nom	Description	Valeur minimale	Valeur maximale
$\dot{m}_f$	le débit massique du fluide [g/s]	20	22
$e_m$	L'épaisseur d'une plaque [m]	$9.00 \times 10^{-4}$	$1.20 \times 10^{-3}$
$e_f$	L'épaisseur du fluide [m]	$1.80 \times 10^{-4}$	$2.10 \times 10^{-4}$
L	Longueur d'une plaque du MCM [m]	0.09	0.12
$L_{eq}$	La largeur équivalente [m]	0.9	1.2
F	la fréquence d'opération [Hz]	0.4	0.7

*Tableau IV.1 : Paramètres d'optimisation avec leurs limites (contraintes)*

#### IV.4.1 Optimisation de système AMR par algorithmes génétiques

Pour initier notre démarche d'optimisation, nous débutons par la résolution de problèmes à objectif unique (SOO). Cette première étape nous permet de simplifier l'analyse et de mieux comprendre les dynamiques spécifiques du système AMR. En focalisant notre attention sur un seul objectif à la fois, nous pouvons identifier les paramètres clés et les ajustements nécessaires pour améliorer les performances du système. Cette approche nous fournit une base solide avant de passer à des optimisations plus complexes, telles que les problèmes multi-objectifs (MOO).

##### IV.4.1.1 Optimisation mono-objectif

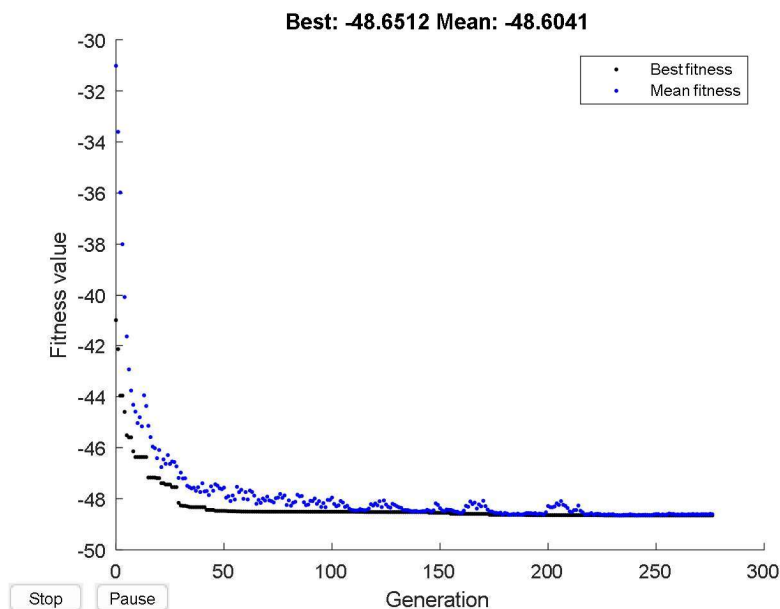
L'optimisation mono-objective (SOO) vise à maximiser ou minimiser une seule fonction objective, simplifiant ainsi le processus d'optimisation en recherchant une solution unique et optimale.

La conception optimisée (SOO) de système AMR se fait par une stratégie hybride composée d'un algorithme génétique et d'une méthode de gradient afin de localiser précisément le minimum global à l'aide de la fonction "Ga" développée sous Matlab.

Les paramètres de l’algorithme utilisé sont :

- Taille de la population 80 ;
- Sélection de type stochastique uniforme ;
- 3 individus élites automatiquement conservés d'une génération à l'autre ;
- Croisement multiple avec une probabilité de 0.6 ;
- Mutation uniforme avec une probabilité de 0.001 ;
- la fonction "fmincon" est utilisée comme méthode hybride ;
- Nombre de générations 300.

La figure (IV.2) montre l’évolution de la valeur de *fitness* du meilleur chromosome de la population courante au fur et à mesure des générations. Cette courbe montre que l’erreur de classification du meilleur individu diminue avec l’évolution de la population à chaque génération.



**Figure IV.2 :** Evolution de la valeur fitness du meilleur individu en fonction de la génération.

Les résultats de cette optimisation sont présentés dans les tableaux IV.2 et IV.3.

fonction objective	$\dot{m}_f$ [g/s]	$e_m$ [ $10^{-6}$ m]	$e_f$ [ $10^{-6}$ m]	$L$ [ $10^{-3}$ m]	$L_{eq}$ [ $10^{-3}$ m]	$F$ [Hz]
$\Delta T$	20.000	900.000	180.006	119.999	1199.999	0.699
Q	21.999	900.000	180.000	119.999	1199.999	0.400
$m_m$	20.000	900.000	180.000	90.000	900.000	0.700

**Tableau IV.2 :** Paramètres de conception optimaux obtenus

fonction objective	$\Delta T$ [K]	Q [J]	M [g]
$\Delta T$	48.651	2738.178	1010.880
Q	38.452	4401.416	1010.880
$m_m$	28.636	1599.841	568.620

*Tableau IV.3 : Objectifs optimaux atteints*

#### IV.4.1.2 Optimisation multi-objectifs

Pour optimiser la conception et la sélection d'un système de réfrigération magnétique à régénération active (AMR) en fonction de spécifications données, il est souvent nécessaire de prédéfinir plusieurs objectifs, qui peuvent être en conflit les uns avec les autres. Par exemple, on peut vouloir que le système soit compact, peu coûteux (en dessous d'une certaine limite) et qu'il offre une puissance de refroidissement élevée.

Pour répondre à ces critères, l'optimisation des systèmes AMR doit équilibrer les objectifs prédéfinis en utilisant l'optimisation multi-objectifs (MOO) plutôt que l'optimisation mono-objective (SOO). La MOO, aussi appelée optimisation vectorielle, consiste à optimiser plusieurs fonctions objectives de manière systématique et simultanée [50], [51].

Optimiser une solution en se concentrant sur un seul objectif peut souvent conduire à des résultats insatisfaisants pour les autres objectifs. Par conséquent, une approche raisonnable pour résoudre un problème multi-objectif consiste à examiner un ensemble de solutions. Chaque solution doit satisfaire les objectifs à un niveau acceptable sans être dominée par une autre solution [50].

En résumé, la MOO permet de trouver un compromis entre plusieurs objectifs pour obtenir des solutions équilibrées et acceptables pour toutes les exigences définies. Une solution optimale de Pareto est particulièrement utile dans ce contexte, car elle représente un ensemble de solutions où aucune amélioration d'un objectif ne peut être obtenue sans détériorer au moins un autre objectif, ce qui est crucial pour la conception optimale d'un système de réfrigération magnétique à régénération active.

Dans ce travail la fonction " *gamultiobj* " de MATLAB a été employée pour réaliser l'optimisation multi-objectifs de notre système AMR. Cette fonction utilise des algorithmes génétiques pour optimiser plusieurs objectifs simultanément. Elle permet de fournir un ensemble de solutions qui forment ce qu'on appelle le "front de Pareto". Ces solutions représentent un compromis optimal entre les différents objectifs d'optimisation, où aucune solution ne peut être améliorée dans un objectif sans détériorer au moins un autre objectif. Les

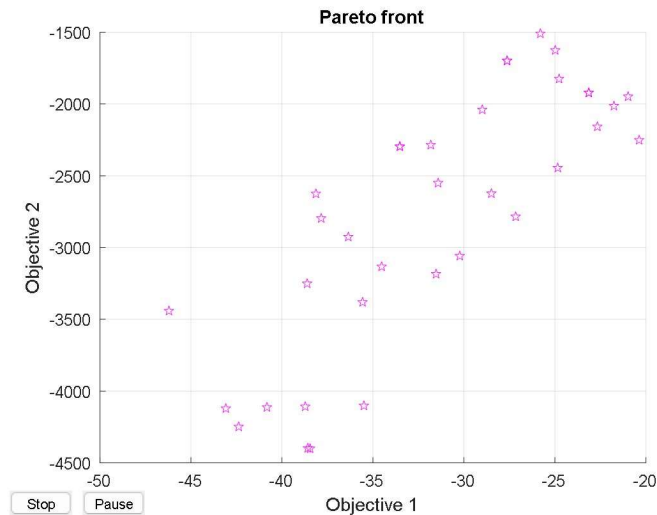
résultats donnés par "gamultiobj" comprennent donc les différentes solutions non dominées sur le front de Pareto, offrant ainsi une vue complète des compromis possibles entre les objectifs d'optimisation.

Le tableau ci-dessous présente les paramètres optimaux "front de Pareto" trouvés pour le système AMR.

Fonction objectif 1 $\Delta T$ [K]	Fonction objectif 2 Q [J]	Fonction objectif 3 $m_m$ [g]	$\dot{m}_f$ [g/s]	$e_m$ [ $10^{-6}$ m]	$e_f$ [ $10^{-6}$ m]	$L$ [ $10^{-3}$ m]	$L_{eq}$ [ $10^{-3}$ m]	$F$ [Hz]
20.977	1948.486	573.595	20.7039	906.643	206.006	90.089	900.332	0.460
22.667	2158.177	621.079	20.7159	923.380	201.062	93.268	924.572	0.449
36.353	2926.147	917.758	20.6693	939.144	201.200	110.873	1129.994	0.510
25.799	1509.716	586.414	20.8249	927.555	205.313	90.046	900.130	0.685
31.822	2285.784	781.099	20.6285	917.765	200.428	94.056	1160.092	0.564
28.490	2624.049	798.308	20.6631	1017.118	196.174	103.702	970.326	0.452
31.418	2550.633	721.456	20.7006	908.507	193.437	111.216	915.415	0.516
38.616	3251.634	926.396	20.8209	910.404	191.713	115.936	1125.255	0.497
21.756	2013.789	619.896	20.7971	965.388	200.761	91.315	901.530	0.459
38.134	2625.738	865.257	20.6198	953.815	189.133	117.385	990.775	0.592
24.982	1625.693	640.245	20.7647	1005.654	205.462	90.566	901.236	0.614
23.138	1922.229	599.014	20.7108	926.988	203.591	91.983	900.663	0.503
31.533	3184.678	914.111	20.6404	1063.906	196.128	118.219	931.779	0.414
35.569	3381.176	926.154	20.6068	959.974	186.082	111.420	1110.109	0.440
33.521	2296.666	803.096	20.6299	958.508	192.929	104.066	1032.215	0.590
24.844	2445.341	714.792	20.7617	927.382	206.213	90.590	1090.799	0.429
30.227	3058.947	825.142	20.6996	936.117	195.413	103.003	1097.120	0.419
34.521	3133.505	837.742	20.6837	908.236	189.064	111.870	1057.071	0.464
37.845	2796.714	915.489	20.6371	940.211	195.406	111.763	1116.950	0.552
27.627	1699.176	646.165	20.8034	939.499	203.506	92.771	950.472	0.654
27.156	2785.280	730.498	20.7112	931.788	201.742	107.977	930.838	0.419
28.993	2039.948	695.684	20.7744	927.731	201.206	95.665	1004.944	0.580
38.722	4108.506	944.764	20.4066	900.000	180	120	1121.515	0.400
46.210	3441.551	1010.880	20.0000	900.000	180	120	1200	0.537
20.371	2251.614	573.595	20.0000	900.000	180	90.788	900	0.400
42.376	4249.068	1010.880	20.0000	900.000	180.000	120	1200	0.410
35.495	4102.505	926.488	22.0000	900.000	180	120	1099.820	0.400
38.453	4401.416	1010.880	22.0000	900.000	180.000	120	1200	0.400
38.579	4398.332	1012.357	21.9241	901.315	180	120	1200	0.400
40.825	4113.319	968.883	20.0000	900.000	180.000	120	1150.146	0.410
24.770	1825.214	620.379	20.7611	954.546	197.905	90.961	916.031	0.556
23.138	1922.230	599.0144	20.7108	926.989	203.591	91.983	900.663	0.503
33.521	2296.666	803.096	20.6299	958.508	192.929	104.066	1032.215	0.590
27.627	1699.176	646.165	20.8034	939.499	203.506	92.771	950.472	0.654
43.085	4121.676	1010.880	20.0000	900.000	180	120.000	1200.000	0.428

Tableau IV.4 : Paramètres de conception optimaux "front de Pareto" obtenus





*Figure IV.3 : Optimisation Multi-Objectifs avec Algorithme Génétique*

## IV. 6 CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons présenté les concepts de base et les caractéristiques des algorithmes génétiques, ainsi que leurs opérateurs principaux, tels que le codage, la sélection, le croisement et la mutation. Après, on a montré comment hybridé cette technique de recherche globale avec une autre locale pour dimensionner optimalement les paramètres de système AMR. A l'issue de ce chapitre, on peut conclure que l'utilisation de l'optimisation multi-objectifs par la technique de l'algorithme génétique nous permet d'obtenir des solutions de meilleure qualité et plus robustes pour le dimensionnement des paramètres d'un système de réfrigération magnétique à régénération, en prenant en compte de manière plus exhaustive les différents aspects de la conception.

---

---

## CONCLUSION GENERALE

---

---

## CONCLUSION GENERALE

Les défis environnementaux, au premier rang la lutte contre le changement climatique, impliquent de modifier rapidement notre modèle de développement. Il est ainsi nécessaire d'améliorer l'efficacité énergétique, d'encourager les innovations et de favoriser la pénétration du marché par les nouvelles technologies.

Un des domaines le plus concernés c'est le domaine de la réfrigération, qui est responsable de 15 % de la consommation mondiale d'électricité. Les équipements conventionnels de réfrigération, basées sur la technologie de compression de vapeurs d'un fluide frigorigène, ont atteint aujourd'hui leur limite d'efficacité. De plus, ces systèmes fonctionnent avec des fluides dangereux pour l'environnement. Pour remplacer la technologie actuelle, les scientifiques ont commencé ces dernières années à explorer des nouvelles technologies pour le refroidissement comme le refroidissement thermoélectrique, le refroidissement thermoacoustique et la réfrigération magnétique.

Basée sur l'effet magnétocalorique (EMC), la réfrigération magnétique est considérée actuellement comme l'une des alternatives sérieuses pour remplacer les systèmes de réfrigération traditionnels. Elle possède plusieurs avantages comme l'absence de polluants atmosphériques, un faible niveau de bruit, la recyclabilité totale des matériaux et surtout un rendement énergétique potentiellement nettement supérieur à celui de l'effet Peltier, thermoacoustique ou d'un cycle thermodynamique classique. Cette technologie propose des systèmes propres et performants pouvant s'intégrer dans des nombreuses applications comme la réfrigération industrielle, la réfrigération domestique, le refroidissement des systèmes portables (électronique, médical, etc.), la climatisation domestique ou des automobiles.

Ce travail a introduit les définitions et notions de base nécessaires à la compréhension de la réfrigération magnétique autour de la température ambiante. Comme pour tout système frigorifique, il est nécessaire de bien comprendre les notions thermodynamiques sous-jacentes.

Nous avons présenté succinctement les matériaux magnétocaloriques les plus propices à des applications à température ambiante. Si le gadolinium reste le matériau de référence,

son coût élevé et sa faible abondance ne permettent pas de l'envisager pour une production industrielle de systèmes de réfrigération magnétique. La recherche sur les nouveaux matériaux magnéto-caloriques reste très active et quelques matériaux semblent d'ores et déjà très prometteurs, notamment les LaFeSi .

Nous avons vu dans quels étaient les éléments constitutifs des systèmes de réfrigération magnétique, ainsi que les principes de fonctionnement et les choix possibles dans la conception d'un système. Les cycles de réfrigération magnétique sont équivalents aux cycles thermodynamiques classiques, à la différence près que les phases de compression et détente des gaz sont remplacées par l'aimantation et la désaimantation de MCM. Cependant pour atteindre les écarts de température requis pour des applications industrielles, il est nécessaire d'utiliser le cycle AMR pour lequel c'est le MCM qui joue le rôle de régénérateur.

Nous avons formulé les équations fondamentales de la convection et de la conduction thermique, puis développé un modèle numérique 1D pour simuler le comportement thermique des régénérateurs dans un système de réfrigération magnétique active. Ce modèle a ensuite été validé par comparaison avec des données expérimentales obtenues à partir d'un prototype de réfrigération magnétique.

A la fin de ce mémoire nous avons identifié les paramètres critiques pour les systèmes AMR et défini les objectifs d'optimisation, tels que la compacité, le coût et la puissance de refroidissement. En utilisant des algorithmes génétiques, nous avons ajusté ces paramètres pour atteindre un équilibre optimal entre les différents objectifs.

En définitive, ce travail nous a permis d'acquérir une expérience enrichissante dans le domaine de réfrigération magnétique autour de la température ambiante.

### **Perspectives**

Pour aller plus loin, nous proposons de développer un modèle 2D ou 3D des systèmes AMR pour une simulation plus précise et réaliste. Il serait également pertinent de considérer d'autres paramètres dans l'optimisation, comme la minimisation du nombre de cycles nécessaires pour atteindre le régime permanent. Enfin, l'introduction de nouveaux matériaux, en remplacement du gadolinium, pourrait améliorer les performances et la viabilité économique des systèmes AMR.



---

---

BIBLIOGRAPHIE

---

---

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] Julien Roudaut, “Modélisation et conception de systèmes de réfrigération magnétique autour de la température ambiante”, Thèse de Doctorat en génie électrique, université de Grenoble, 2011.
- [2] Alexandre Meunier, “Contribution théorique et expérimentale à l’étude d’un système magnétocalorique : application au développement d’un prototype industriel de pompe à chaleur” Thèse de Doctorat en énergétique, université de Franche-Comté, 2016.
- [3] Sonia Khadechi-Haj Khelifa, “Propriétés structurales, magnétiques et magnétocaloriques de pnictures isotopes de Mn(Fe,Co)P” Thèse de Doctorat en physique ,université Grenoble Alpes, 2016.
- [4] E. Warburg, “Magnetische Untersuchungen,” *Ann. Phys.*, vol. 249, no. 5, pp. 141–164, 1881.
- [5] N. Tesla, “Thermo-magnetic motor,” US Pat. 396,121, 1889.
- [6] T. Edison, “Pyromagnetic generator,” US Pat. 476,983, no. 476, 1892
- [7] P. Langevin, “Sur la théorie du magnétisme,” *J. Phys. Theor. Appl.*, pp. 678–693, 1905.
- [8] P. Weiss and A. Piccard, “Le phénomène magnéto-calorique,” *J. Phys. Theor. Appl.*, 1917.
- [9] P. Debye, “Einige Bemerkungen zur Magnetisierung bei tiefer Temperatur,” *Ann. Phys.*, vol. 386, no. 25, pp. 1154–1160, 1926.
- [10] W. F. Giaque, “A thermodynamic treatment of certain magnetic effects.,” *J. Am. Chem. Soc.*, vol. 49, no. 8, pp. 1864–1870, 1927.
- [11] W. Giaque and D. MacDougall, “Attainment of Temperatures Below 1° Absolute by Demagnetization of  $Gd_2(SO_4)_3 \cdot 8H_2O$ ,” *Phys. Rev.*, vol. 43, no. 9, pp. 768–768, May 1933.
- [12] W. . De Haas, E. . Wiersma, and H. . Kramers, “Experiments on adiabatic cooling of paramagnetic salts in magnetic fields,” *Physica*, vol. 1, no. 1–6, pp. 1–13, Jan. 1934.
- [13] N. Kúrti and F. Simon, “Production of Very Low Temperatures by the Magnetic Method: Supraconductivity of Cadmium,” *Nature*, 1934
- [14] C. Heer and J. Daunt, “Heat Flow in Metals below 1 °K and a New Method for Magnetic Cooling,” *Phys. Rev.*, vol. 76, no. 6, pp. 854–855, Sep. 1949.
- [15] C. Heer, C. Barnes, and J. Daunt, “Magnetic Refrigerator for Maintaining Temperatures below 1°K,” *Phys. Rev.*, vol. 91, no. 2, pp. 412–413, Jul. 1953.
- [16] C. V. Heer, C. B. Barnes, and J. G. Daunt, “The Design and Operation of a Magnetic Refrigerator for Maintaining Temperatures below 1°K,” *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 25, no. 11, p. 1088, Nov. 1954.
- [17] J. Darby, J. Hatton, B. V Rollin, E. F. W. Seymour, and H. B. Silsbee, “Experiments on the Production of Very Low Temperatures by Two-Stage Demagnetization,” *Proc. Phys. Soc. Sect. A*, vol. 64, no. 10, pp. 861–867, Oct. 1951.
- [18] J. R. van Geuns, “Study of a new magnetic refrigerating cycle,” *Philips Res. Rep. (Suppl.)*, No. 6, 1-105(1966), Jan. 1966.
- [19] W. P. Pratt Jr, S. S. Rosenblum, W. A. Steyert, and J. A. Barclay, “A continuous demagnetization refrigerator operating near 2 K and a study of magnetic refrigerants 138,” *Cryogenics (Guildf.)*, vol. 17, no. 12, pp. 693–689, 1977

- [20] G. V. Brown, "Magnetic heat pumping near room temperature," *J. Appl. Phys.*, vol. 47, no. 8, p. 3673, Aug. 1976.
- [21] Cédric Dupuis, "Matériaux à effet magnétocalorique géant et systèmes de réfrigération magnétique" Thèse de Doctorat en génie électrique, Université de Grenoble, 2009.
- [22] Tishin, A. M. et Spichkin, Y. I., "The Magnetocaloric Effect and its Applications" Series in Condensed Matter Physics, Institute of Physics Publishing, Bristol. ISBN 0-750-30922-9, 2003
- [23] A. Lebouc, F. Allab, J.M. Fournier, J.P Yonnet, "Réfrigération magnétique", [RE 28], Techniques de l'Ingénieurs, 2005.
- [24] B.f. Yu, Q. Gao, B. Zhang, X.Z. Meng, Z. Chen, "Review on Research of Room Temperature Magnetic Refrigeration", *International Journal of Refrigeration* 26, 622-636, 2003
- [25] A. Tura, "Active Magnetic Regenerator Experimental Optimization " Master of Applied Science, university of Victoria, 2005.
- [26] Voraksmý BAN, " Matériaux magnéto-réfrigérants à large zone de travail ", Thèse Doctorat en chimie, université Henri Poincaré, 2011
- [27] K.A. Gschneidner Jr, V.K. Pecharsky, A.O. Tsokol, " Reports on Progress in Physics", 68 1479-1539, 2005
- [28] K. A. Gschneidner Jr, V. K. Pecharsky, and A. O. Tsokol, "Recent developments in magnetocaloric materials," *Reports Prog. Phys.*, vol. 68, no. 6, pp. 1479–1539, Jun. 2005.
- [29] YU (B.F.), GAO (Q.) et CHEN (Z.). "Review on research of room temperature magnetic refrigeration. *International Journal of Refrigeration* ", 26, 622-636, 2003.
- [30] TISHIN (A.M.). "Handbook of Magnetic Material" Vol. 12, Buschow K.H.J., Amsterdam, 1999.
- [31] ALLAB (F.), LÉBOUC (A.), FOURNIER (J.M.), YONNET (J.P.), FRUCHART (D.) et GIGNOUX (D.). " Réfrigération magnétique : caractérisation des matériaux à EMC géant". Conférence EF'2003, Gif-sur-Yvette ,2003.
- [32] HASHIMOTO (T.), KOSHER (T.), SAHASHI (M.), INOMATA (K.), TOMOKIYO (A.) et YAYAMA (H.). "New application of complex magnetic materials to the magnetic refrigerant in an Ericsson magnetic refrigerator". *J. Appl. Phys.*, 62, 3873, 1987.
- [33] Brown, G. V. "Basic principles and possible configurations of magnetic heat pumps". *ASHRAE Trans.*, 87(4):783–793, 1981
- [34] Nikly, G. et Muller, C. "Technical and economical criteria to design and realize a magneto-caloric heat pump". In *Proc. Second IIF-IIR International Conference on Magnetic Refrigeration at Room Temperature*, pages 59– 70, Portoroz, Slovenia, 2007.
- [35] Sarlah, A., Kitanovski, A., Poredos, A., Egolf, P. W., Sari, O., Gendre, F. et Besson, C. "Static and rotating active magnetic regenerators with porous heat exchangers for magnetic cooling". *Int. J. Refrigeration*, 29(8):1332– 1339, 2006.
- [36] Vasile, C. et Muller, C. "Innovative design of a magnetocaloric system". *Int. J. Refrig.*, 29(8):1318–1326, 2006.
- [37] Sergiu LIONTE "Caractérisation, étude et modélisation du comportement thermomagnétique d'un dispositif de réfrigération magnétique à matériaux non linéaires et

- point de Curie proche de la température ambiante” Thèse de Doctorat en énergétique .Université de Strasbourg ,2015
- [38] Chen, F. C., et al. “Thermodynamic analysis of four magnetic heat-pump cycles”, ASME, J. Eng. Gas Turbines Power, Vol. 114, pp. 715-721,1992.
- [39] YU (B.F.), GAO (Q.) et CHEN (Z.). “Review on research of room temperature magnetic refrigeration”, International Journal of Refrigeration, 26, 622-636, 2003.
- [40] TISHIN (A.M.). “Handbook of Magnetic Material” Vol. 12, Buschow K.H.J., Amsterdam, 1999).
- [41] PECHARSKY (V.K.) et GSCHNEIDER (K.A. Jr). “Magnetocaloric Effect and Magnetic Refrigeration”, JMMM 200, 44-56, 1999.
- [42] Houssem Rafik El-Hana Bouchekara. “RECHERCHE SUR LES SYSTEMES DE REFRIGERATION MAGNETIQUE. MODELISATION NUMERIQUE, CONCEPTION ET OPTIMISATION” Thèse de Doctorat en génie électrique, Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 2008.
- [43] Janna, W.S. Engineering Heat Transfer”, ISBN 0-8493-2126-3, CRC Press USA.2000.
- [44] K. Engelbrecht, G. Nellis, S. Klein, “A Numerical Model Of An Active Magnetic Regenerator Refrigeration System”, AirConditioning And Refrigeration Technology Institute, ARTI-21CR/612-10075, 2005.
- [45] Balli, M., Sari, O., Mahmed, C., Besson, C., Bonhote, P., Duc, D., Forchelet,J., “A pre-industrial magnetic cooling system for room temperature application”, Applied Energy 98, 556–561,2012.
- [46] Sari, O., Balli, M., “from conventional to magnetic refrigerator technology”, International Journal of refrigeration 37, 8–15, 2014.
- [47] S. TAIBI, “ Contribution à l’Etude, la Conception, le Dimensionnement et l’Optimisation de Machines à Réductance Variable de Type Vernier ”, Thèse de Doctorat en Génie Electrique, Université de Sciences et Technologie de Lille, France, 2002.
- [48] JEAN-MARC ALLIOT, “ Techniques d’optimisation stochastique appliquées à certains problèmes du trafic aérien”, 27 octobre 1998.
- [49] T. BELKACEM, “Modélisation et Commande Floue Optimisée d’une Génératrice à Double Alimentation Application à un Système Eolien à Vitesse Variable”, mémoire de magister en Electrotechnique, université de Batna, Algérie, 2010.
- [50] Marler, R.T., Arora, J.S., “Survey of multi-objective optimization methods for engineering”, Struct. Multidisc. Optim. 26 (6), 369e395, 2004.
- [51] Branke, J., Deb, K., Miettinen, K., Słowinski, R., “Multiobjective Optimization Interactive and Evolutionary Approaches”, Springer, Berlin ,2008.



