

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Djilali Bounaama Khemis Miliana



Faculté des sciences et de la technologie

Département de la Technologie

Mémoire du Projet de Fin d'Etudes

Pour l'obtention de diplôme

Master

En

« Electrotechnique »

Spécialité :

« Electrotechnique Industrielle »

Thème :

Etude et Simulation d'un circuit magnétique pour le développement d'un réfrigérateur magnétique rotatif

Réalisé par :

BOUASKEUR SID ALI

BOUDANI MOHAMED

Encadré par :

Mr : B.bendouha

Promotion :2022/2023

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

السلام عليكم ورحمة الله وبركاته

REMERCIEMENTS

En tout premier lieu nous rendons grâce à **ALLAH**, le tout puissant de nous avoir donné le courage et la volonté nécessaire pour mener à bout ce travail.

Par ailleurs, les travaux effectués dans le cadre de ce projet ont pu être réalisés grâce à de nombreuses personnes dont les mots ne suffisent pas pour leurs remerciées.

Un vif remerciement à **Mr. BENDOUHA.B** dont rien ne peut exprimer sa gratitude et l'aménité qu'il a exposé pour nous encadrer via l'accompagnement, le conseil , l'encouragement qui va avec et le désir qu'elle avait pour nous éclairer de ce que on avait comme difficulté à cerner durant la réalisation de ce projet et dans le domaine génie électrique en général. Grand merci.

Nous remercions l'ensemble du corps de l'enseignement du génie électrique et les enseignants de **l'Université DJILALI BOUNAAMA -Khemis Miliana-** pour le travail consenti à notre formation.

Enfin, nous tenons à remercier nos promotionnels pour leur assistance et toutes personnes de près ou de loin qui nous ont aidé afin d'atteindre ce niveau d'étude et de formation.

DEDICACES

Je dédie ce projet de fin d'études à toute ma famille **BOUDANI** surtout mes parents, **Mes frères** et la famille **ABDOUNI** pour leur soutien, prières et encouragements.

Je souhaite aussi dire un grand merci à **tous mes amis**.

Il me faut aussi remercier tous ceux qui ont une relation de proche ou de loin avec la réalisation de ce mémoire.

MOHAMED

إهداء

أهدي ثمرة جهدي هذه إلى من قال فيهم عز من قال:

<< وقل ربي ارحمهما كما ربياني صغيرا >> الآية 24 من سورة الإسراء.

التي ضحت من أجلى ولم تدخر جهدا في سبيل إسعادي على الدوام (أمي الحبيبة)

والى صاحب الوجه والأفعال الحسنة، فلم يبخل عليا طيلة حياته (والدي العزيز).

الى أسرتي وجميع اصدقاء المسيرة الدراسية.

وفي الأخير أتوجه بشكر خاص الى جميع الأساتذة الكرام الذين بسببهم وصلت الى ما أنا عليه اليوم.

أطال الله وبارك في أعماركم ونفع بكم الأمة

سيد علي

Table des matières

| | |
|---|-----------|
| Introduction Générale | 13 |
| Chapitre I : La réfrigération magnétique : l'effet Magnétocalorique et matériaux | 15 |
| <i>I.1 Introduction :</i> | <i>16</i> |
| <i>I.2 Historique.....</i> | <i>16</i> |
| <i>I.3 L'effet magnétocalorique EMC</i> | <i>18</i> |
| I.3.1 Définition | 18 |
| I.3.2 PRINCIPE DE L'EMC | 20 |
| <i>I.4 Revue sur les démonstrateurs de la RM.....</i> | <i>23</i> |
| I.4.1 Prototype magnétique de Brown (1976) | 23 |
| I.4.2 Prototype de Steyert (1978-1983) : | 24 |
| I.4.3 Prototype de Kirol et Dacus (1988) : | 25 |
| I.4.4 Prototype de Green et al. (1990) : | 26 |
| I.4.5 Prototype de Zimm et al. (1998) : | 27 |
| I.4.6 Prototype de Hirano et al. (Système Japonais) (2002)..... | 28 |
| I.4.7 Prototype de Rowe et al. (2002-2006)..... | 29 |
| I.4.8 Dispositif réalisé en Espagne..... | 30 |
| I.4.9 Prototype de Okamura et al. (Système Japonais) (2006-2007) | 31 |
| I.4.10 Dispositif du G2Elab (2008) | 31 |
| I.4.11 Prototype de Zimm et al. (2007-2010) | 32 |
| I.4.12 Prototype de Balli et al. (2010) | 33 |
| <i>I.5 APPROCHE THERMODYNAMIQUE DEL'EMC</i> | <i>34</i> |
| <i>I.6 Les matériaux à effet magnétocalorique (MCM).....</i> | <i>36</i> |
| I.6.1 Présentation..... | 36 |
| I.6.2 Caractérisation des matériaux magnétocalorique | 36 |
| I.6.3 Principaux matériau magnétocalorique..... | 38 |
| <i>I.7 CONCLUSION.....</i> | <i>40</i> |
| Chapitre II : Les systèmes de réfrigération magnétique | 41 |
| <i>II.1 INTRODUCTION</i> | <i>42</i> |
| <i>II.2 COMPOSITION</i> | <i>42</i> |
| <i>II.3 FONCTIONNEMENT</i> | <i>43</i> |
| <i>II.4 CYCLES DE REFRIGERATION MAGNETIQUE</i> | <i>44</i> |
| II.4.1 Cycle magnétique de Carnot..... | 44 |
| II.4.2 Cycle magnétique d'Ericsson / Stirling..... | 46 |
| II.4.3 Cycle magnétique de Brayton | 47 |
| II.4.4 Cycle magnétique à régénération active (AMR) | 47 |
| <i>II.5 CONCLUSION</i> | <i>50</i> |
| Chapitre III : Étude des régénérateurs magnétiques actifs | 51 |
| <i>III.1 Introduction.....</i> | <i>52</i> |
| <i>III.2 Cycle à régénération active (AMRR : Active Magnetic Regenerative réfrigération).....</i> | <i>52</i> |
| <i>III.3 Modélisation du cycle AMRR.....</i> | <i>54</i> |
| III.3.1 Mise en équation et hypothèses simplificatrices | 56 |
| III.3.2 Calcul du coefficient d'échange h et des pertes de charge | 57 |
| <i>III.4 Conclusions.....</i> | <i>59</i> |

| | |
|--|-----------|
| Chapitre IV : Étude des sources de champ magnétique..... | 60 |
| IV.1 <i>Introduction.....</i> | 61 |
| IV.2 <i>Quelques notions de magnétisme</i> | 61 |
| IV.2.1 Principes de bases..... | 61 |
| IV.2.2 Matériaux magnétiques | 62 |
| IV.2.3 Sources de champ magnétique | 64 |
| IV.3 <i>Revue des sources de champ pour la réfrigération magnétique</i> | 65 |
| IV.3.1 Circuits magnétiques simples | 65 |
| IV.3.2 Assemblages de type Halbach | 66 |
| IV.3.3 Structures magnétiques complexes..... | 70 |
| IV.4 <i>Conclusion</i> | 71 |
| Chapitre V : simulation numérique | 72 |
| V.1 <i>Introduction :</i> | 73 |
| V.2 <i>Définition logiciel FEMM</i> | 73 |
| V.3 <i>Prototype de halbach</i> | 74 |
| V.3.1 Définition | 74 |
| V.3.2 La géométrie du prototype | 75 |
| V.3.3 Simulation numérique du champ magnétique et l'induction magnétique..... | 76 |
| V.4 <i>CONCLUSION</i> | 79 |
| CONCLUSION GENERALE | 81 |
| ANNEXES | 83 |
| BIBLIOGRAPHIE | 87 |

TABLE DES FIGURES

Chapitre I

| | |
|--|------------------------------------|
| Figure I. 1: Comparaison des performances de différentes technologies de réfrigération. | 16 |
| Figure I. 2: Moteur thermomagnétique de Necole Tesla | 17 |
| Figure I. 3: Schématisation du couplage entre l'entropie magnétique et l'entropie du réseau | Erreur ! Signet non défini. |
| Figure I. 4: Evolution en fonction de la température de l'aimantation et de la variation d'entropie magnétique du Gd de sa température de curie T_c | Erreur ! Signet non défini. |
| Figure I. 5: Effet magnétocalorique | 20 |
| Figure I. 6: Schématisation de l'effet magnétocalorique | Erreur ! Signet non défini. |
| Figure I. 7: Equivalence de la RM avec la réfrigération conventionnelle. | 22 |
| Figure I. 8: Schéma du prototype de Brown. | 24 |
| Figure I. 9: Représentation schématique du prototype de Steyert. | 25 |
| Figure I. 10: Schéma du prototype de Kirol et Dacus. | 26 |
| Figure I. 11: Schéma du prototype de Green et al. | 27 |
| Figure I. 12: Schéma du premier prototype de Zimm et al. | 28 |
| Figure I. 13: Schéma du prototype de Hirano et al. | 29 |
| Figure I. 14: Schéma du prototype de Rowe et al. | 30 |
| Figure I. 15: Dispositif magnétique réalisé en Espagne. | Erreur ! Signet non défini. |
| Figure I. 16: Le dispositif japonais initial (gauche) et amélioré (droite). | Erreur ! Signet non défini. |
| Figure I. 17: Le dispositif du G2Elab. | 32 |
| Figure I. 18: Photo et schéma du 3 ^{ème} prototype de Zimm et al. | 33 |
| Figure I. 19: Photo de prototype de Ball et al. | Erreur ! Signet non défini. |
| Figure I. 20: Capacité thermique massique musérée et l'EMC déduit par l'alliage de Gd | 37 |
| Figure I. 21: Transition de phase et variation de l'entropie en fonction de type de matériau. | 39 |

Chapitre II

| | |
|--|------------------------------------|
| Figure II. 1: Composition d'un système de réfrigération magnétique. | 42 |
| Figure II. 2: Les deux grandes familles de système de réfrigération magnétique. | Erreur ! Signet non défini. |
| Figure II. 3: Cycle magnétique de Carnot | Erreur ! Signet non défini. |
| Figure II. 4: Schématisation d'un système délivrant de la puissance froide et chaude à l'aide d'un travail fourni. | Erreur ! Signet non défini. |
| Figure II. 5: Cycle magnétique d'Ericsson/stirling | 46 |
| Figure II. 6: Cycle magnétique de Brayton | 47 |

Figure II. 7:Schéma simplifié du concept brevée par Barclay. **Erreur ! Signet non défini.**

Chapitre III

Figure III. 1:Schéma de principe du réfrigération magnétique à cycle AMRRA et profil de température dans le matériau et le fluide.....52

Figure III. 2:Représentation du cycle AMRR et mise en évidence de l'amplification du gradient thermique.....55

Figure III. 3:Représentation de la géométrie de l'écoulement et les éléments différentiels (em:épaisseur de la plaque ; ef : épaisseur du fluide ; L : longueur de la plaque)56

Chapitre IV

Figure IV. 1:Cycle hystérésis $B(H)$ 63

Figure IV. 2:Les grandes classes de matériaux ferromagnétique.....63

Figure IV. 3:Géométrie de la structure d'aimant utilisée par Bohigas et al.....66

Figure IV. 4:Géométrie de l'aimant en C de Zheng et al.66

Figure IV. 5:Géométrie du cylindre de Halbach utilisé par Bjork et al.67

Figure IV. 6:Principe de fonctionnement des 2 cylindres de Halbach conception.....68

Figure IV. 7:Géométrie du cylindre de Halbach modifié proposé par Lee et al69

Figure IV. 8:Géométrie de l'aimant en C utilisée par Vasile et Muller.70

Figure IV. 9:Systeme conçu par Zimm et al.70

Figure IV. 10:Géométrie de la structure d'aimants de Okamura et al.....71

Chapitre V

Figure V. 1:Vue de coté du systeme magnétique et du rotatif soupape.....74

Figure V. 2: 8 Mag détails de base75

Figure V. 3:Géométrie du prototype sans et avec Gadolinium.....75

Figure V. 4:Simulation numérique de la direction des lignes de champs magnétique dans le circuit dans le cas en l'absence du Gadolinium76

Figure V. 5:L'indiction magnétique B le long de l'entrefer dans le cas en l'absence de Gd.....76

Figure V. 6:Simulation numérique de la direction des lignes de champs magnétique en présence du Gd77

Figure V. 7:L'induction magnétique B le long de l'entrefer dans le cas en présence du Gd.....77

Figure V. 8: Variation de C_p en fonction de T pour différents B78

Figure V. 9:Variation de l'EMC en fonction de T pour différents B 79

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre I

Tableau I. 1:Caractérisation de quelque matériaux à EMC géant autour la température ambiante.[2] 40

Chapitre IV

Tableau IV. 1:Classification des matériaux magnétiques62

NOMENCLATURE

ABREVIATION :

| <i>Abréviation</i> | <i>Signification</i> |
|---------------------------|---------------------------------------|
| AMR | Régénération magnétique active |
| CFC | Chlorofluorocarbure |
| COP | Coefficient de performance |
| COP _{Brayton} | Coefficient de performance de Brayton |
| COP _{Carnot} | Coefficient de performance de Carnot |
| COP _{Ericsson} | Coefficient de performance d'Ericsson |
| EMC | Effet magnétocalorique |
| Gd | Gadolinium |
| HCFC | Hydro chlorofluorocarbure |
| HFC | Hydrofluorocarbure |
| MCM | Matériau magnétocalorique |
| NdFeB | Néodyme-fer-bore |
| RM | Réfrigération magnétique |

LETTRES ROMAINES :

| <i>Symbole</i> | <i>Grandeur</i> | <i>Unité</i> |
|------------------|---|---------------|
| B | Induction | [T] |
| C _p | Capacité calorifique | [J/Kg. K] |
| ΔT | Variation de la température | [K] |
| ΔT _{ad} | Variation de température adiabatique | [K] |
| H | Champ magnétique | [A/m] |
| H ₀ | Champ appliqué | [A/m] |
| L | Longueur | [m] |
| M | Aimantation | [A/m] |
| Q | Quantité de chaleur | [J] |
| Q _c | Quantité de chaleur de la source chaude | [J] |
| Q _f | Quantité de chaleur de la source froide | [J] |
| R | Constante des gaz parfaits | [J/mol. K] |
| S | Entropie | [J/Kg. K] |
| S _m | Entropie magnétique | [J/Kg. K] |
| μ ₀ | Perméabilité du vide | [H/m] |
| T | Température | [K] |
| T ₀ | Température initiale | [K] |
| T _c | Température de Curie | [K] |

المخلص

دفعت مشكلة أنظمة التبريد التقليدية مثل مركبات الكربون الفلور كلورية ومركبات الكربون الهيدروكلور فلورية الباحثين في السنوات الأخيرة لإيجاد بديل لهذه التقنية وهو التبريد المغناطيسي.

التبريد المغناطيسي هو تقنية تبريد مبنية على ظاهرة الأثر المغناطيسي وتعتمد على بعض المواد ذات الأثر المغناطيسي الحراري لتغيير درجة الحرارة عند تعرضها لتغير المجالات المغناطيسية.

وهي تكنولوجيا صديقة للبيئة، عازلة للصوت وذات فعالية للطاقة أعلى، وبالتالي يمكن استبدالها تماماً لصالح أنظمة التبريد الجديدة.

وقد قمنا في هذه المذكرة بدراسة هذه التكنولوجيا الناشئة الجديدة من مبدأ عملها ومكونات نظامها .

ABSTRACT

The problem of the emissions of the conventional cooling agents such as CFC, HCFC and HFC pushed the researchers these last years to find an alternative to this technique.

The magnetic refrigeration is a technology of rupture, based on the property of some materials and magnetocaloric alloys to change temperature when they are subjected to a variation of magnetic fields.

“Green” technology, soundproof and energy effectiveness higher, the usual machines of refrigeration, could be thus completely substituted for the profit of new magnetic systems of refrigeration.

This memory is related to the study of this new emergent technology, its principle, composition and operating mode.

Introduction Générale

Introduction Générale

Le froid occupe une place très importante dans notre vie quotidienne. Il est utilisé dans de nombreuses applications telles que la climatisation automobile ou de bâtiment, la réfrigération industrielle ou domestique, la conservation agroalimentaire ou médicale, etc.

Sa production s'appuie aujourd'hui essentiellement sur des techniques classiques de compression et de détente de gaz comme les chlorofluorocarbones (CFC), les hydrofluorocarbures (HFC) et les hydro chlorofluorocarbones (HCFC). Ces derniers, sont malheureusement, des gaz à effet de serre, qui contribuent au réchauffement climatique. Des travaux sont menés aujourd'hui pour pallier ce problème en suivant deux voies parallèles : la première, on cherche à maintenir la technologie conventionnelle et à trouver des nouveaux fluides frigorigènes moins polluants comme le gaz carbonique, le propane, le butane, etc...

La deuxième consiste à réaliser une rupture technologique et à trouver des nouveaux moyens permettant de réaliser des systèmes à haute efficacité énergétique tout en ayant un impact environnemental faible. C'est le cas de la réfrigération magnétique autour de la température ambiante qui fait l'objet de cette étude.

La réfrigération magnétique est basée sur l'effet magnétocalorique (EMC) ; une propriété intrinsèque de certains matériaux magnétiques qui se traduit par un changement de leur état thermique (chaud / froid) lors de la variation de leur état magnétique (aimanté / désaimanté) induite par un champ magnétique extérieur. Ce dernier pouvant être produit par des électroaimants, des supraconducteurs ou des aimants permanent.

Cette réfrigération est donc une technologie plus écologique que la réfrigération Conventionnelle qui ne devrait avoir aucun impact dangereux sur l'environnement car elle ne met pas en œuvre des gaz à effet de serre mais uniquement des matériaux magnétiques et des fluides comme l'eau ou l'air.

Elle présente également un autre avantage majeur qui est la grande efficacité thermodynamique en effet avec l'EMC, les efficacités peuvent atteindre 60% voire plus, de l'efficacité limite de Carnot alors qu'elles ne dépassent pas 40% dans les meilleurs systèmes thermodynamiques conventionnels. Le coefficient de performance traduisant le rendement énergétique (Puissance froide / Puissance

fournie) est théoriquement de 10 alors qu'il vaut 5 et 0.5 respectivement pour un cycle thermodynamique classique et une cellule à effet Peltier.

D'autres avantages peuvent être également mentionnés comme la possibilité de réaliser des systèmes compacts, le matériau étant solide et non gazeux, l'absence de bruit et de vibration grâce à l'absence de compresseur et un réglage aisé de la puissance ou des températures des sources froide et chaude, Cependant, cette technologie émergente est dans une phase de maturation et ne peut pas être encore compétitive par rapport aux techniques conventionnelles de production du froid .

De nombreux travaux sont aujourd'hui menés de par le monde sur les matériaux et les systèmes pour faire avancer la connaissance scientifique dans ce domaine et maîtriser toute la chaîne du matériau à l'application en passant par la caractérisation, l'analyse du cycle thermique et de la source de champ magnétique, la modélisation multi physique du système et de champ magnétique et son optimisation.

Trouver les meilleurs matériaux, les mettre en œuvre de manière simple et peu onéreuse, réaliser des prototypes de réfrigération compacts et à haut rendement énergétique.

Le travail de thèse s'oriente vers l'étude thermique et fluide des systèmes de réfrigération magnétique.

Ce manuscrit se décompose en quatre chapitres : le 1^{er} chapitre est consacré à la présentation générale de la réfrigération magnétique, principe, revue sur les travaux antérieurs, approche thermodynamique et les matériaux magnétocaloriques.

Les systèmes utilisés dans la réfrigération magnétique (composition, fonctionnement et cycles) seront illustrés dans le 2^{ème} chapitre.

Dans le 3^{ème} chapitre nous allons voir le Cycle à régénération active AMR et son fonctionnement et modélisation.

le 4^{ème} chapitre est consacré à l'étude des sources de champ magnétique. Le chapitre dresse une revue des sources de champ utilisées dans des systèmes de réfrigération magnétique. le 5^{ème} Chapitre sera consacré aux résultats et interprétations.

***Chapitre I : La réfrigération magnétique : l'effet
Magnétocalorique et matériaux***

I.1 Introduction :

La réfrigération magnétique est une technologie de rupture pour produire du froid basée sur l'effet Magnétocalorique. L'avantage principal de la réfrigération magnétique est sa grande efficacité Thermodynamique, liée au fait que le procédé d'aimantation/désaimantation est très réversible, Contrairement à la compression/détente d'un gaz dans les systèmes de réfrigération conventionnels. Par ailleurs, les systèmes de réfrigération magnétique ont de nombreux avantages par rapport aux Réfrigérateurs à compression de gaz :

- un poids et un encombrement plus faible, car la densité de chaleur absorbée par les matériaux Magnétocaloriques, qui sont des solides, est beaucoup plus élevée que la densité de chaleur absorbée par les fluides frigorigènes (d'un facteur 100 environ).
- du bruit et des vibrations atténués grâce à l'absence de compresseur.
- un impact environnemental réduit (pas de gaz à effet de serre).
- une grande fiabilité et une longue durée de vie car les Fréquences de fonctionnement sont basses et il y a peu de pièces mobiles.

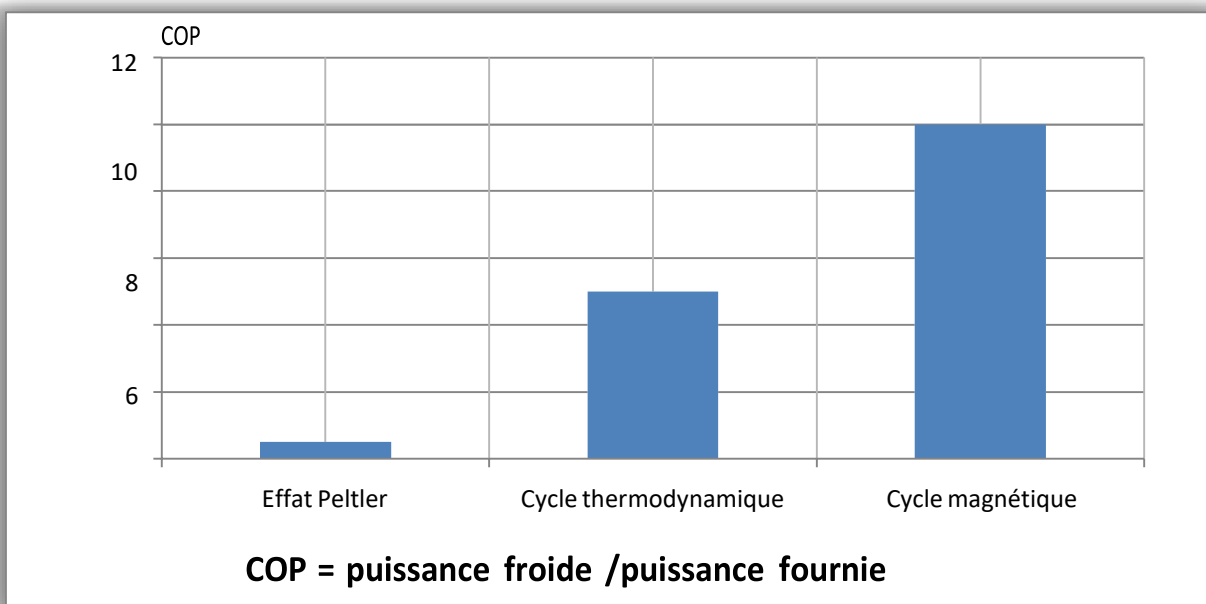


Figure I. 1: Comparaison des performances de différentes technologies de réfrigération. [16]

I.2 Historique

Si l'effet magnétocalorique (EMC) est connu depuis plus d'un siècle, son application à la production du froid autour de la température ambiante ne date que de deux décennies. En effet, ce phénomène a été découvert pour la première fois par Warburg en 1881. Edison 1887 et Tesla en

1889 ont présenté chacun un générateur et un moteur magnétothermique utilisant des matériaux dont l'aimantation dépend fortement de la température.

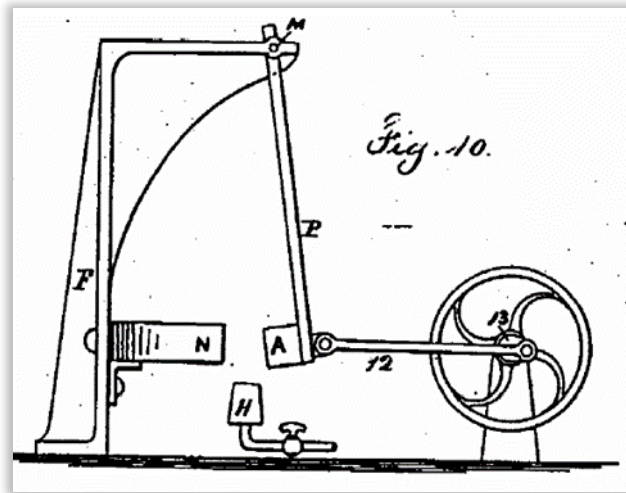


Figure I. 2: Moteur thermomagnétique de Nicole Tesla

En 1905, au cours de ses travaux sur la théorie cinétique du magnétisme, Paul Langevin a démontré pour la première fois que la variation de l'aimantation d'une substance magnétique avait généralement comme conséquence un changement réversible de sa température.

L'interprétation théorique du phénomène a été avancée en 1918 par Auguste Piccard et son professeur de thèse Pierre Weiss. Ils observèrent un effet réversible d'échauffement et de refroidissement dans le nickel près de sa température de Curie ($T_C = 358^\circ\text{C}$) provoqué respectivement par l'application ou la suppression du champ magnétique, et lui ont donné le nom de l'effet magnéto-calorique.

Peter Debye 1926 démontre la possibilité d'atteindre des températures inférieures à 1 K par un sel paramagnétique, cette application de l'effet magnéto-calorique est appelée désaimantation adiabatique. Giauque et MacDougall en 1933 ont réussi la première désaimantation adiabatique et obtiennent la température de 0.5 K avec un champ de 0.8 Tesla, en utilisant du sulfate de gadolinium. Leurs travaux seront nobélisés en 1949. Depuis, une course pour atteindre les très basses températures a été lancée.

Ce procédé s'est imposé dans le monde de la cryogénie. En effet, compte tenu de l'agitation thermique des atomes et de la capacité calorifique, le maximum de l'effet magnéto-calorique des sels paramagnétiques est obtenu lorsque leur température tend vers zéro. D'où l'utilisation des sels

paramagnétiques uniquement dans la gamme de très basses températures (< 1 K). Les matériaux les plus utilisés sont le sulfate de gadolinium, le fluorure de cérium, le grenat de gadolinium et de galium, GGG ($Gd_3Ga_5O_{12}$) et le grenat de dysprosium et galium ($Dy_3Ga_5O_{12}$).

En 1976, Brown [5] fut le premier à proposer une pompe à chaleur magnétique fonctionnant près de la température ambiante. Ce dispositif utilise du gadolinium comme matériau magnétocalorique. Grâce à un cycle à régénération externe (passif) de type Ericsson, sous un champ magnétique de 7 Tesla, il réalise des écarts de température avoisinant les 50° . Depuis, la réfrigération magnétique est présentée comme une technique prometteuse, qui pourrait concurrencer les méthodes conventionnelles. Les enjeux industriels et le contexte de la conjoncture écologique ont accentué les recherches sur la réfrigération magnétique. On citera en particulier les travaux liés directement aux applications et aux systèmes : l'équipe de Barclay de l'université de Victoria (Canada) qui travaille sur la possibilité de liquéfaction du gaz naturel par le procédé magnétique (d'ailleurs, on lui doit l'introduction du principe de cycle magnétique actif à régénération) ; les travaux du IRH (Institut de Recherche sur l'Hydrogène) de l'université de Trois Rivières (Québec) dirigés par les professeurs Bose et Chahine sur les matériaux magnétocaloriques adaptés à la liquéfaction de l'hydrogène. Aussi, soulignons les travaux de Gschneidner, Pescharsky (Ames Laboratory – Iowa) et Zimm (Astronautics Technology Center - Madison) [34]. Ils ont réalisé un dispositif expérimental de réfrigération magnétique opérant à la température ambiante, qui décrit les principales données utiles permettant d'évaluer les performances de la réfrigération magnétique.

I.3 L'effet magnétocalorique EMC

I.3.1 Définition

L'effet magnétocalorique est une propriété intrinsèque des matériaux paramagnétique ou ferromagnétique. Cette propriété se traduit par un échauffement ou un refroidissement réversible [10] de la substance sous l'action ou suppression d'un champ magnétique. En effet, l'application d'un champ magnétique va aligner les moments magnétiques et si ce processus est mené de façon adiabatique, c'est à dire sans échange de chaleur avec l'extérieur, l'entropie totale doit rester constante. La mise en ordre des moments magnétiques sera compensée par l'apparition d'un désordre dans les arrangements atomiques qui se traduira par une augmentation de la température : c'est l'échauffement par aimantation adiabatique. Inversement, la suppression du champ favorise le désordre des moments magnétiques au détriment des arrangements atomiques qui se traduira par

une diminution de la température de la substance : c'est le refroidissement par désaimantation adiabatique. Par définition l'effet magnéto-calorique est l'écart de température adiabatique ΔT_{ad} associé à la variation de champ appliqué au matériau ($\Delta H = H_{max} - H_{min}$).

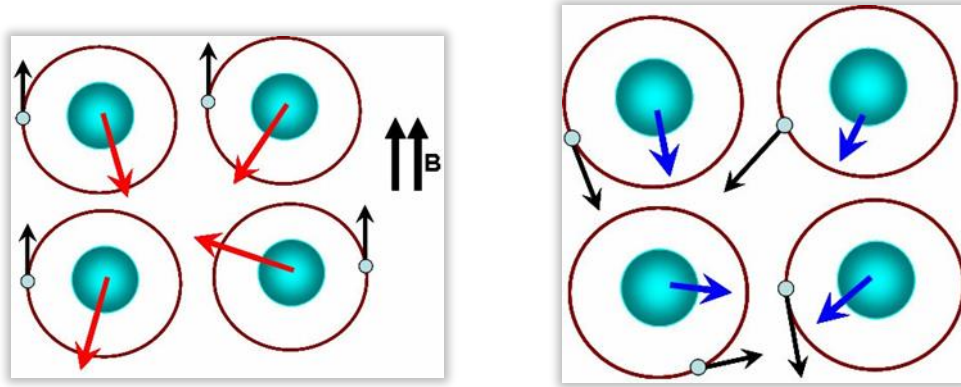


Figure I. 3: Schématisation du couplage entre l'entropie magnétique et l'entropie du réseau

Au voisinage de la température de transition les variations de l'aimantation sont importantes et se traduisent par des variations importantes de l'énergie interne du réseau cristallin, entraînant une augmentation de la variation d'entropie magnétique (Fig. I.3). D'où l'intérêt de travailler autour de la région de transition.

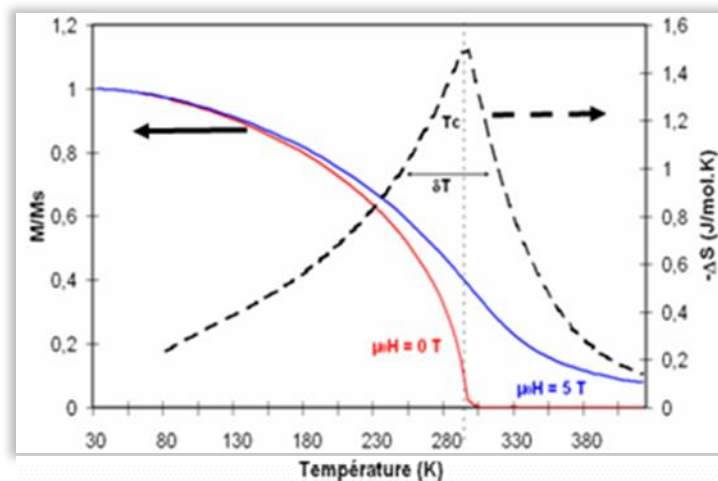


Figure I.4 : Evolution en fonction de la température de l'aimantation et de la variation d'entropie magnétique du Gd de sa température de curie T_c

I.3.2 PRINCIPE DE L'EMC

Le principe de la réfrigération magnétique est relativement proche de celui du cycle compression /détente. Ils 'agit donc d'aimanter et de désaimanter un matériau à effet magnétocalorique. Aimanté, le matériau s'échauffe, désaimanté ; il se refroidit

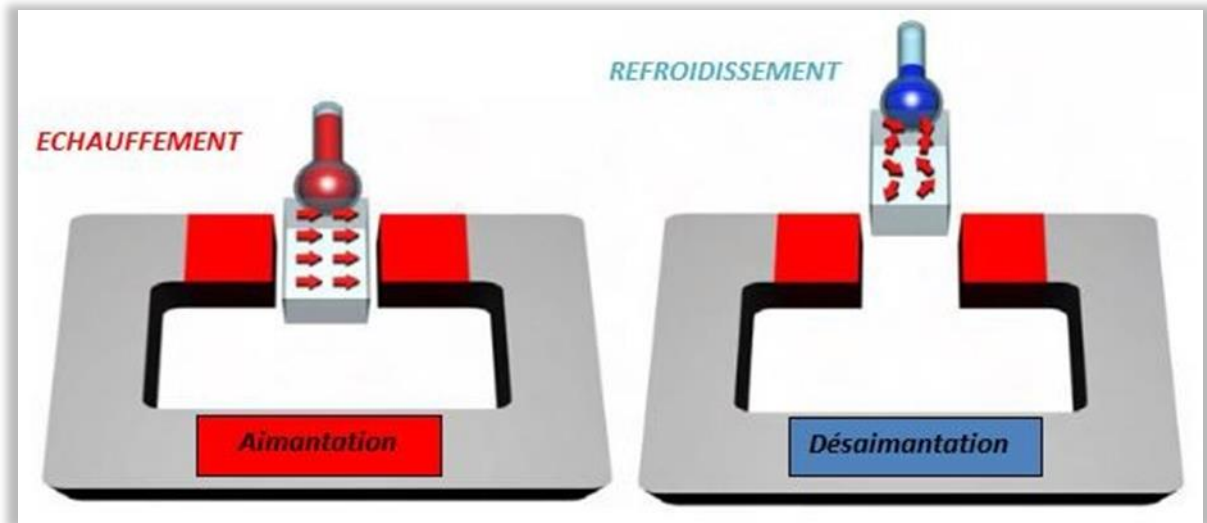


Figure I.5 : Effet magnétocalorique [13]

Les flèches dans le matériau symbolisent l'orientation des moments magnétiques

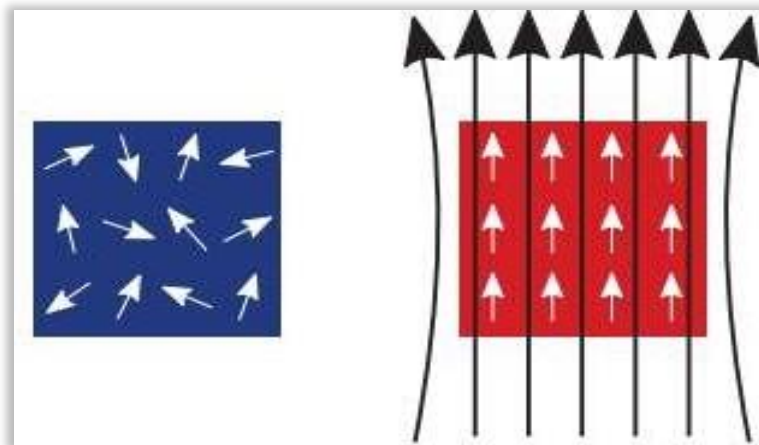


Figure I.6 : Schématisation de l'effet magnétocalorique

A 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.

Basés sur ce principe, les réfrigérateurs magnétiques présentent tous les atouts pour faire face à la crise environnementale, efficacité importante, compact et non polluant. Cette technologie enveloppe de nombreux domaines de compétences, comme le magnétisme, les sciences du matériau, la thermique, la mécanique des fluides ou encore la mécanique. L'interdépendance de tous ces domaines physiques en font une technologie difficile à mettre en œuvre et qui en est encore au stade des premiers prototypes.

Habituellement un réfrigérateur magnétique est constitué d'un corps solide d'un matériau magnétocalorique, qui est mis en mouvement vers et en provenance d'un champ magnétique.

Le transfert de chaleur au réfrigérant métallique est effectué par un échangeur de chaleur dont le fluide du côté secondaire est généralement de l'air ou de l'eau. Les champs magnétiques sont générés par des aimants qui peuvent également être permanents.

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

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

Les aimants choisis peuvent être de différents types, des aimants supraconducteurs atteignent de très hauts champs magnétiques, conduisant à un effet magnétocalorique très intense, toutefois, leurs coûts prohibent une application à la technologie de réfrigération usuelle.

L'utilisation d'électroaimants produisant de la chaleur, cette dernière doit être évacuée, dans le cas d'un réfrigérateur, cette charge thermique conduit à une baisse d'efficacité. De plus, les électroaimants ne sont pas capables de produire d'intenses champs magnétiques, on peut, ainsi, prédire que les futurs réfrigérateurs magnétiques produits seront équipés d'aimants permanents.

Lorsqu'un échantillon de matériau magnétocalorique est introduit dans un champ magnétique, il s'échauffe de façon similaire à un gaz comprimé d'un système conventionnel. La chaleur est, ensuite, évacuée du matériau et le champ magnétique à nouveau réduit conduisant au refroidissement de

l'alliage magnéto-calorique. L'échantillon se comporte alors en source froide pour un consommateur, par exemple : une gondole froide de supermarché, un système de conditionnement d'air de bâtiment, de voiture, etc.

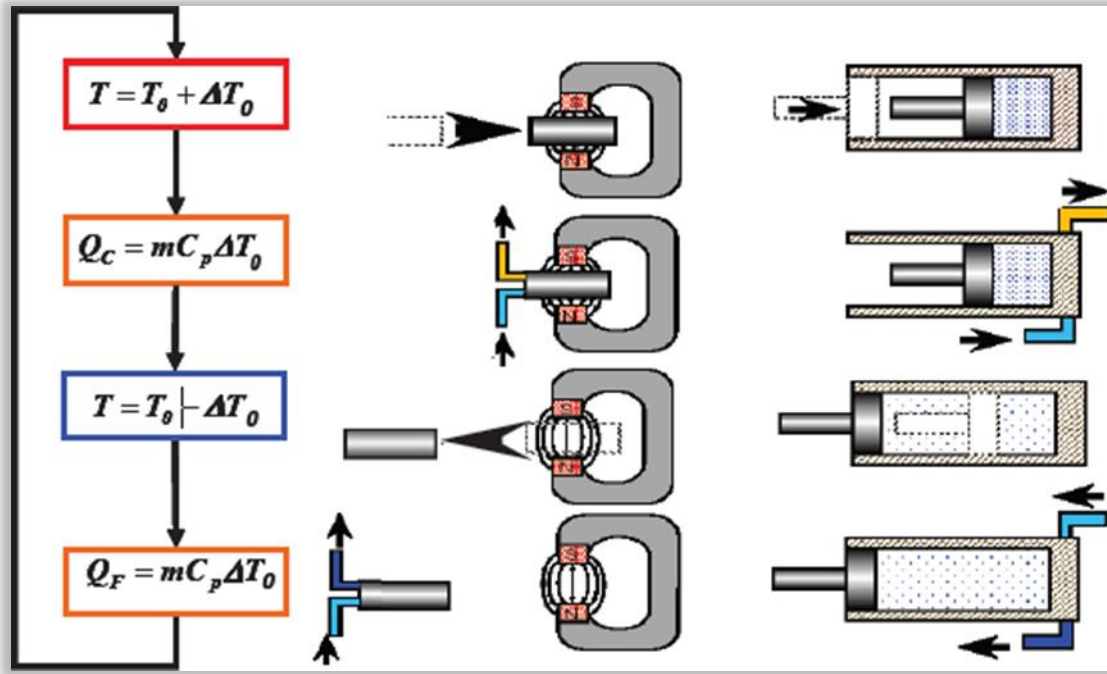


Figure I.7 : Equivalence de la RM avec la réfrigération conventionnelle.[11]

Le cycle de base de réfrigération magnétique peut alors être expliqué par analogie avec le cycle de réfrigération par compression de gaz comme illustré à la figure II.4. La magnétisation, correspondant à la compression du gaz, entraîne l'augmentation de température du matériau magnétique par l'effet magnéto-calorique. Ensuite, le matériau magnétique étant toujours soumis au champ magnétique, un rejet de chaleur est effectué permettant au matériau de revenir à son état initial de température. À l'étape suivante, la détente du gaz est associée à la démagnétisation adiabatique pendant laquelle la température du matériau magnétique atteint une température plus basse que sa température initiale grâce à l'effet magnéto-calorique. Finalement, le cycle est complété lorsque le matériau magnétique absorbe la chaleur d'une source extérieure pour revenir à son état initial de température. À ce moment, la température de cette source extérieure est plus basse qu'elle l'était initialement, d'où l'effet de réfrigération.

I.4 Revue sur les démonstrateurs de la RM

Le premier réfrigérateur magnétique fonctionnant autour de la température ambiante a été construit par G.V Brown en 1976, ce qui poussa de nombreux chercheurs de par le monde à attacher de l'importance à cette technique innovatrice entraînant un développement consécutif de quelques systèmes intéressants. [8], [13], [14] ...

I.4.1 Prototype magnétique de Brown (1976)

Brown (Lewis Research Center) a conçu et réalisé le premier prototype de réfrigération magnétique à température ambiante, utilisant un régénérateur passif et permettant d'obtenir des écarts de température bien plus élevés que l'EMC [14]. Il s'agit d'un prototype au sein duquel un bloc de gadolinium - percé pour permettre le passage du fluide- est déplacé à travers une colonne de fluide, qui fait office de régénérateur thermique. Des échangeurs se trouvent à chaque extrémité de la colonne pour échanger de la chaleur avec les sources chaude et froide.

Le prototype est un système tournant et emploie un cycle d'Ericsson [30]. Le champ magnétique est produit par un électroaimant (refroidi par eau) avec un champ maximal de 7 Tesla.

Le matériau (Gd) est en forme de plaques de 1 mm d'épaisseur, séparées par des fils d'acier inoxydable avec des intervalles de 1 mm pour permettre au fluide régénérateur de circuler verticalement. [13].

Lors des premiers essais, Brown réussit à obtenir un écart de température de 47K ($T_f = 272\text{K}$ et $T_c = 319\text{K}$), cependant, la puissance froide obtenue n'était pas importante, Ceci est dû au large ΔT obtenu.

De plus, le cycle ne pouvant fonctionner qu'avec des fréquences faibles, le gradient de température est réduit car les deux côtés chaud et froid ont le temps d'échanger entre eux. Puis par la suite il obtient 80K avec le même dispositif en utilisant un cycle magnétique régénératif de Stirling. [6].

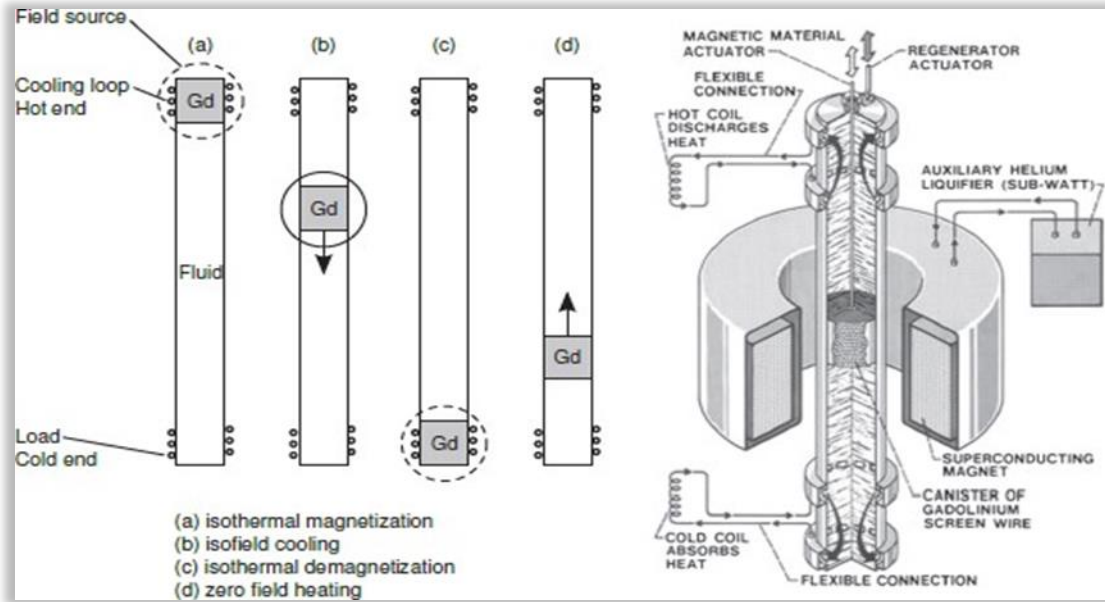


Figure 1.8 : Schéma du prototype de Brown.[14]

I.4.2 Prototype de Steyert (1978-1983) :

Steyert est à l'origine du concept de régénération active. [14]. Il a conçu un prototype de réfrigération magnétique où c'est le matériau magnéto-calorique lui-même qui joue le rôle de régénérateur. [23]. C'est un système avec un réfrigérant tournant, mettant en œuvre un cycle de Brayton. [13]. Le matériau magnéto-calorique est un disque poreux de gadolinium qui passe alternativement d'une zone où le champ magnétique est élevé à une zone où il est faible. [8]

Le fluide d'échange entre dans la roue (régénérateur) à la température T_c et ressort à la température T_f après avoir cédé sa chaleur au réfrigérant situé dans la zone de faible champ. Après avoir reçu la chaleur de la charge à refroidir Q_f , le fluide entre une nouvelle fois dans la roue à une température $T_f + \Delta$, due à l'échange thermique avec la roue qui, à ce moment-là, est à la température de $T_c + \Delta$. La température du fluide augmente et passe à $T_c + \Delta$. Enfin, le fluide cède la chaleur Q_c au réservoir de la source chaude complétant ainsi un cycle.[13].

La Figure II.6 décrit schématiquement le système magnétique de Steyert.

Ce cycle à régénération a, par la suite, été développé par Barclay et Steyert pour aboutir aux cycles actuellement utilisés. [8].

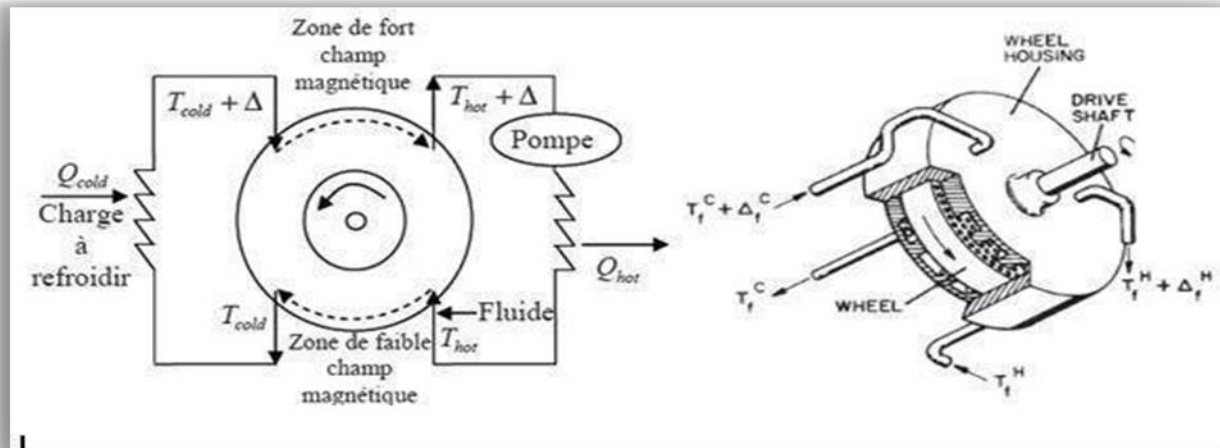


Figure I.9 : Représentation schématique du prototype de Steyert.[14]

I.4.3 Prototype de Kirol et Dacus (1988) :

Kirol et Dacus ont conçu et réalisé un système de réfrigération magnétique rotatif à récupération. [15]. Le principe de fonctionnement est similaire à celui du prototype de Barclay et Steyert sauf que celui-ci est basé sur un cycle d'Ericsson.

Le prototype est constitué d'un rotor formé par un empilement de disques de gadolinium et de quatre entrefers. [14].

Le champ magnétique est produit par des aimants permanents NdFeB et atteint une valeur maximale de 0.9 Tesla dans l'entrefer. Au cours d'un tour du rotor, les quatre cycles thermodynamiques sont opérés et un ΔT de 11 K est obtenu. [13].

Dans un tel cycle, le fluide dit de « récupération » est en contact thermique avec le matériau réfrigérant uniquement en dehors des phases d'aimantation et désaimantation, contrairement à la régénération. Ces deux chercheurs pensaient que l'élévation de température dans le fluide régénérant (d'un cycle à régénération) diminuait l'efficacité de ce dernier et qu'en cela la récupération était supérieure à la régénération. Cet appareil s'est, toutefois, montré moins efficace que la technologie régénérative développée par Barclay et Steyert. [8].

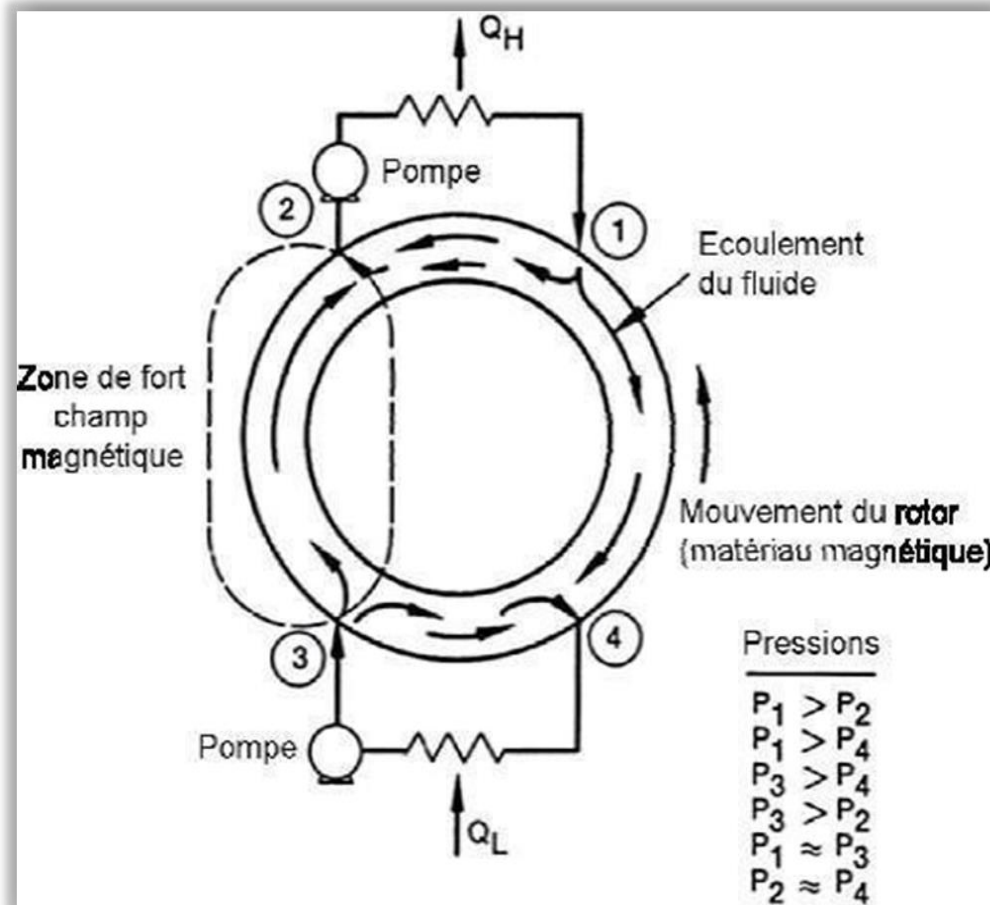


Figure I.10 : Schéma du prototype de Kirol et Dacus.[8]

I.4.4 Prototype de Green et al. (1990) :

La marine américaine et le David Taylor Research Center se sont intéressés au potentiel de la réfrigération magnétique et des recherches sur le sujet commencèrent dans les années 1990. [14].

Green et al. Ont conçu et réalisé un prototype utilisant un régénérateur multicouche. La première couche contient du Tb dont la température de Curie est $T_C = 235\text{K}$, la seconde couche un alliage GdTb ($T_C = 264\text{K}$) et la dernière du Gd ($T_C = 293\text{K}$). La source de champ magnétique est une bobine supraconductrice qui génère un champ de 7 T. Le régénérateur est constitué de plaques en spirales. En plus du régénérateur magnétique actif, le système comprend un régénérateur passif en cuivre côté source froide.

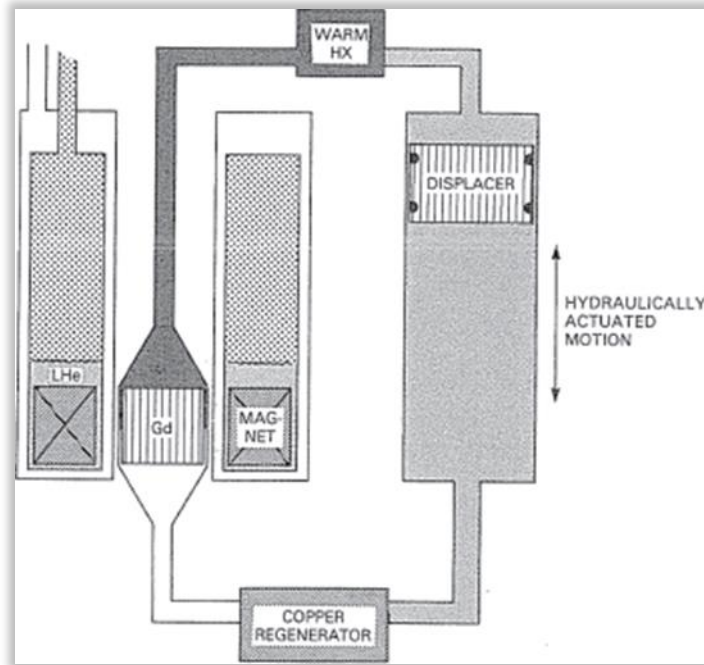


Figure I.11 : Schéma du prototype de Green et al.[14]

I.4.5 Prototype de Zimm et al. (1998) :

Une étape importante a été franchie en 1998 lorsque l'entreprise Astronautics s'est associée à l'Ames Laboratory pour réaliser un prototype de réfrigération magnétique destiné à démontrer la faisabilité et la compétitivité de la réfrigération magnétique à température ambiante [35]. C'est le premier dispositif qui a fourni une puissance suffisante pour des applications industrielles, grâce à l'utilisation d'une grande quantité de matériau magnéto-calorique (3 kg de Gd) et à un champ magnétique élevé (5 Tesla). Par ailleurs, le COP du dispositif varie entre 2 et 8, sans tenir compte de la puissance consommée pour refroidir la bobine supraconductrice, ce qui est une très bonne performance.

Enfin, ce prototype a fonctionné pendant plus de 5000 h sur une période de 18 mois sans rencontrer de problème majeur, ce qui a conforté l'idée d'utiliser cette technologie pour des applications industrielles.

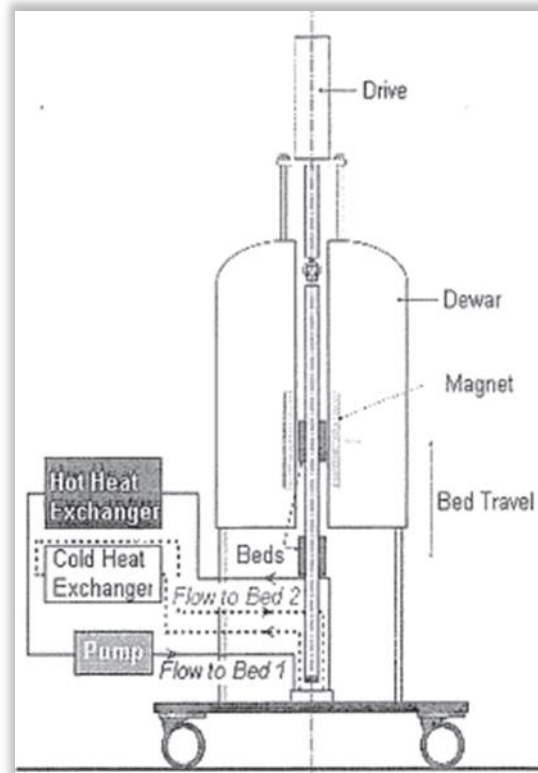


Figure I.12 : Schéma du premier prototype de Zimm et al.[14]

I.4.6 Prototype de Hirano et al. (Système Japonais) (2002)

L'entreprise Chubu Electric (JAPON) en partenariat avec Toshiba a réalisé en 2002 un prototype de réfrigération magnétique linéaire. La source de champ est une bobine supraconductrice qui génère un champ de 4 Tesla.

Le dispositif a de bonnes performances puisque son COP est de 5,6 sans tenir compte de la puissance consommée pour refroidir la bobine supraconductrice et pour alimenter la pompe.

Un des points faibles de ce prototype est que le régénérateur est soumis à des forces considérables lorsqu'il est déplacé dans le champ magnétique (jusqu'à 1600N).

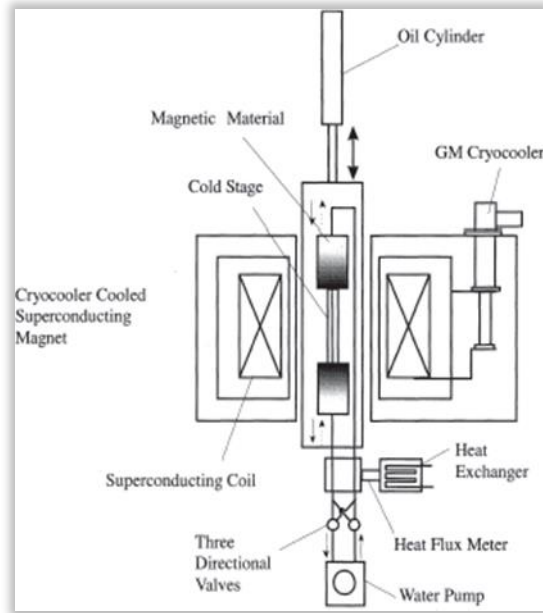


Figure I.13 : Schéma du prototype de Hirano et al.[14]

I.4.7 Prototype de Rowe et al. (2002-2006)

Rowe (University of Victoria) et Barclay (Cryofuel Systems) ont conçu et réalisé un prototype de réfrigération magnétique en 2002. Par la suite, Richard (Université du Québec à Trois Rivières) et al. y ont apporté des améliorations et testé différents matériaux. Seule la configuration la plus récente est décrite ici. La particularité de ce prototype est son mode d'entraînement. Le prototype est entraîné par un moteur rotatif, relié à un système bielle manivelle pour convertir la rotation du moteur en un mouvement linéaire du régénérateur. Le fluide caloporteur - de l'hélium gazeux - est soumis à un mouvement oscillant dans le régénérateur pour réaliser un cycle AMR. Le prototype utilise un régénérateur multicouche composé de trois matériaux : Gd (TC = 294 K), Gd_{0,74}Tb_{0,26} (TC = 278 K) et Gd_{0,85}Er_{0,15} (TC = 265 K).

Cela lui permet d'atteindre un écart de température important (50K avec un champ de 2 Tesla).

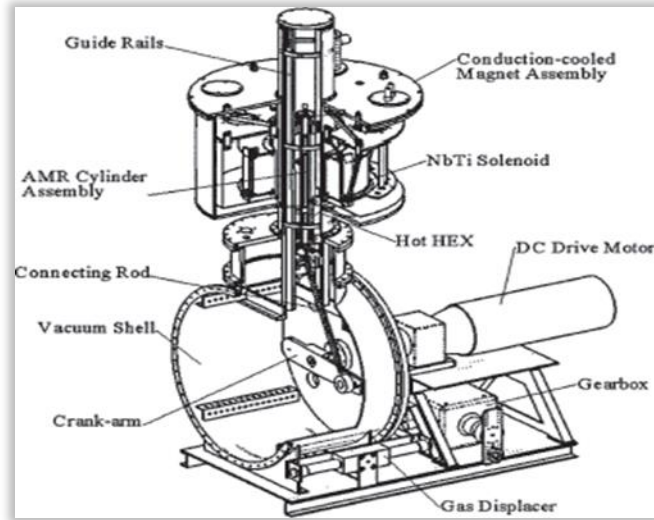


Figure I.14 : Schéma du prototype de Rowe et al.[14]

I.4.8 Dispositif réalisé en Espagne

Le dispositif représenté en Figure II.12 a été développé par l'équipe de l'Université Polytechnique de Catalogne à Barcelone [11]. Le matériau magnéto-calorique est un ruban de gadolinium (Gd 99.9%) fixé sur un disque en plastique et plongé dans un fluide caloporteur (huile d'olive). Le cycle magnétique d'aimantation / désaimantation est assuré par la rotation du disque en plastique et son passage devant un aimant. L'écart de température obtenu est respectivement de 1.6 et 5 K pour un champ de 0.3 Tesla et 0.95 Tesla. Ceci correspond à 2.5 fois l'EMC du Gd. [13]

Même si les performances obtenues sont faibles, ce dispositif est le premier qui a montré la faisabilité de la réfrigération magnétique avec des champs accessibles par des aimants permanents.

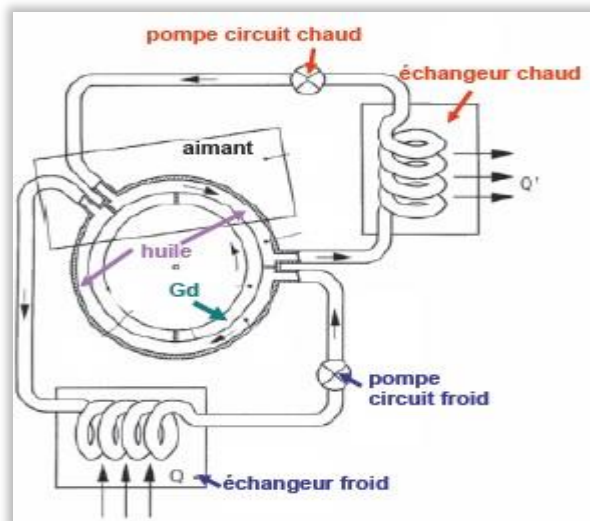


Figure I.15 : Dispositif magnétique réalisé en Espagne [11]

I.4.9 Prototype de Okamura et al. (Système Japonais) (2006-2007)

L'entreprise Chubu Electric a réalisé un second prototype de réfrigération magnétique en partenariat avec le Tokyo Institute of Technology en 2006. Okamura et al ont construit un système de réfrigération magnétique, comme le montre la Figure II.13 :

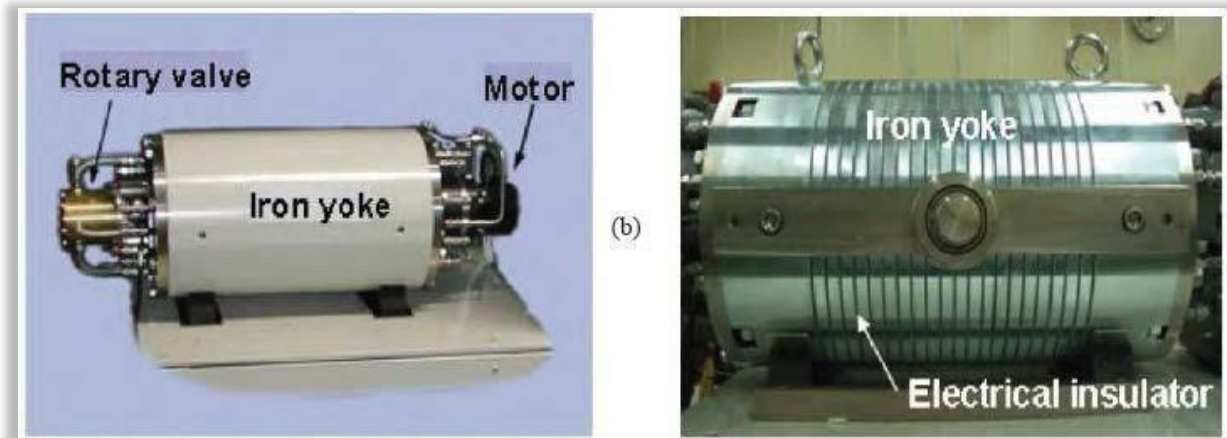


Figure I.16 : Le dispositif japonais initial (gauche) et amélioré (droite).[11]

Le champ magnétique est produit par des aimants permanents en rotation, produisant un champ maximal de 0.77 Tesla, le lit régénérateur est composé de 4 blocs.

Chaque bloc est un alliage différent de GdDy (en forme de sphère) pour élargir la plage de variation de la température. La circulation du fluide est assurée par une pompe et une valve rotative. La puissance obtenue est de 60 W. [13].

Okamura et al. Ont apporté des améliorations significatives l'année suivante [19]. Le circuit magnétique amélioré permet de créer un champ de 1,1 Tesla grâce à des aimants permanents et des concentrateurs de flux. Les améliorations ont permis de faire passer la puissance maximale produite par le prototype à 540 W. Le principal défaut de ce dispositif est la rotation discontinue du rotor, défavorable à la conservation de l'énergie. Le COP de ce prototype est de 1,8 et peut sembler faible en comparaison aux autres prototypes, mais pour son calcul Okamura et al. tiennent compte de la puissance réellement consommée par le moteur et la pompe.

I.4.10 Dispositif du G2Elab (2008)

Le dispositif réalisé au G2Elab (Laboratoire de Génie Electrique de Grenoble) est de type alternatif, comme le montre la Figure II.14.

Le champ magnétique est produit par un aimant permanent (cylindre d'Halbach) créant un champ magnétique de 0.8 Tesla.

Le fluide utilisé est l'eau. Sa circulation est assurée par une pompe péristaltique fonctionnant dans les deux sens [11]. Le vérin pneumatique produit le mouvement du bloc réfrigérant et assure les phases aimantation / désaimantation.

L'automate programmé permet de gérer le vérin et la circulation du fluide pour effectuer les 4 phases de ce cycle. Le système est fermé et il n'y a pas d'échange avec l'extérieur.

Il a été conçu pour étudier le cycle AMR et l'exploiter réellement en utilisant différents matériaux [8].

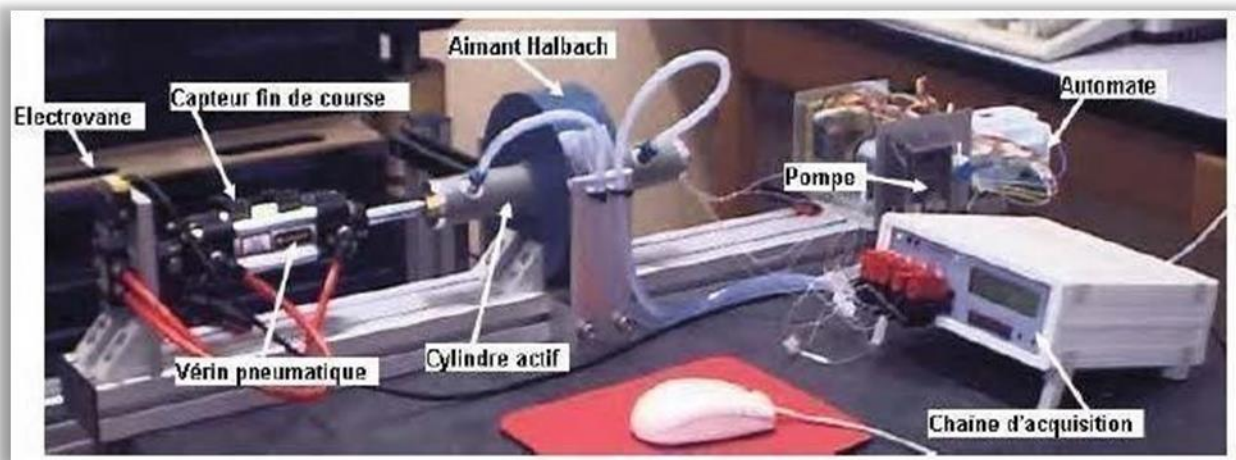


Figure I.17 : Le dispositif du G2Elab.[11]

I.4.11 Prototype de Zimm et al. (2007-2010)

L'ACM (Astronautics Corporation in Madison) a conçu un système d'AMR composé d'une roue avec 6 lits régénérateurs, eux-mêmes composés de gadolinium en poudre [35].

Cette roue est en rotation à travers une zone de fort champ magnétique de 1.5 Tesla. Les lits régénérateurs échangent avec le fluide dont la circulation est correctement réglée en fonction de la position relative de chaque lit par rapport au champ magnétique.

Pour des cycles de 0.16 à 2 Hz et des débits d'eau allant de 0.4 à 0.8 l/min, les écarts de température obtenus entre la source chaude et la source froide sont de 277 à 293K et les puissances froides de 50 à 100 W [13].

Ce prototype atteint des fréquences de fonctionnement élevées et produit des puissances et des écarts de température importants. Il confirme la faisabilité technique de la réfrigération magnétique à température ambiante pour des applications industrielles.

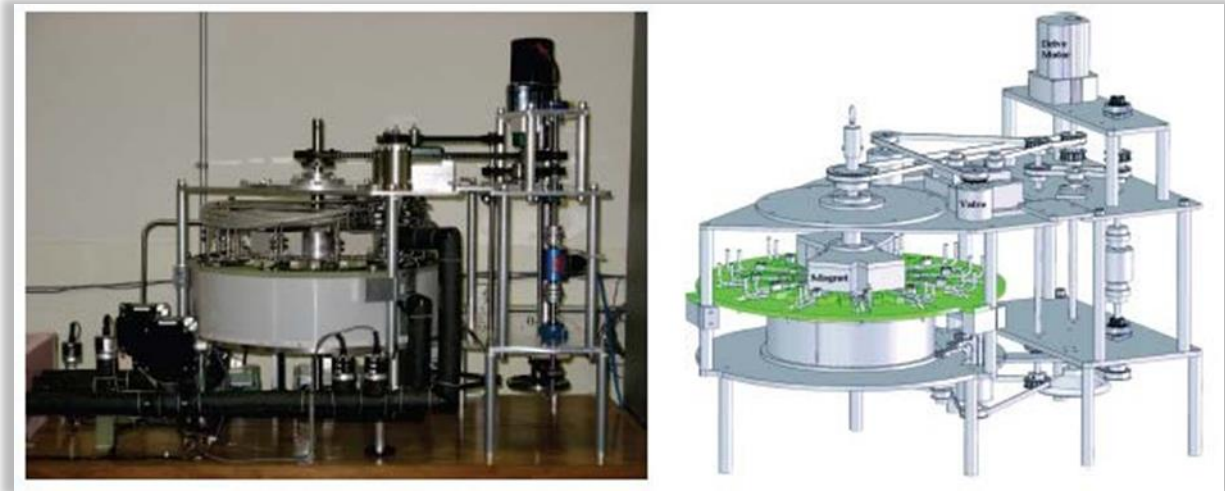


Figure I.18 : Photo et schéma du 3ème prototype de Zimm et al.[14]

I.4.12 Prototype de Balli et al. (2010)

Le prototype réalisé par Balli et al. (University of Applied Sciences of Western Switzerland) est un système linéaire composé de deux cylindres de Halbach.

Chaque cylindre de Halbach est associé à deux régénérateurs qui passent successivement dans l'entrefer. Cela permet une compensation partielle des forces subies par les régénérateurs lorsqu'ils se déplacent dans la zone à fort gradient de champ magnétique.



Figure I.19 : Photo de prototype de Ball et al.[14]

I.5 APPROCHE THERMODYNAMIQUE DEL'EMC

D'après la littérature l'EMC peut être résumé par l'absorption ou l'émission de chaleur sous l'effet d'un champ d'induction magnétique B, qui se traduit par le réchauffement ou le refroidissement du matériau (tous deux réversibles).

Comme L'EMC, ne dépend que de la température initiale du matériau T et du champ d'induction magnétique B, il peut aussi être interprété comme étant le changement isotherme de l'entropie ou le changement adiabatique de la température.

L'entropie spécifique S, qui est aussi fonction de la température T et de l'induction B dans un matériau magnétocalorique, est une combinaison de l'entropie magnétique s_m , de l'entropie du réseau s_r et de l'entropie des électrons de conduction s_e (supposée négligeable).

Elle est donnée par :

$$s(T, B) = s_m(T, B) + s_r(T) + s_e(T) \quad [11] \quad (I.1)$$

Sous l'action du champ magnétique, les moments magnétiques s'alignent et conduisent à la réduction de cette entropie magnétique. Si ce processus est adiabatique et réversible, l'entropie totale étant constante, la réduction de l'entropie magnétique est compensée par l'augmentation de l'entropie du réseau conduisant ainsi à l'augmentation de la température du matériau [26]. Cet effet est maximal autour de la température de transition de phase magnétique du matériau (température de Curie pour une transition ferromagnétique à paramagnétique).

L'approche thermodynamique selon la littérature [11], [13] [14], [17], [28]. est comme suit : La forme différentielle de l'entropie totale S peut être donnée par :

$$ds(T, B) = \left(\frac{\partial s}{\partial T}\right)_B dT + \left(\frac{\partial s}{\partial B}\right)_T dB \quad (I.2)$$

La capacité calorifique du matériau étant donnée par :

$$C_p = \left(\frac{\partial s}{\partial T}\right)_B T \quad (I.3)$$

Cela donne :

$$\left(\frac{\partial s}{\partial T}\right) = \frac{C_p}{T} \quad (I.4)$$

De (2) et (4) on peut écrire :

$$ds(T, B) = \frac{c_p}{T} dT + \left(\frac{\partial s}{\partial B}\right)_T dB \quad (\text{I.5})$$

Dans le cas d'un processus adiabatique (pas de variation d'entropie $\Delta S = 0$) on peut écrire l'équation :

$$dT = - \frac{T}{c_p} \left(\frac{\partial s}{\partial B}\right)_T dB \quad (\text{I.6})$$

En utilisant la relation de Maxwell donnée par [11] :

$$\left(\frac{\partial s}{\partial B}\right)_T = \left(\frac{\partial M}{\partial T}\right)_B \quad (\text{I.7})$$

Où : M est l'aimantation.

On peut écrire :

$$dT = - \frac{T}{c_p} \left(\frac{\partial M}{\partial B}\right)_T dB \quad (\text{I.8})$$

L'effet magnétocalorique peut s'exprimer alors comme ceci :

$$EMC = \Delta T_{ad} = \int_{Bi}^{Bf} - \frac{T}{c_p} \left(\frac{\partial M}{\partial T}\right)_B dB \quad (\text{I.9})$$

Où ΔT , représentant ΔT_{ad} (Figure II.4), désigne l'élévation de température adiabatique intrinsèque du matériau, lorsqu'il est soumis au champ. En utilisant l'équation (8) dans l'équation (9), on obtient la relation liant directement la variation d'entropie magnétique ΔS_m et la variation de température ΔT_{ad} :

$$\Delta T_{ad}(T, \Delta B) = - \int_{Bi}^{Bf} \frac{T}{c_p} \left(\frac{\partial M}{\partial T}\right)_B dB = - \frac{T \cdot \Delta S_m(T, \Delta B)}{c_p(T)} \quad (\text{I.10})$$

Dans le cas d'un processus isotherme la température ne change pas durant l'aimantation et on peut écrire :

$$ds(T, B) = \left(\frac{\partial s}{\partial B}\right)_T dB \quad (\text{I.11})$$

En utilisant la relation de Maxwell donnée par (II.7), la variation de l'entropie magnétique peut s'écrire alors :

$$\Delta s = \int_{Bi}^{Bf} \left(\frac{\partial M}{\partial T}\right)_B dB \quad (\text{I.12})$$

I.6 Les matériaux à effet magnétocalorique (MCM)

I.6.1 Présentation

Pour les applications de la réfrigération magnétique autour de la température ambiante, le matériau doit présenter un EMC géant autour de cette température [16], 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) [16]. 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'ancrer d'autres. Comme le matériau magnétocalorique est le noyau principal de la réfrigération magnétique, il doit disposer de certaines caractéristiques pour être intéressant [31],[25]:

- ✓ Une température de transition proche de la température ambiante.
- ✓ Un effet magnétocalorique le plus large possible sur une large plage température.
- ✓ Des hystérésis magnétique et thermique minimales permettant d'avoir de 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 commerciale.

Il existe de nombreux matériaux magnétocaloriques, que l'on classe en deux catégories : les matériaux du premier ordre qui présentent une aimantation qui évolue de façon brutale avec la température et les matériaux du second ordre pour lesquels la variation est plus douce. Les matériaux du premier ordre conduisent donc à des variations d'entropie importantes mais sur une faible plage de température.

I.6.2 Caractérisation des matériaux magnétocalorique

I.6.2.1 Mesures directes

C'est la mesure directe. Il s'agit de mesurer grâce à un capteur de température en contact direct avec l'échantillon, l'échauffement de ce dernier lorsqu'on le place dans un champ magnétique. ce principe ne permet que des mesures à température fixe et à des champs relativement faibles (de

l'ordre de 1 T). Pour pallier ces limitations et utiliser cette méthode pour caractériser de manière complète et précise l'EMC, des dispositifs plus sophistiqués ont été mis au point. Suivant le champ magnétique appliqué, on distingue deux techniques : les techniques pulsées utilisées essentiellement pour les champs intenses (30 T) et les techniques statiques. Dans ces systèmes, l'isolation thermique de l'échantillon a été améliorée pour assurer des conditions adiabatiques et des mesures différentielles de température utilisant des thermocouples de qualité ont été mises en œuvre pour augmenter la précision. De plus, des circuits électroniques sont été introduits pour compenser l'effet de la variation du champ magnétique sur la réponse des capteurs de température.

1.6.2.2 Mesures calorimétriques

Les différentes relations thermodynamiques exprimées précédemment offrent d'autres moyens de mesure de l'EMC. Les mesures de capacité thermique massique à Pression constante $C_p(T, B)$ (figure I.20).

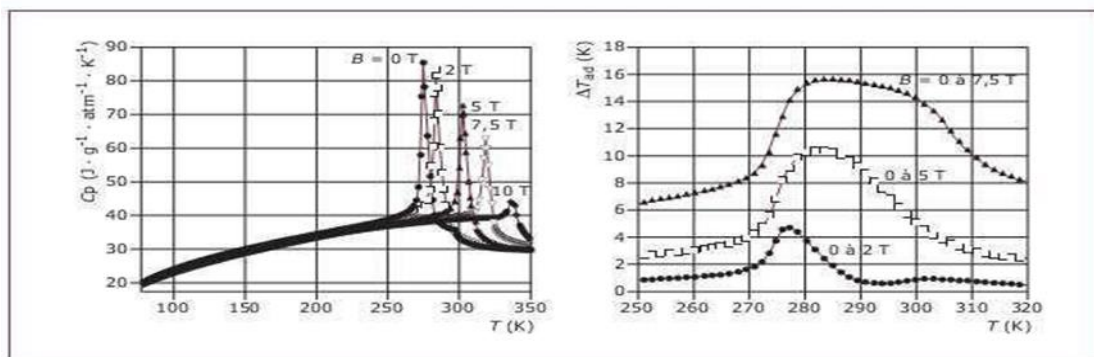


Figure I.20 : Capacité thermique massique mesurée et l'EMC déduit par l'alliage de gadolinium. [22]

Appelées encore mesures calorimétriques, nous Permettent de déduire l'entropie magnétique $S_m(T, B)$ et sa variation $\Delta S_m(T, \Delta B)$ ainsi que l'EMC Exprimé en variation adiabatique de température ΔT_{ad} . Cette méthode calorimétrique présente un avantage indéniable qui est la possibilité d'accéder Simultanément à toutes les propriétés magnétocaloriques intervenant dans la réfrigération Magnétique, à savoir la capacité thermique massique, l'entropie magnétique et l'EMC. Cependant, elle reste une méthode lourde à mettre en œuvre et n'apporte pas plus de précision que la méthode directe.

1.6.2.3 Mesures magnétiques

La variation de l'entropie magnétique est reliée à l'aimantation $M(T, B)$. C'est la méthode la plus utilisée, en particulier au voisinage de la température ambiante ; elle permet une évaluation rapide

des Performances magnétocaloriques des matériaux. L'étude sur la précision de la méthode réalisée par Schneider montre qu'elle est meilleure que la méthode calorimétrique dans la gamme des températures Proches de l'ambiante.

I.6.3 Principaux matériau magnétocalorique

Il existe un très grand nombre de matériaux magnétocaloriques qui ont été étudiés depuis la découverte de l'EMC géant.

La revue écrite par Gschneidner Jr. et Pecharsky recense près de 200 matériaux [22]. Nous nous limiterons ici à présenter les matériaux les plus prometteurs pour des applications à température ambiante.

On distingue six grandes familles de matériaux magnétocaloriques.[24] :

- Les métaux 3d et leurs alliages : Fe, Ni, Co, MnAs, MnP, MnFePAs, FeRh, MnCu, ...
- Les oxydes : MnFeCrO, GdFeO, GdGaO, HoAlO, LaCaMnO, ...
- Les composés intermétalliques : DyAl, GdRh, TmCu, ErNi, LaFeSi, HoCo, ...
- Les composés terres rares-métalloïdes : GdSb, PrCoSi, GdGeSi, ...
- Les terres rares et leurs alliages : Gd, Dy, TbY, ErPr, TbDy, ...
- Les amorphes : GdFe, GdNi, DyFe, FeZr, ...

On peut classer matériaux magnétocaloriques en deux catégories : les matériaux du premier ordre qui présentent une aimantation qui évolue de façon brutale avec la température et les matériaux du second ordre pour lesquels la variation est plus douce. Les matériaux du premier ordre conduisent donc à des variations d'entropie importantes mais sur une faible plage de température, comme illustré sur la(FigureI.21). a l'inverse, les matériaux du second ordre ont des variations d'entropie plus faibles mais sur une large plage de température.

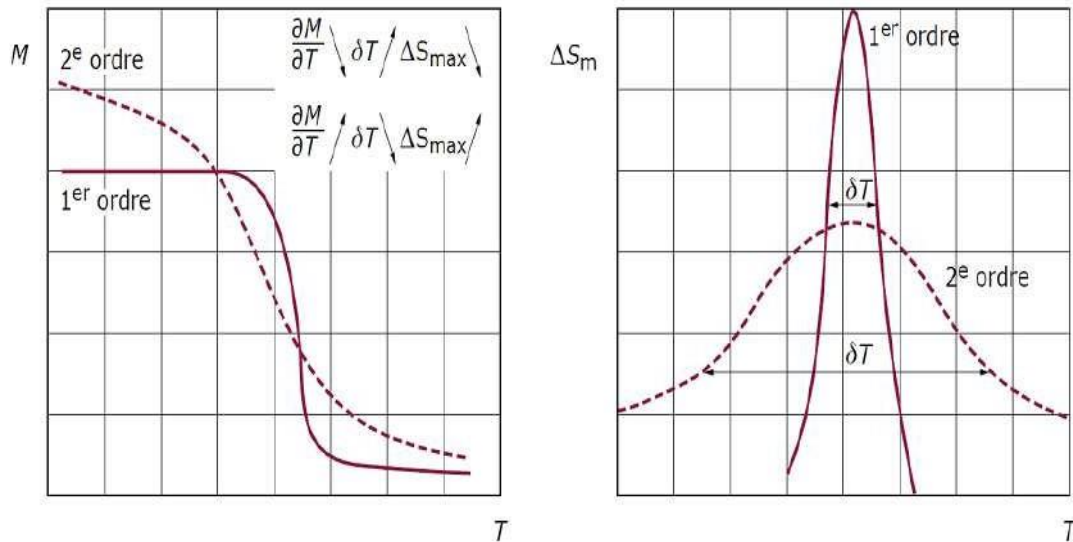


Figure 1.21 : Transition de phase et variation de l'entropie en fonction de type de matériau.[18]

Pour chaque famille de matériaux, il peut y avoir plusieurs stœchiométries différentes et plusieurs substitutions sont possibles.

Ces modifications chimiques ont comme intérêt l'augmentation ou la diminution de la température de transition pour l'approcher de l'ambiante et l'augmentation de l'effet magnéto-calorique [22]. Pour être intéressant un matériau magnéto-calorique doit posséder plusieurs caractéristiques. Tout d'abord le matériau doit présenter des propriétés magnéto-caloriques intéressantes :

- une température de Curie T_C proche de la température ambiante.
- une grande variation d'entropie massique Δs et de température ΔT_{ad} pour des variations de champ modestes.
- une large variation d'entropie et de température.
- Le matériau doit aussi avoir d'autres propriétés physiques intéressantes :
 - faibles hystérésis thermiques et magnétique.
 - résistivité électrique élevée (pour limiter les pertes joules).
 - bonne conductivité thermique (pour améliorer les transferts thermiques avec le fluide caloporteur) Par ailleurs, le matériau doit répondre aux contraintes de fabrication et de fonctionnement :
 - facilité d'élaboration (pureté du minéral).
 - facilité de mise en forme (malléable et ductile).
 - résistant (corrosion, oxydation, contraintes mécaniques).

- non toxique.

Enfin, le matériau doit présenter des caractéristiques technico-économiques intéressantes :

- abondance et faible coût.

En plus d'une comparaison relative des matériaux entre eux, il est intéressant de connaître la valeur des différentes propriétés des matériaux. En particulier le prix des matériaux permet de les comparer au coût des autres composants des systèmes de réfrigération magnétique [14]. Des valeurs recensées par Bruck sont données sur le tableau (I.2) :

Tableau I.1: Caractérisation de quelque matériaux à EMC géant autour la température ambiante.[2]

| Matière | T range (K) | $\Delta S_{max}(2T)JKg^{-1}K^{-1}$ | $\Delta T(2T)K$ | Tc(K) | Coût (€/Kg) | Densité 10^3kgm^{-3} |
|---------------|-------------|------------------------------------|------------------|-------|-------------|------------------------|
| Gd | 270-310 | 5 | 5.8 ^d | 393 | 20 | 7.9 |
| Gd5Ge2Si2 | 150-290 | 27 | 6.6 ^d | 272 | 60 | 7.5 |
| La (Fe, Si) H | 180-320 | 19 | 7 ^c | 300 | 8 | 7.1 |
| MnAs | 220-320 | 32 | 4.1 ^d | 287 | 10 | 6.8 |
| MnNiGa | 310-350 | 15 | 2 ^c | 317 | 10 | 8.2 |
| MNFe(P,As) | 150-450 | 32 | 6 ^d | 292 | 7 | 7.3 |

I.7 CONCLUSION

Ce chapitre a introduit des définitions et notions de base nécessaires à la compréhension de la réfrigération magnétique qui est une technologie reposant sur les propriétés intrinsèques de certains matériaux magnétocaloriques disposant de caractéristiques bien définies et que nous verrons par la suite du mémoire.

Nous avons expliqué le principe d'un tel système, on a vue également les principaux prototypes développés et -comme pour tout système frigorifique- on a détaillé les notions thermodynamiques le régissant.

Nous avons présenté par la suite les matériaux magnétiques, leur caractéristique et leurs différentes familles.

Chapitre II : Les systèmes de réfrigération magnétique

II.1 INTRODUCTION

La mise en œuvre de l'EMC au sein de machines frigorifiques est très complexe car elle fait appel à plusieurs domaines complémentaires de la physique tel que le magnétisme, la thermique, la mécanique, l'hydraulique

Le fonctionnement des systèmes de réfrigération magnétique est similaire à celui de la réfrigération conventionnelle, sauf que les phases de compression/détente sont remplacées par l'aimantation et la désaimantation.

Nous verrons dans ce chapitre le principe de fonctionnement d'un réfrigérateur magnétique, sa composition, les différents cycles utilisés pour la réfrigération magnétique, ainsi que les différents prototypes mis en œuvre jusqu'aujourd'hui.

II.2 COMPOSITION

Un système de réfrigération magnétique est constitué essentiellement d'un matériau magnéto-calorique qui représente le cœur même du système.

Un champ magnétique variable -émis par un électroaimant alimenté, par un courant variable, par une bobine supraconductrice ou par un aimant permanent- fait successivement chauffer et refroidir le matériau.

La chaleur ainsi dégagée (ou bien absorbée) est transférée vers un échangeur thermique à l'aide d'un fluide caloporteur lui-même déplacé par une pompe ou un piston.

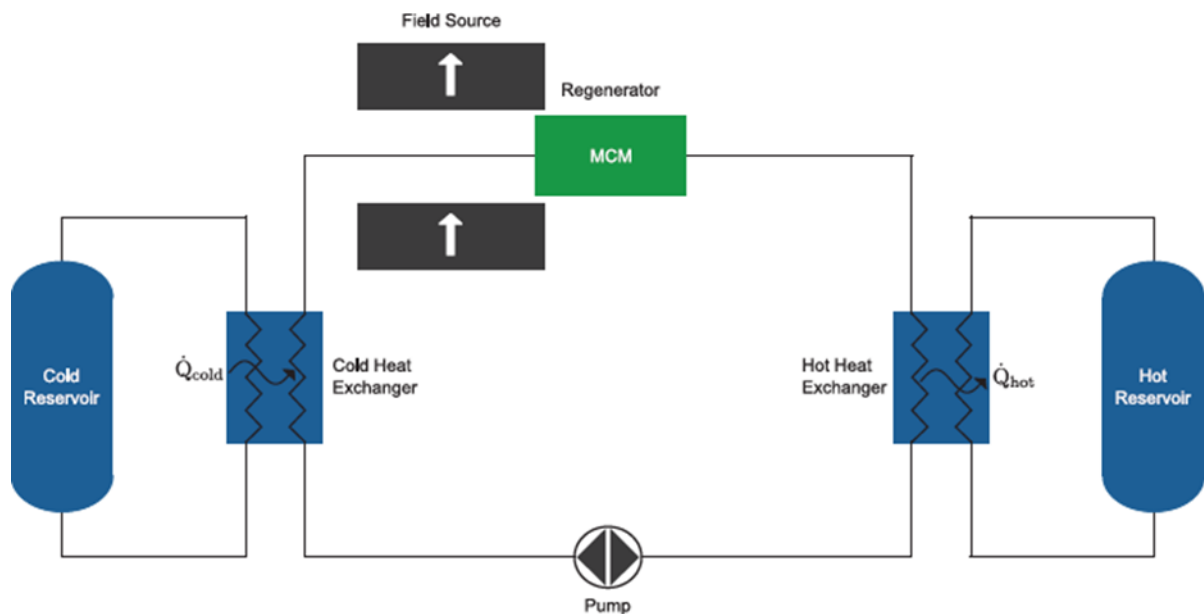


Figure II.1: Composition d'un système de réfrigération magnétique. [14]

II.3 FONCTIONNEMENT

La réfrigération magnétique est basée sur des cycles composés de quatre phases qui peuvent se chevaucher selon le cycle utilisé :

- L'aimantation du matériau magnéto-calorique qui entraîne une augmentation de sa température.
- L'écoulement du fluide caloporteur qui extrait une partie de la chaleur du matériau magnéto-calorique pour la céder à la source chaude.
- La désaimantation du matériau magnéto-calorique qui entraîne une diminution de sa température.
- L'écoulement du fluide caloporteur prélève de la chaleur à la source froide pour la céder au matériau magnéto-calorique.

En analogie avec un cycle thermodynamique classique, et comme vu précédemment, ces quatre phases peuvent être substituées à une compression d'un gaz, rejet de chaleur à la source chaude, détente du gaz, absorption de chaleur de la source froide. Ces phases peuvent se superposer et être réalisées selon différents cycles thermodynamiques qui seront présentés dans la Section II.4.

Les phases d'aimantation et désaimantation sont assurées par la génération d'un champ variable dans le matériau magnéto-calorique. 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 magnéto-calorique. Il est possible de réaliser deux types de mouvement, un mouvement linéaire (alternatif) ou un mouvement de rotation, illustrés sur la Figure II.2.

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 [14].

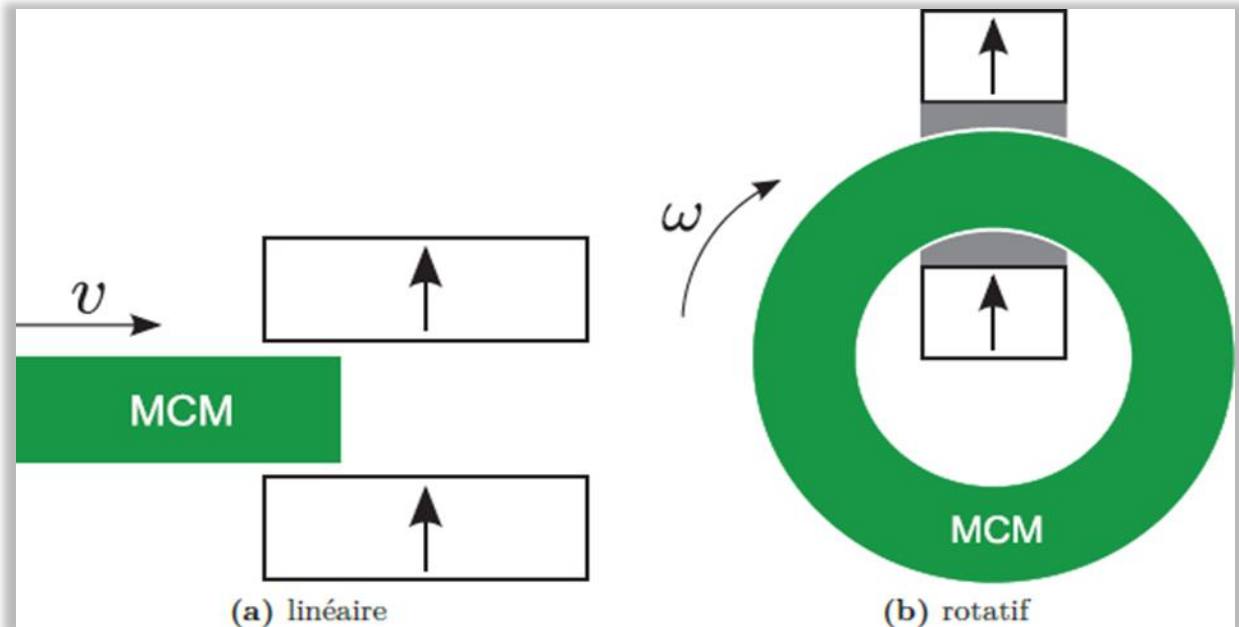


Figure II.2: Les deux grandes familles de système de réfrigération magnétique.[10]

II.4 CYCLES DE REFRIGERATION MAGNETIQUE

L'étude historique de la réfrigération magnétique montre que plusieurs cycles thermodynamiques ont été mis en œuvre. Parmi ceux-ci, nous pouvons distinguer le cycle Stirling, le cycle magnétique d'Ericsson, le cycle magnétique de Brayton, le cycle de Carnot, et enfin le cycle magnétique à régénération active (AMR).

Parmi eux, seuls les cycles d'Ericsson et de Brayton peuvent être utilisés autour de la température ambiante car ils impliquent l'utilisation d'un régénérateur permettant d'atteindre une forte différence de température et sont faciles à mettre en œuvre.

II.4.1 Cycle magnétique de Carnot

La Figure II.3 représente le cycle magnétique de Carnot. Celui-ci est un cycle idéal composé de quatre étapes :

- Aimantation adiabatique : le matériau s'échauffe instantanément sans échanger de chaleur avec l'extérieur.
- Aimantation isotherme : L'aimantation est isotherme, c'est-à-dire que toute la chaleur produite précédemment est cédée à la source chaude.
- Désaimantation adiabatique : le matériau se refroidit instantanément sans échanger de chaleur avec l'extérieur.

- Désaimantation isotherme : le matériau absorbe la chaleur en provenance de la source froide.

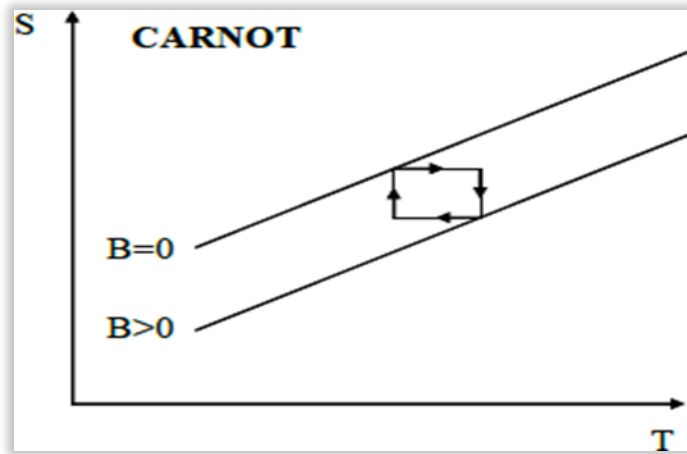


Figure II.3: Cycle magnétique de Carnot

Le MCM est désaimanté tout en maintenant sa température fixe. L'augmentation de l'entropie magnétique est compensée par une absorption de chaleur de la source froide.

La mise en œuvre pratique du cycle de Carnot magnétique est complexe car elle nécessite l'utilisation d'au moins quatre amplitudes différentes de champ magnétique. La description de ce cycle sert uniquement à définir l'efficacité des autres cycles.

Un critère important pour évaluer les systèmes est le coefficient de performance COP (Coefficient Of Performance) qui, dans une application de réfrigération, représente le ratio entre l'énergie froide Q_f et le travail fourni W et il est équivalent à la quantité d'énergie récupérée par rapport à la quantité d'énergie fournie. Voir la figure II.4.

$$\text{COP} = \frac{Q_f}{w} \tag{II.1}$$

$$\text{COP}_{\text{Carnot}} = \frac{T_0}{T_1 - T_0} \tag{II.2}$$

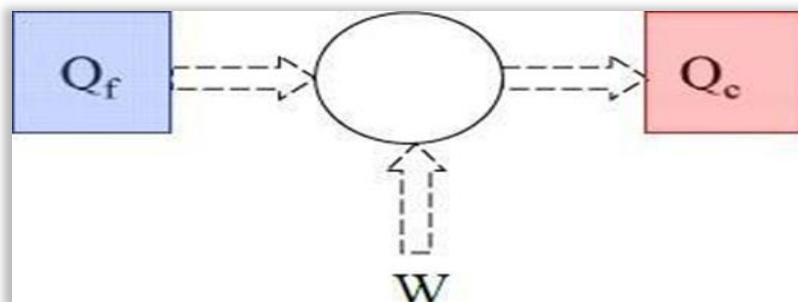


Figure II.4 : Schématisation d'un système délivrant de la puissance froide et chaude à l'aide d'un travail fourni. [28]

En appliquant le bilan énergétique sur la figure II.4 on peut écrire :

$$W=Q_c - Q_f \tag{II.3}$$

II.4.2 Cycle magnétique d'Ericsson / Stirling

Le cycle d'Ericsson/Stirling magnétique est composé de quatre étapes (voir Figure II.5) et nécessite de régénérer de la chaleur au cours de certaines étapes :

- Aimantation isotherme : le matériau s'échauffe mais cède cette chaleur à la source chaude.
- Refroidissement iso champ : Le matériau reste aimanté et cède de la chaleur à la source chaude, ce qui le refroidit.
- Désaimantation isotherme : le matériau se refroidit et absorbe une certaine quantité de chaleur à la source froide.
- Réchauffement iso champ : le matériau absorbe de la chaleur en provenance de la source froide.

Il est à noter que le cycle de Stirling est quelque peu différent durant les phases de réchauffement et de refroidissement, qui se font à iso aimantation au lieu d'être iso champ.

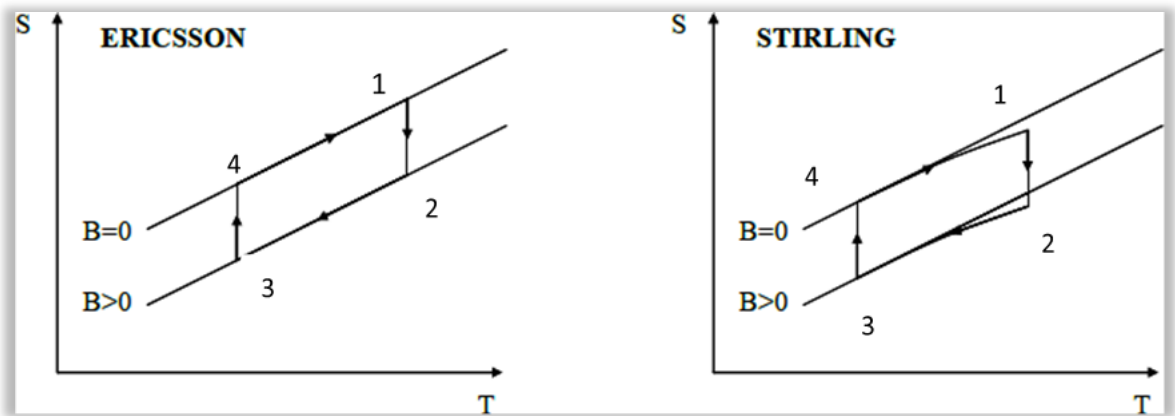


Figure II.5 : Cycle magnétique d'Ericsson/Stirling

En utilisant les relations (II.1) et (II.3) le COP d'un cycle d'Ericsson peut s'écrire :

$$\text{COP}_{\text{Ericsson}} = \frac{T_0(S_3 - S_2)}{T_1(S_1 - S_4) - (S_3 - S_2)} \tag{II.4}$$

$$\lim_{T_0 \rightarrow T_1} \text{COP}_{\text{Ericsson}} = \frac{T_0}{T_1 - T_0} = \text{COP}_{\text{Ericsson}}$$

II.4.3 Cycle magnétique de Brayton

La Figure II.6 représente le cycle de Brayton magnétique, qui est le cycle de réfrigération magnétique le plus simple. Il est composé de quatre étapes :

- Aimantation adiabatique : le matériau s'échauffe instantanément sans échanger de chaleur avec l'extérieur.
- Refroidissement iso champ : Le matériau reste aimanté et cède de la chaleur à la source chaude, ce qui le refroidit.
- Désaimantation adiabatique : le matériau se refroidit instantanément sans échanger de chaleur avec l'extérieur.
- Réchauffement iso champ : le matériau absorbe de la chaleur en provenance de la source froide.

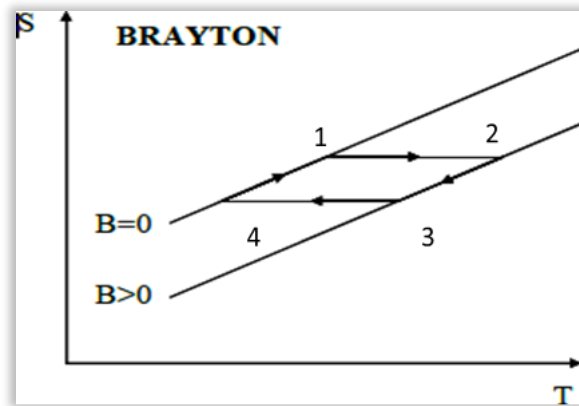


Figure II.6 : Cycle magnétique de Brayton

L'application des relations (II.1) et (II.3) pour le cycle de Brayton donne :

$$\text{COP}_{\text{Brayton}} = \frac{Q_f}{W} = \frac{Q_f}{Q_c - Q_f} = \frac{T_1(S_3 - S_2)}{T_0(S_1 - S_4) - T_1(S_3 - S_2)} \quad (\text{II.5})$$

Le cycle de Brayton est optimal lorsque les courbes T - S sont parallèles.

II.4.4 Cycle magnétique à régénération active (AMR)

L'exploitation directe de l'EMC géant autour de la température ambiante est limitée par le fait que les matériaux magnétoélectriques existants ne permettent pas d'atteindre des écarts de températures élevés [17]. Par exemple, un échantillon de gadolinium autour de la température ambiante produit un EMC d'environ 10 K sous un champ magnétique de 5 T.

Sachant que le gadolinium est considéré comme l'un des meilleurs matériaux magnéto-caloriques disponibles actuellement [26], cet EMC correspond à la valeur absolue maximale pouvant être atteinte entre le réservoir chaud et le réservoir froid et il est certainement difficile d'imaginer l'exploitation de cet EMC dans la plupart des applications de réfrigération.

Une autre solution pour atteindre des écarts de température importants est d'utiliser un cycle à régénération. Le cycle AMR (Active magnetic regeneration) a été imaginé par Barclay et Steyert en 1982. Il s'agit d'un cycle à régénération (on peut utiliser indifféremment un cycle de Brayton, Ericsson, Stirling ou Carnot) dont la particularité est que le rôle de régénérateur est assuré par le fluide qui traverse le matériau en circulant alternativement de la source chaude vers la source froide [27].

Une façon simple de se représenter le cycle AMR est de considérer que chaque élément du matériau magnéto-calorique subit un cycle, de Brayton par exemple, et que tous ces éléments sont en série. Ce fonctionnement est très similaire à celui d'un système multi-étage. La régénération dans les systèmes de réfrigération magnétique permet à la chaleur rejetée par le réseau dans une étape du cycle d'être restaurée et retournée au réseau dans une autre étape du même cycle [30]. Donc la capacité utilisée pour le refroidissement de la charge du réseau peut être utilisée efficacement pour augmenter la variation effective de l'entropie et l'écart de température.

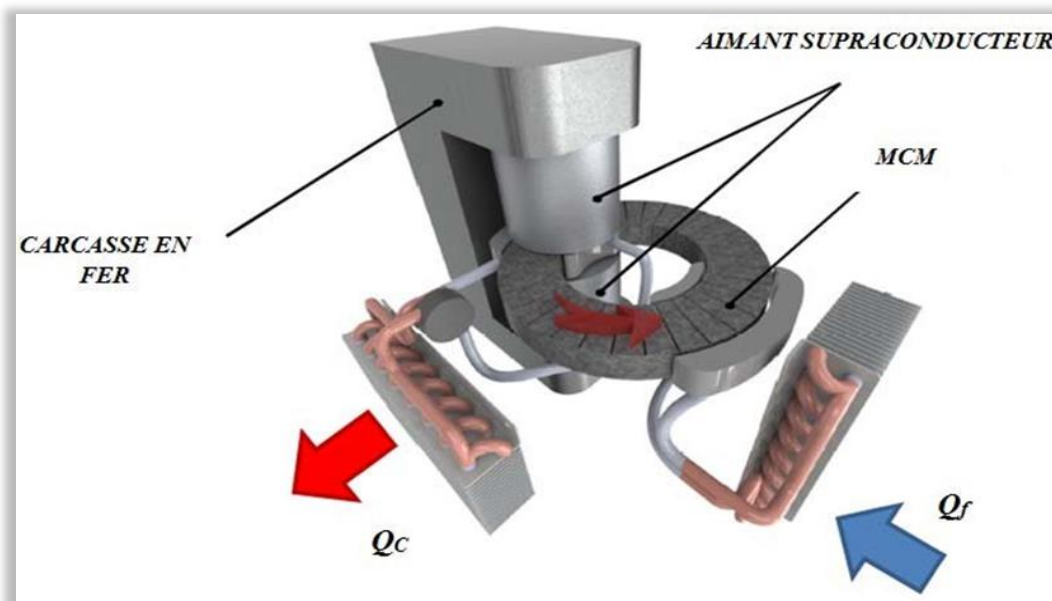
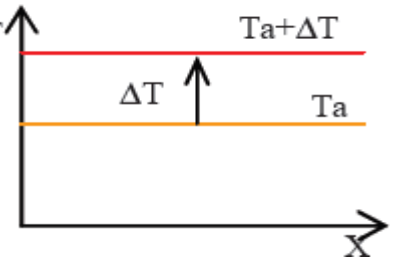


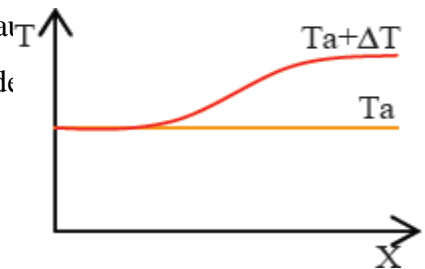
Figure II.7 : Schéma simplifié du concept brevété par Barclay.[27]

Le cycle complet de l'AMR décrit par Barclay est composé de quatre étapes (deux adiabatiques et deux iso champs) [13] :

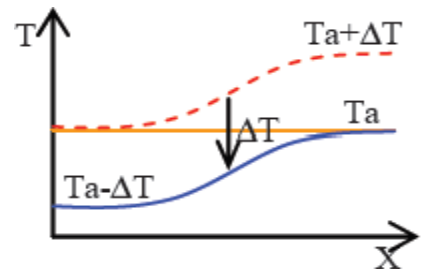
Etape 1 : Aimantation adiabatique du matériau ($B=B_{max}$) à partir d'un état initial où tout le système est à température T_a : Chaque point du matériau régénérateur voit sa température augmenter de ΔT suite à l'application du champ magnétique.



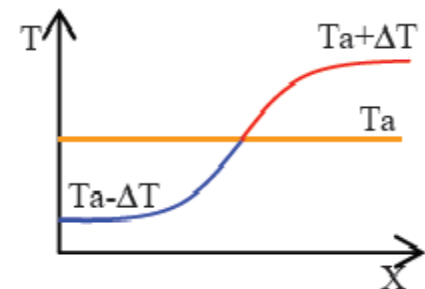
Etape 2 : Ecoulement du fluide de la source froide vers la source chaude : La chaleur de l'aimantation est évacuée par le fluide circulant de source froide T_F à la source chaude T_C on crée ainsi un gradient thermique le long du lit. La température du fluide à la sortie vaut $T_a + \Delta T_{ad}$.



Etape 3 : Désaimantation du matériau ($B=0$) : Chaque point du régénérateur voit sa température baisser de ΔT_{ad} suite à la désaimantation.



Etape 4 : Ecoulement du fluide de la source chaude vers la source froide : Le fluide circulant de la source chaude T_C à la source froide T_F cède sa chaleur au régénérateur et sort à température $T_F - \Delta T_{ad}$ inférieur à celle du côté froid. Le gradient est amplifié



Le cycle revient alors à l'étape 1. Le gradient est déjà formé dans le régénérateur, le prochain cycle l'amplifie à nouveau, etc. Ces étapes décrites précédemment représentent la mise en œuvre du cycle AMR, c'est-à-dire que l'énergie disponible ne sert qu'à amplifier le gradient de température ΔT dans le régénérateur.

II.5 CONCLUSION

Nous avons défini dans ce chapitre la composition et le principe de fonctionnement d'un prototype de réfrigération magnétique de base. Par la suite on a expliqué les cycles magnétiques sur lesquels reposent les différents prototypes déjà réalisés. On retrouve les cycles de Brayton, d'Ericsson, de Stirling et de Carnot magnétiques.

Si le cycle de Brayton reste le moins compliqué à étudier, il est nécessaire d'utiliser un cycle régénératif pour atteindre les écarts de température requis pour des applications industrielles. 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. Des résultats intéressants sont d'ores et déjà enregistrés. Pour les prototypes actuels, des écarts de température de 8,6 fois l'EMC ont été atteints, ce qui démontre le potentiel énorme de cette nouvelle technologie.

*Chapitre III : Étude des régénérateurs magnétiques
actifs*

III.1 Introduction

Dans ce chapitre nous aborderons l'application de l'effet magnéto-calorique dans la production du froid. Pour ce faire, des généralités sur les cycles magnétothermiques sont d'abord exposées en particulier le cycle à régénération active AMRR (Active Magnetic Regenerative Refrigeration). Une approche de modélisation de ce cycle sera présentée

III.2 Cycle à régénération active (AMRR : Active Magnetic Regenerative réfrigération)

Dans tous les cycles à régénération externe, le rôle du régénérateur est assuré par le fluide qui traverse le matériau en circulant alternativement de la source chaude à la source froide. Une des limites de ce principe était que la colonne du fluide devait garder lors de son déplacement un gradient de température stable pour assurer l'effet de la régénération. Une solution est de faire jouer le rôle de régénérateur au matériau réfrigérant. Barclay est le premier qui a décrit le principe de fonctionnement d'un régénérateur. Son cycle de fonctionnement ne présente pas d'analogie avec les cycles conventionnels, mais les phases sont similaires à celles du cycle de Brayton. Généralement, on le schématise par les profils de température dans le matériau et le fluide (Fig. III.1) au cours des différentes phases.

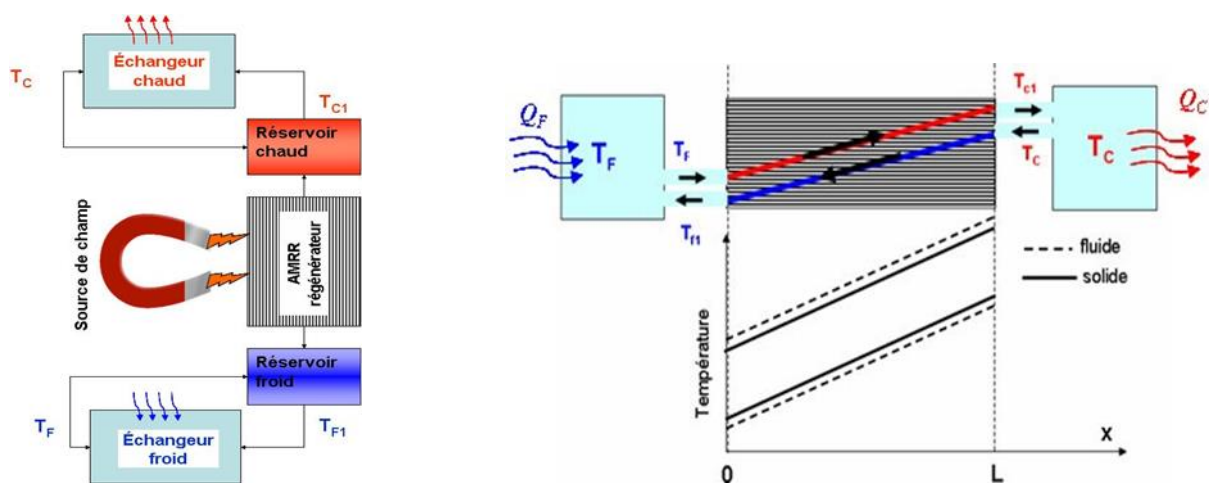
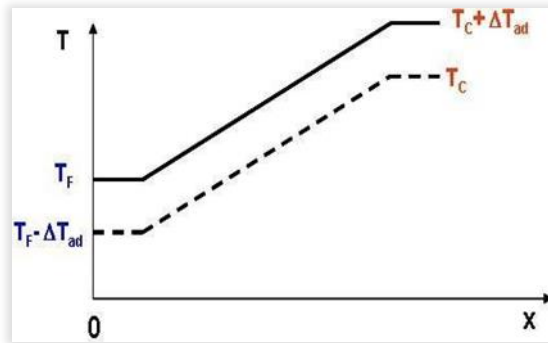


Figure III.1: Schéma de principe de la réfrigération magnétique à cycle AMRR et profil de température dans le matériau et le fluide

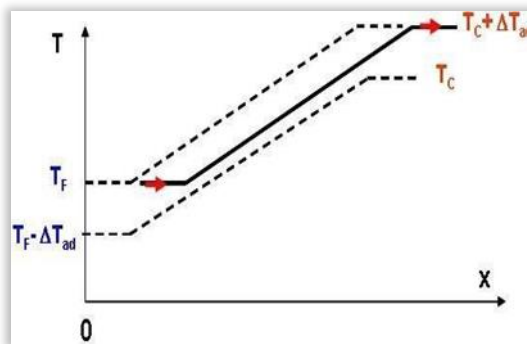
Le matériau magnéto-calorique va subir les cycles aimantation / désaimantation, les échanges de chaleur entre la source chaude et la source froide sont assurés par un fluide circulant alternativement dans un sens et puis dans l'autre.

Le cycle complet de l'AMRR décrit par Barclay est composé de quatre étapes (deux adiabatiques et deux iso champs). Il considère un gradient de température déjà établi le long du matériau.

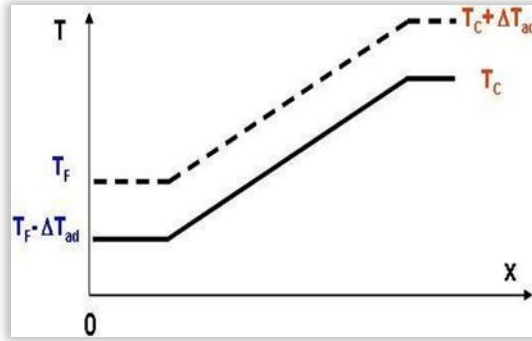
① Aimantation adiabatique du matériau ($B=B_{max}$) : durant cette phase, il n'y a pas de circulation du fluide. Initialement, le matériau se trouve en dehors du champ. L'aimantation provoque une augmentation de la température de l'ensemble du matériau de ΔT_{ad} .



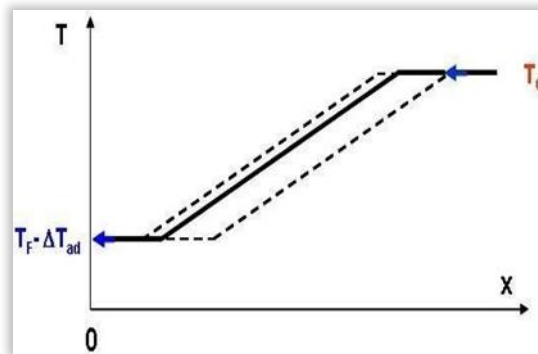
② Refroidissement iso champ ($B=B_{max}$) : le fluide caloporteur circule de la source froide à la source chaude, il rentre à la température T_F (température source froide), en absorbant une quantité de chaleur du matériau régénérateur, sa température augmente et sort à la température $T_C + \Delta T_{ad}$ supérieure à celle du côté chaud. Ainsi en passant par l'échangeur chaud, le fluide rejette l'excès de chaleur et sort à la température T_C .



③ Désaimantation adiabatique du matériau ($B=0$) : durant cette phase, il n'y a pas de circulation du fluide. L'ensemble du matériau voit sa température diminuer de ΔT_{ad} .



④ Réchauffement iso champ ($B=0$) : le fluide caloporteur circule de la source chaude à la source froide, il rentre à la température T_C (température source chaude), en cédant une quantité de chaleur au matériau régénérateur, sa température diminue. Il sort à la température $T_F - \Delta T_{ad}$ inférieure à celle du côté froid. Ainsi en passant par l'échangeur froid le fluide absorbe l'excès de chaleur et sort à la température T_F .



Ainsi, à chaque cycle, les quantités de chaleur induites par l'aimantation ou la désaimantation sont échangées dans les échangeurs chaud et froid. Si maintenant, on s'intéresse aux mécanismes d'amplification de l'écart de température entre la source froide et la source chaude, en particulier l'influence des divers paramètres, il semble important d'inclure le régime transitoire. Pour ce faire, nous avons développé un modèle thermique du cycle AMRR.

III.3 Modélisation du cycle AMRR

Le modèle élaboré s'appuie sur le principe de base de l'AMRR d'une machine alternative. Il s'agit d'un écoulement fluide à travers un matériau régénérateur (Fig. III.2) dont le processus aimantation / désaimantation fait absorber ou dégager une quantité de chaleur au fluide. Les propriétés physiques du régénérateur sont fonction de la température et du champ magnétique appliqué.

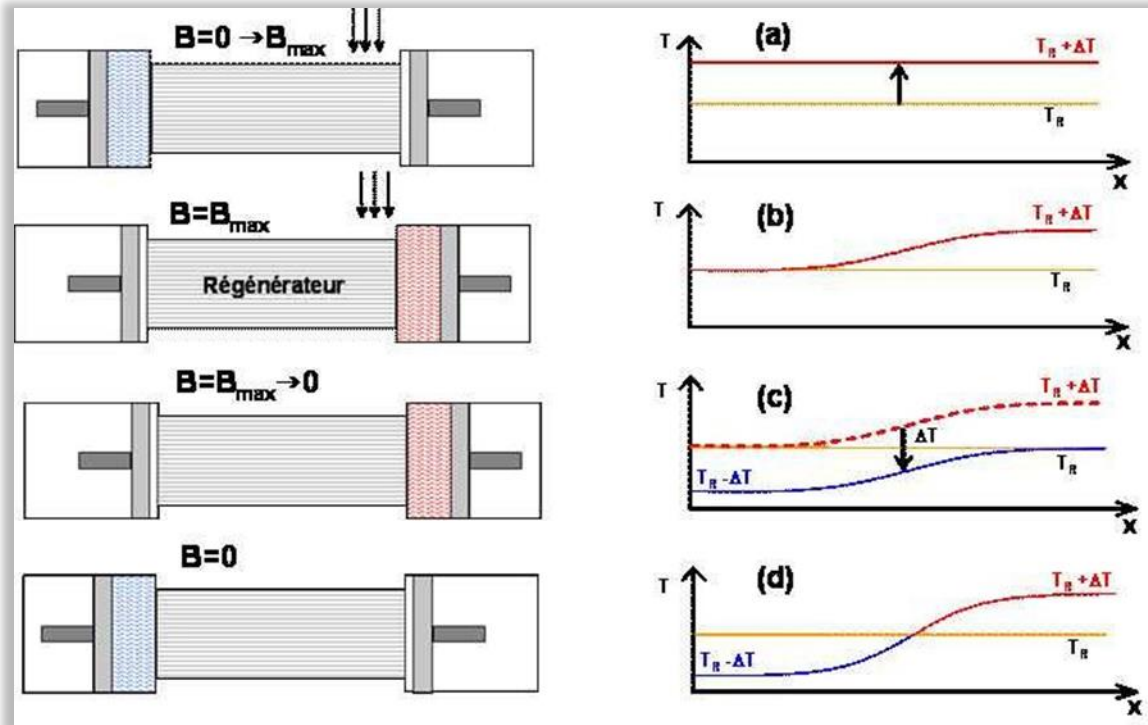


Figure III.2: Représentation du cycle AMRR et mise en évidence de l'amplification du gradient thermique

a) **adiabatique** : chaque point du matériau régénérateur voit sa température augmenter de ΔT_{ad} suite à l'application du champ magnétique

b) **iso champ** : la chaleur de l'aimantation est évacuée par le fluide circulant de la source froide TF à la source chaude TC.

c) **adiabatique** : chaque point du régénérateur voit sa température baisser de ΔT_{ad} suite à la désaimantation.

d) **iso champ** : le fluide circulant de la source chaude TC à la source froide TF cède sa chaleur au régénérateur.

Ainsi le ΔT induit par le processus d'aimantation et désaimantation sera amplifié à chaque cycle pour aboutir aux températures limites des sources chaude et froide. Le facteur d'amplification dépend des paramètres du cycle AMRR (propriétés physiques du régénérateur et du fluide, géométrie et forme de régénérateur, fréquence du cycle, débit du fluide, etc.)

III.3.1 Mise en équation et hypothèses simplificatrices

Pour modéliser l'AMRR, on considère la configuration schématisée dans la figure III.3 Il s'agit d'un écoulement d'un fluide monophasique incompressible à travers deux plaques parallèles séparées par une épaisseur e_f très faible de sorte que le régime hydraulique est établi sur toute la longueur de l'écoulement.

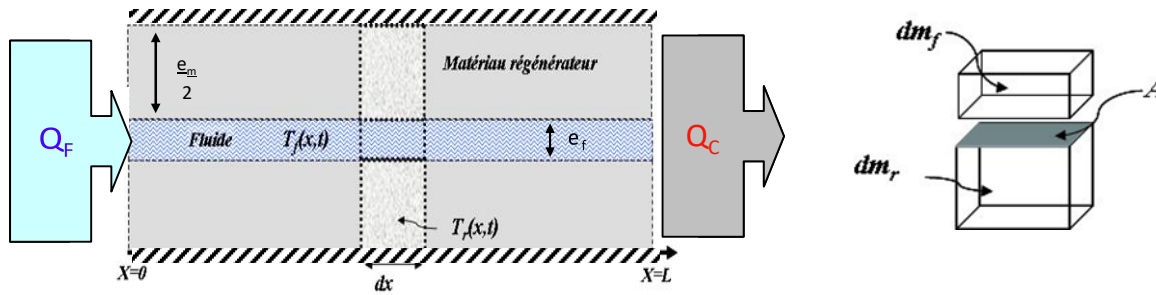


Figure III.3: Représentation de la géométrie de l'écoulement et les éléments différentiels (e_m : épaisseur de la plaque ; e_f : épaisseur du fluide ; L : longueur de la plaque)

En négligeant la conduction axiale le long du fluide et du matériau et en considérant les bilans énergétiques d'un élément de régénérateur, on obtient les équations des échanges de chaleur à une dimension régissant les phases iso champs du cycle AMRR. Les relations entre les évolutions spatiotemporelles de la température du régénérateur T_r et du fluide T_f sont ainsi données par :

$$\rho_f c_f \left(\frac{\partial T_f}{\partial t} + v_f \frac{\partial T_f}{\partial x} \right) = h \cdot \frac{A}{\varepsilon} (T_r - T_f) \quad (III.1)$$

$$\rho_r c_r (B, T_r) \frac{\partial T_r}{\partial t} = h \cdot \frac{A}{1-\varepsilon} (T_f - T_r) \quad (III.2)$$

où ρ_f , C_f , ρ_r , C_r sont les densités et capacités calorifiques relatives au fluide et au matériau régénérateur, v_f est la vitesse d'écoulement du fluide, h est le coefficient d'échange thermique, T_r et T_f sont les températures associées au régénérateur et au fluide, A la surface d'échange par unité de volume et ε la porosité définie comme le rapport du fluide sur le volume du régénérateur. Dans ce cas particulier la porosité est simplement le rapport des épaisseurs matériaux et fluide ($\varepsilon = \frac{e_f}{e_m}$)

Quant aux phases adiabatiques (aimantation / désaimantation), leurs contributions seront introduites à chaque pas de temps comme conditions initiales pour le matériau régénérateur. En effet, à chaque début de phase les profils de température dans le matériau seront réinitialisés

par la condition suivante :

$$T_r(t=0, x) = T_r(t=\tau, x) \pm \Delta T_{ad}(T_r, \Delta B) \quad (\text{III.3})$$

Avec ΔT_{ad} le changement de température adiabatique, qui dépend de la température du matériau et de la variation de champ magnétique appliqué. Le signe (-) correspond à la phase de désaimantation et le signe (+) correspond à l'aimantation. On note aussi que les temps des phases adiabatiques sont très courts et négligeables devant la période totale du cycle 2τ , où τ est la durée du passage du fluide dans la phase aimantation ou désaimantation.

Pour le Gadolinium, le matériau utilisé dans cette étude, une expression analytique de $T_{ad}(T, \Delta B)$ a été trouvée en s'appuyant sur les mesures magnétiques. Des formulations similaires peuvent être trouvées pour les autres matériaux magnéto-caloriques.

Pour des inductions inférieures à 3 T, les courbes expérimentales ΔT_{ad} sont interpolées par des polynômes d'ordre 3 en champ et d'ordre 5 en température :

$$\Delta T_{ad}(T_r, \Delta B) = \sum_{j=0}^3 a_j T_r^j + \sum_{i=0}^5 b_i \Delta B^i \quad (\text{III.4})$$

a et b étant les coefficients d'interpolation.

Durant les phases iso champs, les échanges avec les sources chaude et froide sont assurés par le fluide. Supposons que les échangeurs soient parfaits, alors on peut les estimer par les relations ci-dessous :

$$Q_F = \tau \int_0^\tau q \cdot C_f [T_F - T_f(t, x=0)] dt \quad (\text{III.5})$$

$$Q_C = \tau \int_0^\tau q \cdot C_f [T_f(t, x=L) - T_C] dt \quad (\text{III.6})$$

Avec q le débit du fluide, T_F et T_C sont les températures des réservoirs ou des échangeurs froid et chaud respectivement, L est la longueur du régénérateur et τ la durée de la phase.

III.3.2 Calcul du coefficient d'échange h et des pertes de charge

Du point de vue écoulement, il s'agit d'un problème de convection forcée, qui est caractérisée par le paramètre h appelé coefficient d'échange thermique. Il dépend des conditions

expérimentales et tout particulièrement :

- De la géométrie du régénérateur (forme, rugosité)
- Des propriétés du fluide (densité, viscosité, conductivité thermique)
- De la vitesse et de la nature d'écoulement (laminaire, turbulent)

Ce coefficient est généralement calculé par une analyse dimensionnelle faisant intervenir trois nombres à savoir : le Reynolds Re qui caractérise directement l'écoulement ; le Prandtl Pr qui ne dépend que des propriétés physiques du fluide et le Nusselt Nu qui donne la valeur du coefficient d'échange thermique h .

$$Re = \rho \cdot v_{\text{moy}} \cdot \frac{Dh}{\mu} \quad (\text{III.7})$$

$$Pr = \frac{Df}{\lambda_f} \quad (\text{III.8})$$

$$Nu_{\mu} = h \cdot \frac{Dh}{\lambda_f} \quad (\text{III.9})$$

Section de passage du fluide et le périmètre mouillant multiplié par un facteur 4 afin de le normaliser avec le diamètre d'une conduite circulaire.

$$D_h = \frac{4S}{P} \quad (\text{III.10})$$

L'épaisseur de la couche du fluide étant très faible devant les dimensions de la conduite ($D_h = 2.ef$), on peut utiliser la corrélation établie pour les écoulements internes à travers des plaques parallèles et donnée par :

$$Nu = 0.663Re^{0.6} Pr^{0.31} \quad (\text{III.11})$$

III.4 Conclusions

La modélisation thermique du cycle AMRR idéal (sans diffusion thermique), a révélé son comportement spécifique, à savoir l'amplification du gradient thermique le long du régénérateur. On a pu vérifier le principe physique de la régénération active, expliqué précédemment.

L'influence des paramètres du cycle AMRR sur les performances thermiques intervient à la fois sur l'écart de température ΔT et la puissance froide, cela complique le choix des paramètres optimaux. en effet, ΔT et la puissance froide varient en sens opposé en fonction des paramètres de cycle. Ainsi par exemple, la diminution du débit du fluide s'accompagne d'une diminution des échanges entre le fluide et le matériau, ce qui favorise l'augmentation de l'écart de température au détriment de la puissance froide. Cependant, à géométrie donnée et écart de température imposé, il existe un débit optimisant la puissance froide.

Chapitre IV : Étude des sources de champ magnétique

IV.1 Introduction

La source de champ magnétique est un élément capital des systèmes de réfrigération magnétique, aussi bien pour leurs performances que pour leur coût. De plus, elle constitue un défi important dans la conception des systèmes de réfrigération magnétique car elle implique des phénomènes couplés, magnétiques, mécaniques et thermiques. Un grand nombre de prototypes a été réalisé avec différentes sources de champ magnétique, mais bien souvent il s'agit d'une structure basée sur un cylindre de Halbach.

IV.2 Quelques notions de magnétisme

IV.2.1 Principes de bases

Si un champ magnétique d'excitation H est appliqué à un matériau magnétique, alors une aimantation M va être induite dans celui-ci :

$$M = \chi H \quad (\text{IV.1})$$

Avec χ la susceptibilité magnétique du matériau, qui est généralement fonction du champ magnétique H et de la température T .

L'induction B générée dans le matériau est la résultante des effets du champ et de l'aimantation :

$$B = \mu_0 (H + M) \quad (\text{IV.2})$$

Avec μ_0 la perméabilité magnétique du vide : $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$.

En électrotechnique, on préfère généralement utiliser la polarisation J plutôt que l'aimantation:

$$J = \mu_0 M \quad (\text{IV.3})$$

Et on utilise la perméabilité relative μ_r plutôt que la susceptibilité magnétique :

$$\mu_r = \chi + 1 \quad (\text{IV.4})$$

IV.2.2 Matériaux magnétiques

IV.2.2.1 Classification des matériaux magnétiques

On classe les matériaux magnétiques en trois grandes familles, en fonction de la valeur de leur perméabilité relative. Les principales propriétés des différentes familles de matériaux magnétiques sont données dans le Tableau 4.1.

IV.2.2.2 Matériaux durs et matériaux doux

La Figure 4.1 représente une courbe d'hystérésis $B(H)$. Cette courbe est caractéristique du comportement magnétique d'un matériau ferromagnétique.

On peut relever plusieurs grandeurs significatives sur le cycle hystérésis :

- l'induction à saturation B_S correspond à l'induction maximale générée par le matériau.
- l'induction rémanente B_r représente l'induction présente dans le matériau lorsqu'on annule le champ d'excitation.
- le champ coercitif H_cB correspond à la valeur du champ qu'il faut appliquer pour désaimanter le matériau.

Tableau IV.1: Classification des matériaux magnétiques

| Material | Diamagnétique | Paramagnétique | Ferromagnétique |
|---|----------------------------------|---------------------------------|-----------------------------|
| Perméabilité relative μ_r | $\mu_r < 1$ | $\mu_r \approx 1$ | $\mu_r \gg 1$ |
| Susceptibilité χ | -10^{-5} | 10^{-3} | 10^6 |
| Exemples de matériaux | eau, cuivre, argent, ... | air, platine, aluminium, ... | fer, cobalt, nickel, ... |
| Structure magnétique sous l'effet d'un champ magnétique | moments magnétiques très faibles | moments désordonnés | moments alignés |

Selon les valeurs de ces trois grandeurs, on distingue deux types de matériaux ferromagnétiques :

- les matériaux magnétiques doux, qui sont utilisés dans les circuits magnétiques pour leur perméabilité élevée, qui permet de bien canaliser le flux magnétique, ainsi que pour leur faible surface du cycle hystérésis qui correspond à de faibles pertes.

- les matériaux magnétiques durs, qui sont utilisés comme source de champ grâce à leur induction rémanente et champ coercitif élevés.

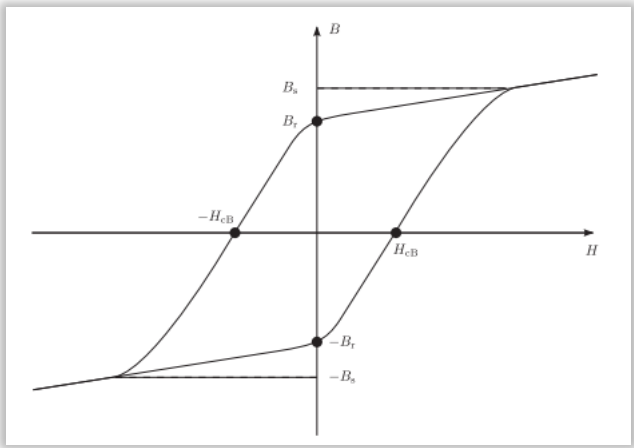


Figure IV.1: Cycle hystérésis $B(H)$

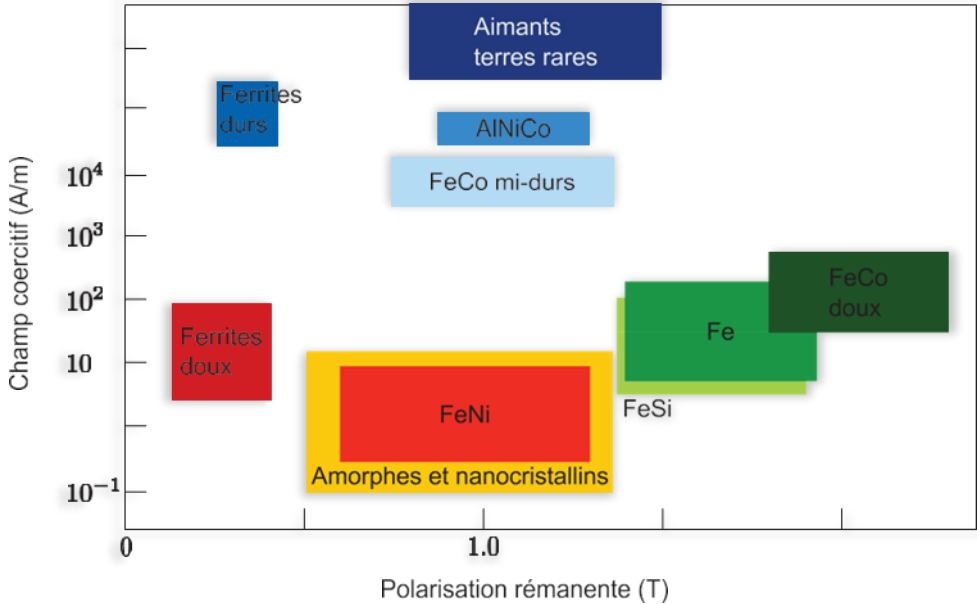


Figure IV 2: Les grandes classes de matériaux ferromagnétique.[36]

IV.2.3 Sources de champ magnétique

Il existe plusieurs types de source de champ magnétique utilisables pour la réfrigération magnétique : les électro-aimants, les bobines supraconductrices et les aimants permanents.

❖ **Électro-aimants**

La première idée qui vient à l'esprit pour créer un champ magnétique variable, est l'utilisation d'un électro-aimant. Considérons un circuit magnétique composé d'un solénoïde de N tours parcouru par un courant d'intensité I et d'un noyau en matériau magnétique doux de perméabilité relative μ_r et de longueur l_c . L'induction dans un entrefer de longueur l_g est déduite du théorème d'Ampère et s'exprime 1 :

$$B = \mu_0 N I \frac{1}{l_c / \mu_r + l_g} \quad (\text{IV.5})$$

La perméabilité relative d'un matériau doux étant très grande (typiquement $1000 \leq \mu_r \leq 5000$), on peut négliger le premier terme du dénominateur. L'Équation (4.5) se simplifie :

$$B \approx \frac{\mu_0 N I}{l_g} \quad (\text{IV.6})$$

Pour obtenir une induction de 1 T dans un entrefer de 30 mm, il faut donc générer près de 24 000 ampères tours ! Si l'on considère une densité de courant dans la bobine $j_S = 3 \text{ A} \cdot \text{mm}^{-2}$, cela correspond à une section de 80 cm² et conduit à des pertes joules de l'ordre de 750 W. Des pertes aussi importantes nécessiteraient un système de refroidissement

Pour compenser les pertes par effet joule au sein du noyau, ce qui va à l'encontre du but recherché. De plus les pertes sont considérables en comparaison aux puissances thermiques visées pour la réfrigération magnétique (la centaine de watts). C'est pourquoi les électro-aimants ne sont généralement pas utilisés dans les systèmes de réfrigération magnétique (et d'une façon plus générale, pour créer des inductions élevées dans de grands entrefers).

❖ **Bobines supraconductrices**

Les bobines supraconductrices permettent de créer aisément des inductions supérieures à 10 T, et consomment peu d'énergie une fois qu'elles sont dans leur état supraconducteur. Cependant elles doivent être refroidies en continu pour rester dans l'état supraconducteur et

la taille des systèmes de réfrigération est très conséquente, donc incompatible avec des applications domestiques ou des systèmes embarqués. Les bobines supraconductrices restent néanmoins envisageables pour des applications industrielles.

❖ **Aimants permanents**

L'induction créée par des aimants étant constante, il est nécessaire de les déplacer pour obtenir un champ variable [2]. La valeur de l'induction dépend de la polarisation rémanente des aimants utilisés ainsi que du circuit magnétique dans lequel ils sont placés. Dans tout ce qui va suivre, nous nous intéresserons exclusivement aux sources de champ à aimants permanents.

IV.3 Revue des sources de champ pour la réfrigération magnétique

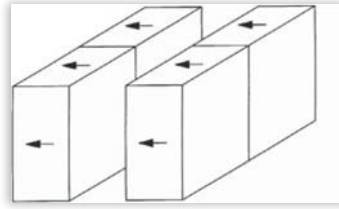
Des structures diverses et variées ont été proposées pour les systèmes de réfrigération magnétique. On peut classer ces structures en trois catégories :

- les circuits magnétiques simples, composés d'aimants permanents et de matériaux doux.
- les assemblages de type Halbach (simples ou doubles, ouverts ou fermés).
- les structures magnétiques complexes.

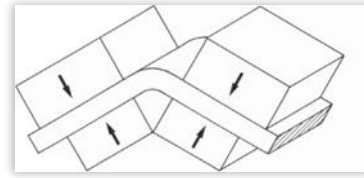
IV.3.1 Circuits magnétiques simples

❖ **Structure de Bohigas et al.**

Le système conçu par Bohigas et al. (Technical University of Catalonia, Espagne) est un système rotatif [Bohigas et al. 2000]. Un ruban de Gd est enroulé autour d'une roue en plastique. Initialement, la source de champ était constituée de deux paires d'aimants NdFeB placées de part et d'autre de la roue (voir Figure IV.3a). Cette structure générait une induction de seulement $B_{hf} = 0,3T$ dans un entrefer de 7 mm et aboutissait à des performances du système assez médiocres. Bohigas et al. ont donc conçu une autre structure d'aimants présentée sur la Figure IV.3b. Elle est constituée de deux quadruplets d'aimants associés à une pièce en matériau doux, disposés de part et d'autre de la roue et permet d'atteindre $B_{hf} = 0,95 T$ dans l'entrefer.



(a) Géométrie initiale



(b) Géométrie finale de la demi structure

Figure IV.3: Géométrie de la structure d'aimant utilisée par Bohigas et al.[4]

❖ Structure de Zheng et al.

La structure proposée par Zheng et al. (South China University of Technology) est un aimant en C, constitué de l'assemblage d'un aimant permanent NdFeB de polarisation rémanente $J_r = 1,4 \text{ T}$ et de pièces en matériau doux pour canaliser le flux dans l'entrefer [32]. L'induction moyenne calculée vaut environ $B_{hf} = 1,4 \text{ T}$ dans un entrefer de 20 mm .deux régénérateurs rectangulaires contenant des particules de Gd sont alternativement placés à l'intérieur de l'entrefer.

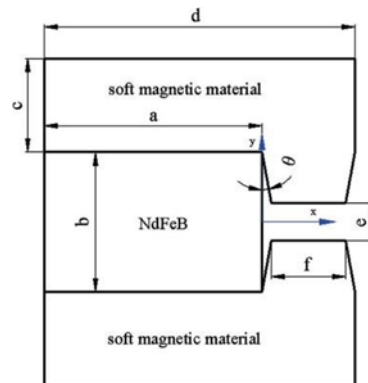


Figure IV.4: Géométrie de l'aimant en C de Zheng et al.[32]

IV.3.2 Assemblages de type Halbach

❖ Structure de Bjørk et al.

La structure utilisée par Bjørk et al. (Technical University of Denmark) est un cylindre de Halbach à 16 segments [3]. Pour un cylindre de Halbach infiniment long et de variation continue de la direction de polarisation, l'induction dans l'entrefer est uniforme et vaut [12] :

$$B(L\infty) = J_r \ln \left(\frac{R_o}{R_i} \right) \quad (\text{IV.7})$$

Avec R_i et R_o respectivement les rayons intérieur et extérieur du cylindre de Halbach. En pratique,

la variation continue de la polarisation est difficilement réalisable et les cylindres de Halbach sont réalisés par l'assemblage d'un nombre fini de segments. La direction de polarisation des segments du cylindre de Halbach discret est identique à celle du cylindre de Halbach continu au centre du segment considéré. La discrétisation du cylindre en un nombre fini N de segments conduit à une diminution de la valeur de l'induction dans l'entrefer [12] :

$$B(N) = B(L\infty) \frac{\sin(\frac{2\pi}{N})}{\frac{2\pi}{N}} \quad (\text{IV.8})$$

Par ailleurs, un cylindre de Halbach réel a une longueur finie, ce qui cause des fuites du flux magnétique aux extrémités du cylindre et entraîne une diminution de l'induction moyenne dans l'entrefer, d'autant plus importante que le cylindre de Halbach est court. Les segments utilisés dans la structure de Bjørk et al. Sont des aimants permanents NdFeB de polarisation rémanente $J_r = 1,4 \text{ T}$. Leur cylindre est composé de $N = 16$ segments, le rayon intérieur vaut $R_i = 21 \text{ mm}$, le rayon extérieur $R_o = 60 \text{ mm}$ et la longueur $L = 50 \text{ mm}$

L'induction moyenne dans l'entrefer est égale à $B_{hf} = 1,03 \text{ T}$. Cette valeur d'induction est relativement faible par rapport à sa valeur théorique (1,43 T). Ceci est dû à la faible longueur du cylindre de Halbach qui conduit à un flux de fuites relativement élevé.

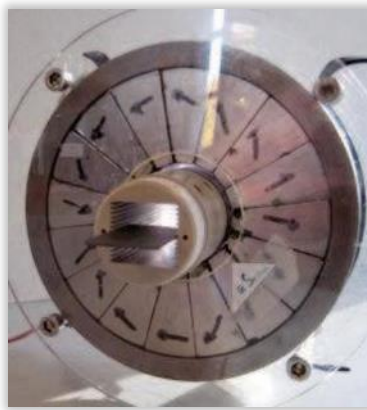


Figure IV.5: Géométrie du cylindre de Halbach utilisé par Bjork et al. [3]

❖ Structure de Tura et Rowe

Tura et Rowe (University of Victoria, Canada) ont utilisé pour leur système de réfrigération magnétique une source de champ inventée par Leupold et al. [37], à savoir deux cylindres de Halbach concentriques. Le principe de fonctionnement de ce système est illustré sur la Figure IV.6. Le cylindre extérieur crée un champ magnétique dans son entrefer d'amplitude H_1 et le cylindre

intérieur un champ d'amplitude H_2 . Si l'angle entre les deux cylindres est $\theta = 0^\circ$, alors le champ total dans l'entrefer est maximal et vaut $H_1 + H_2$. Lorsque l'on augmente l'angle entre les deux cylindres, le champ total diminue pour atteindre une valeur minimale $H_1 - H_2$ pour $\theta = 180^\circ$.

Les cylindres intérieurs et extérieurs sont chacun composés de $N = 8$ segments d'aimants permanents NdFeB de polarisation rémanente respective $J_{r1} = 1,2 \text{ T}$ et $J_{r2} = 1,27 \text{ T}$ [38]. Les rayons intérieur et extérieur du cylindre intérieur valent $R_{i1} = 12,5 \text{ mm}$ et $R_{o1} = 27 \text{ mm}$. Les rayons intérieurs et extérieurs du cylindre extérieur valent $R_{i2} = 30 \text{ mm}$ et $R_{o2} = 60 \text{ mm}$.

L'induction à l'intérieur de l'entrefer varie entre $B_{lf} = 0,1 \text{ T}$ et $B_{hf} = 1,47 \text{ T}$ selon l'angle relatif entre les deux cylindres de Halbach. En théorie une telle structure devrait permettre des inductions plus élevées ($B_{hf} = 1,8 \text{ T}$) mais les effets de bords dus à la longueur finie de la structure, ainsi que la segmentation des cylindres limitent l'induction dans l'entrefer.

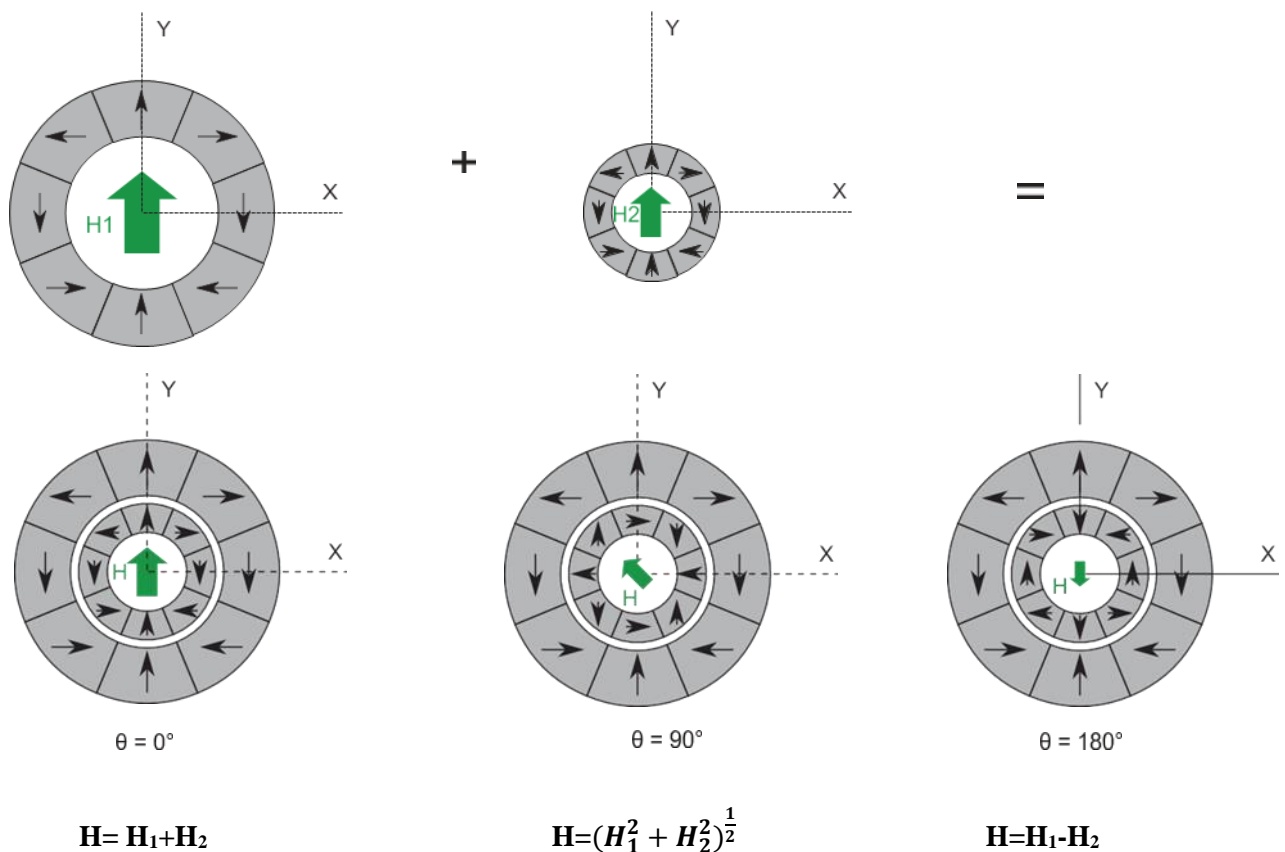


Figure IV.6: Principe de fonctionnement des 2 cylindres de Halbach conception

❖ Structure de Lee et al.

Lee et al. (Ames Laboratory, USA) sont partis de la structure classique du cylindre de Halbach pour concevoir leur source de champ [18]. Tout d'abord, le cylindre de Halbach est construit avec un nombre fini de pavés d'aimants, ce qui facilite sa fabrication mais conduit à une diminution de 10% de l'induction dans l'entrefer (avec $N = 8$ segments). Ensuite, ils désiraient concevoir un système de réfrigération magnétique rotatif, donc ils ont réalisé une ouverture dans le cylindre de Halbach qui permet le passage d'un disque de matériau magnétocalorique mais conduit, à nouveau, à une diminution de 10% de l'induction dans l'entrefer.

En utilisant des aimants NdFeB de polarisation rémanente $J_r = 1,2$ T et des concentrateurs de flux en matériaux doux (FeVCo) une telle structure permet d'obtenir une induction maximale $B_{hf} = 1,9$ T dans un entrefer de 12,7 mm, ce qui représente une très bonne performance.

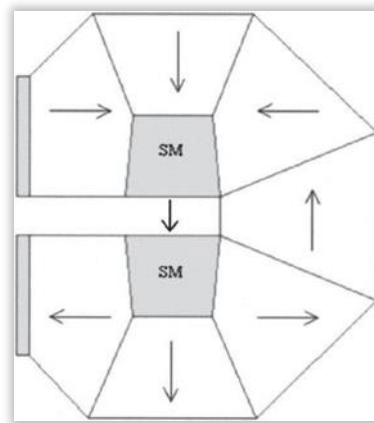


Figure IV.7: Géométrie du cylindre de Halbach modifié proposé par Lee et al.[18]

❖ Structure de Vasile et Muller

Le système conçu par Vasile (INSA Strasbourg, France) et Muller (Cooletch Applications, France) est un système rotatif [29]. Il s'agit d'un cylindre de Halbach avec une ouverture pour permettre la rotation d'un disque. La structure est composée d'aimants permanents NdFeB de polarisation rémanente $J_r = 1,47$ T. Des pièces en matériau doux (FeVCo) sont ajoutées pour compenser l'ouverture de la structure et pour concentrer le flux dans l'entrefer. Cette structure permet d'obtenir une induction théorique $B_{hf} = 1,49$ T dans un entrefer de 20 mm.

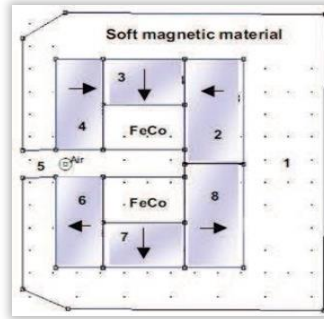
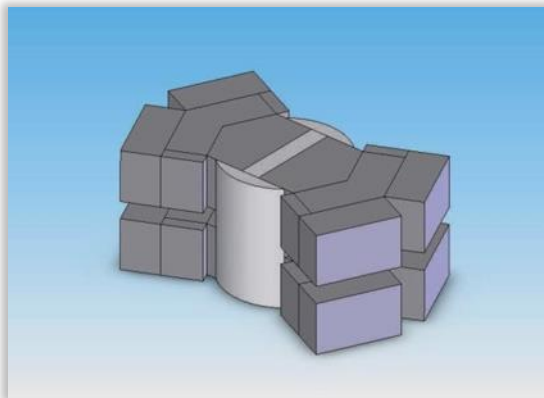


Figure IV.8: Géométrie de l'aimant en C utilisée par Vasile et Muller. [29]

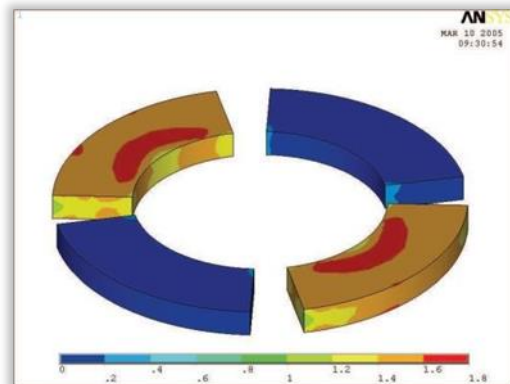
IV.3.3 Structures magnétiques complexes

❖ Structure de Zimm et al.

Un système de réfrigération magnétique rotatif a été conçu et réalisé par Astronautics Corporation of America en 2007 [33]. La structure de la source de champ est détaillée dans le brevet déposé par Astronautics [9]. Il s'agit d'une structure d'aimants avec deux entrefers en V, composée d'un assemblage d'aimants permanents NdFeB de sections rectangulaires, trapézoïdales ou pentagonales et de pièces en fer 3. Cette structure permet d'obtenir une induction $B_{hf} = 1,5$ T dans les deux entrefers de hauteur 18,55 mm.



(a) géométrie de la structure d'aimants



(b) géométrie du régénérateur

Figure IV.9: Système conçu par Zimm et al. [33]

❖ Structure de Okamura et al.

Chubu Electric et Toshiba (Japon) se sont associés pour concevoir en 2005 une première source de champ magnétique rotative pour des applications en réfrigération magnétique [21]. La structure

était très proche d'une machine tournante à aimants permanents mais ses performances étaient relativement moyennes (induction maximale dans l'entrefer $B_{hf} = 0,77$ T et couple résistant maximal $C_{r \max} = 52$ N.m). Les performances ont été nettement améliorées en utilisant un rotor de structure plus complexe (de type dipolaire à concentration de flux), ainsi qu'une culasse feuilletée (pour limiter les courants induits) [20]. L'induction moyenne dans l'entrefer de la nouvelle structure vaut $B_{hf} = 1,1$ T pour un entrefer de 20 mm.

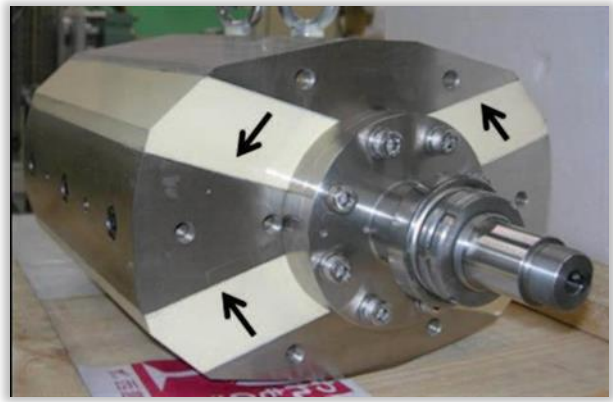
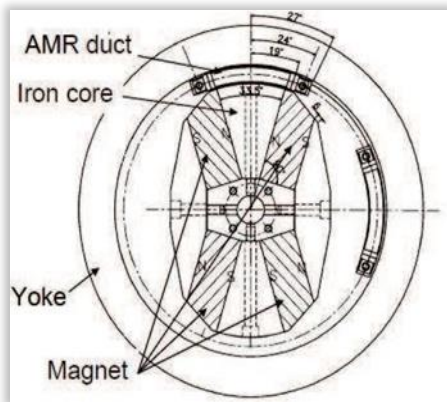


Figure IV.10: Géométrie de la structure d'aimants de Okamura et al. [20]

IV.4 Conclusion

Ce chapitre a permis de faire le bilan des différentes sources de champ magnétique pour des applications en réfrigération magnétique. Les électro- aimants ne sont pas envisageables en raison de l'intensité du courant nécessaire pour créer des inductions proches du Tesla. Les bobines supraconductrices nécessitent des systèmes de refroidissement encombrants et, si elles restent une possibilité pour des applications industrielles de grande échelle, ne sont pas envisageables pour des applications domestiques. Ce sont donc les structures d'aimants permanents qui sont utilisées dans les systèmes de réfrigération.

Magnétique domestiques. Des structures diverses et variées ont été proposées pour les systèmes de réfrigération magnétique, mais on peut regrouper ces structures en trois catégories : les circuits magnétiques simples, les assemblages de type Halbach et les structures magnétiques complexes.

Chapitre V : simulation numérique

V.1 Introduction :

Dans ce chapitre, nous avons étudié la simulation avec les résultats et la discussion par le logiciel FEMM (Finite Element Method Magnetic). Et le prototype que nous allons simuler est le prototype de Halbach. Et les étapes nécessaires pour l'analyse par éléments finis sont :

- Définition de la géométrie.
- Affectation des matériaux pour chaque région du problème.
- Définition du problème.
- Définition des conditions aux limites.
- Le maillage de la géométrie de la machine en éléments finis.
- La résolution du problème.

V.2 Définition logiciel FEMM

Le logiciel FEMM (Finite Element Method Magnetics) est une suite de programmes pour résoudre les problèmes magnéostatiques et de faibles fréquences en deux dimensions (2D), planaires et axisymétriques. Le logiciel FEMM est divisé en trois parties :

- Preprocessor (femme.exe) : est un programme de CAO pour la définition de la géométrie du problème à résoudre, et définir les propriétés des matériaux et les conditions aux limites.
- Solver (fkern.exe) : le Solver prend en compte les fichiers de données décrivant le problème et résout les équations de Maxwell pour obtenir les valeurs de l'induction magnétique dans le domaine de résolution.
- Postprocessor (femmview.exe) : est un programme graphique qui affiche les résultats sous formes de champs, de contour et de densité. Le programme permet aussi à l'utilisateur d'inspecter le champ aux points arbitraires, d'évaluer plusieurs différentes intégrales et de tracer diverses quantités d'intérêt le long des contours définis par l'utilisateur.

Deux programmes supplémentaires sont aussi appelés pour exécuter des tâches spécialisées. Ceux sont :

- Triangle.exe : triangle découpe la région en un grand nombre de triangles, c'est une partie vitale du procédé d'éléments finis.
- Femmplot.exe : ce programme est utilisé pour afficher les diverses solutions en 2D

V.3 Prototype de halbach

V.3.1 Définition

Le système magnétique (Fig. V.1 et V.2A) est composé de quatre assemblages d'aimants permanents, qui sont disposés dans une configuration « double U » (Fig. V.2B).



Figure V.1: Vue de côté du système magnétique et de la rotative soupape

Les aimants sont maintenus par deux supports en aluminium et montés sur un arbre, de sorte que l'axe de symétrie dans la disposition en U coïncide avec l'axe de rotation du groupe magnétique. Grâce aux extensions « double U ».

Cette configuration fournit deux régions d'hémicycle à champ magnétique élevé (CMÉ) et deux régions à faible champ magnétique (CMF). Plus précisément, dans la région CHÉ, la densité de flux magnétique (B) est supérieure ou égale à 90% de la densité de flux magnétique de crête, tandis que dans la région CMF, B est inférieure ou égale à 2% de la densité de flux de crête

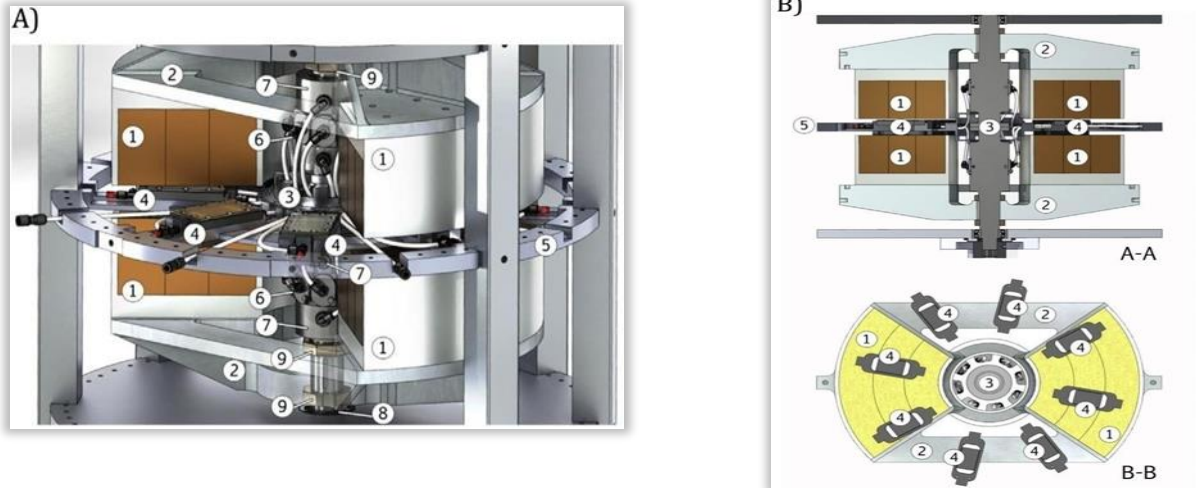


Figure V. 2: 8 Mag détails de base

8 Mag détails de base :

- 1) Aimant permanent assemblée.
 - 2) Support de montage.
 - 3) Vanne à arbre rotatif combinaison.
 - 4) Régénérateur.
 - 5) Roue magnéto-calorique.
 - 6) Collecteur de fluide vers/ depuis les régénérateurs.
 - 7) Collecteur de fluide vers/ de l'échangeur de chaleur.
 - 8) : Roulements.
 - 9) : Anneaux réglables.
- B Coupe longitudinale (A-A) et axiale (B-B) de l'appareil cœur.

V.3.2 La géométrie du prototype

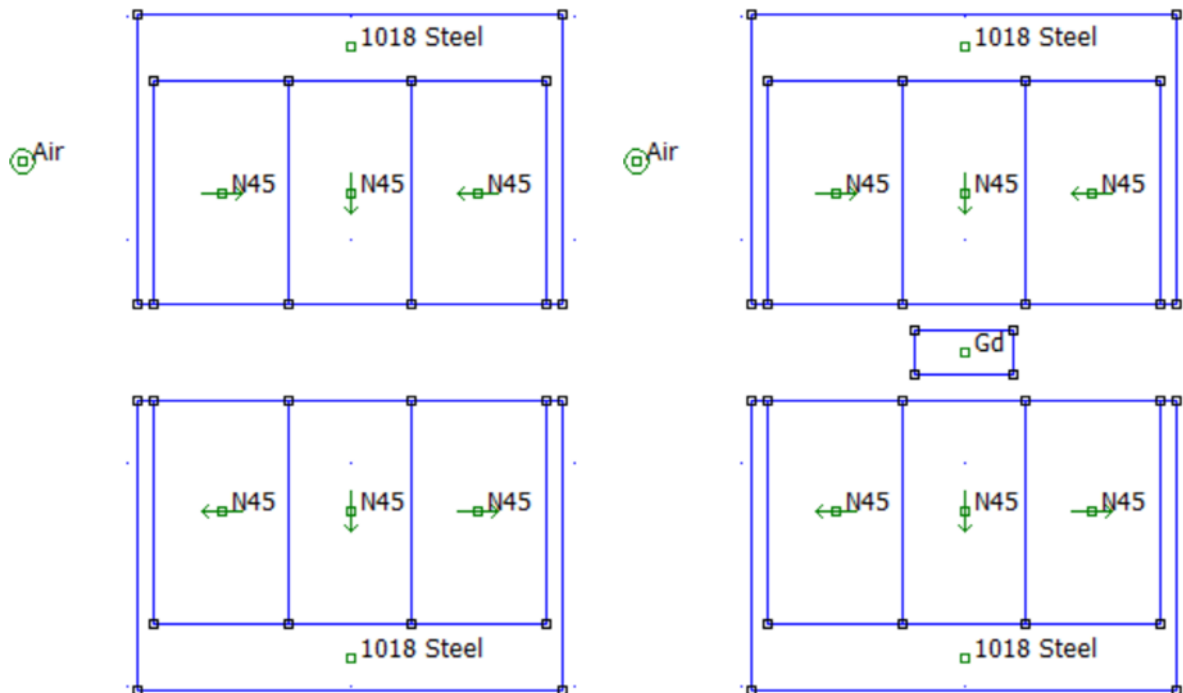


Figure V.3: Géométrie du prototype sans et avec Gadolinium

V.3.3 Simulation numérique du champ magnétique et l'induction magnétique

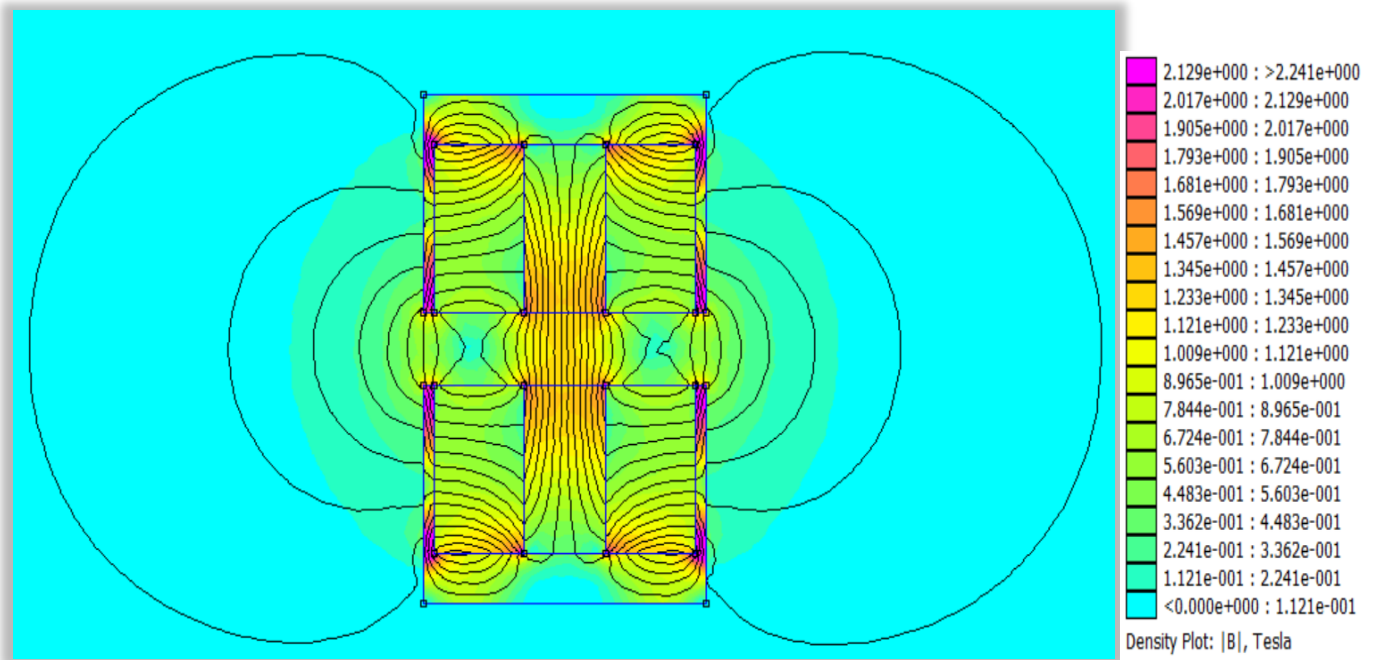


Figure V.4: Simulation numérique de la direction des lignes de champs magnétique dans le circuit dans le cas en l'absence du Gadolinium

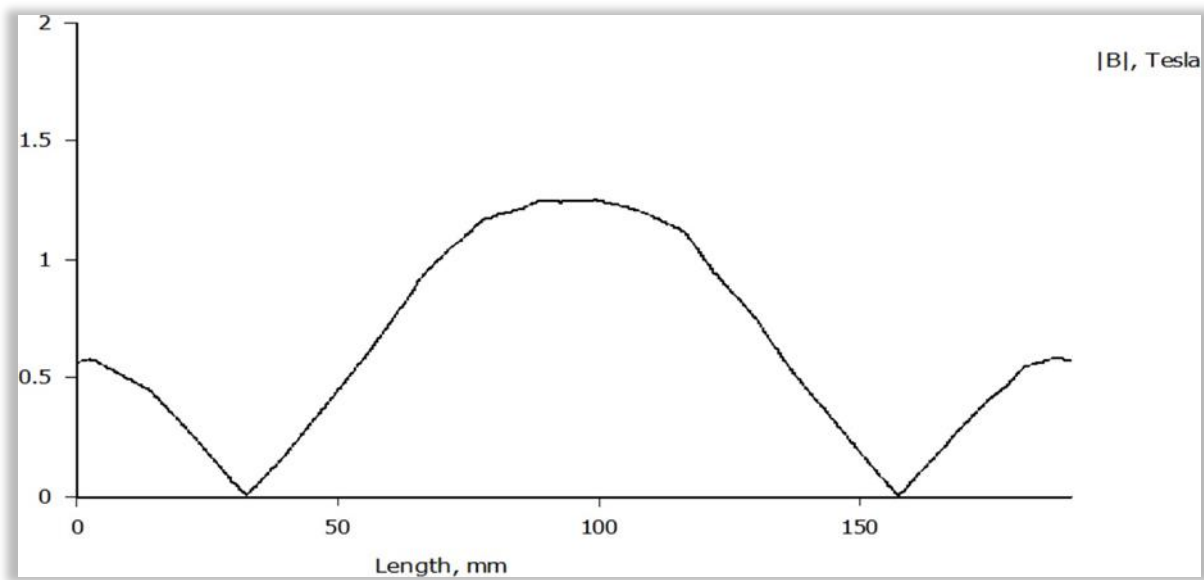


Figure V. 5:L'indiction magnétique B le long de l'entrefer dans le cas en l'absence de Gadolinium

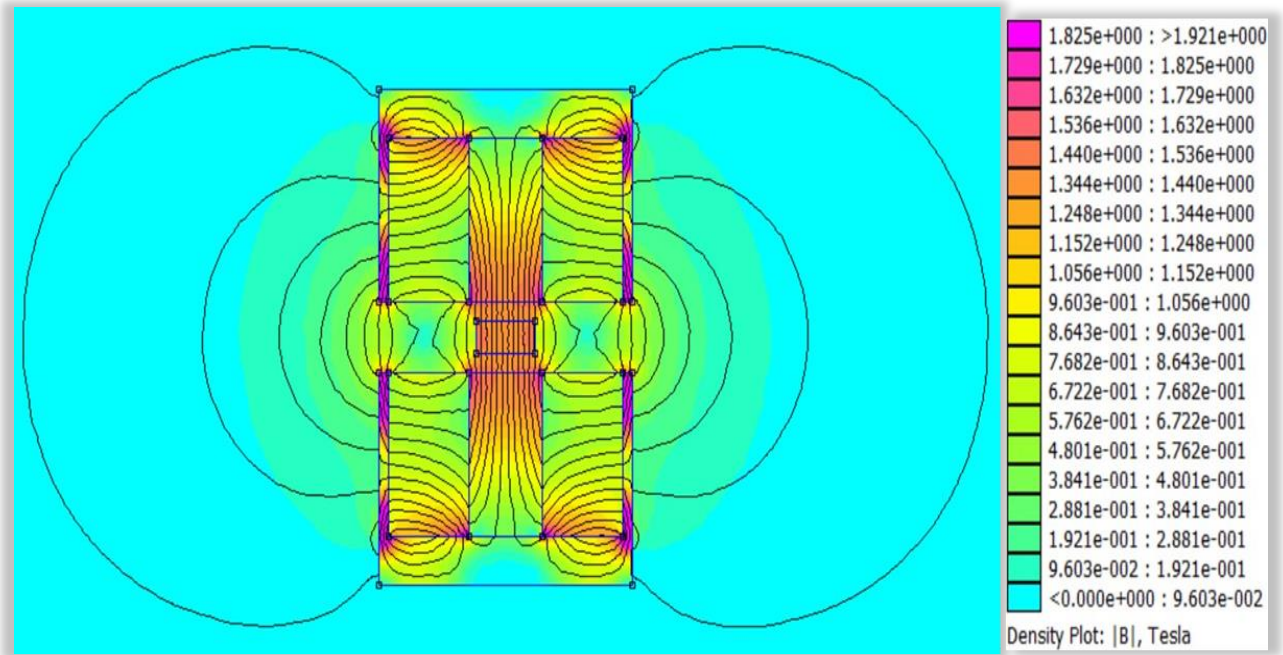


Figure V.6: Simulation numérique de la direction des lignes de champs magnétique en présence du Gadolinium

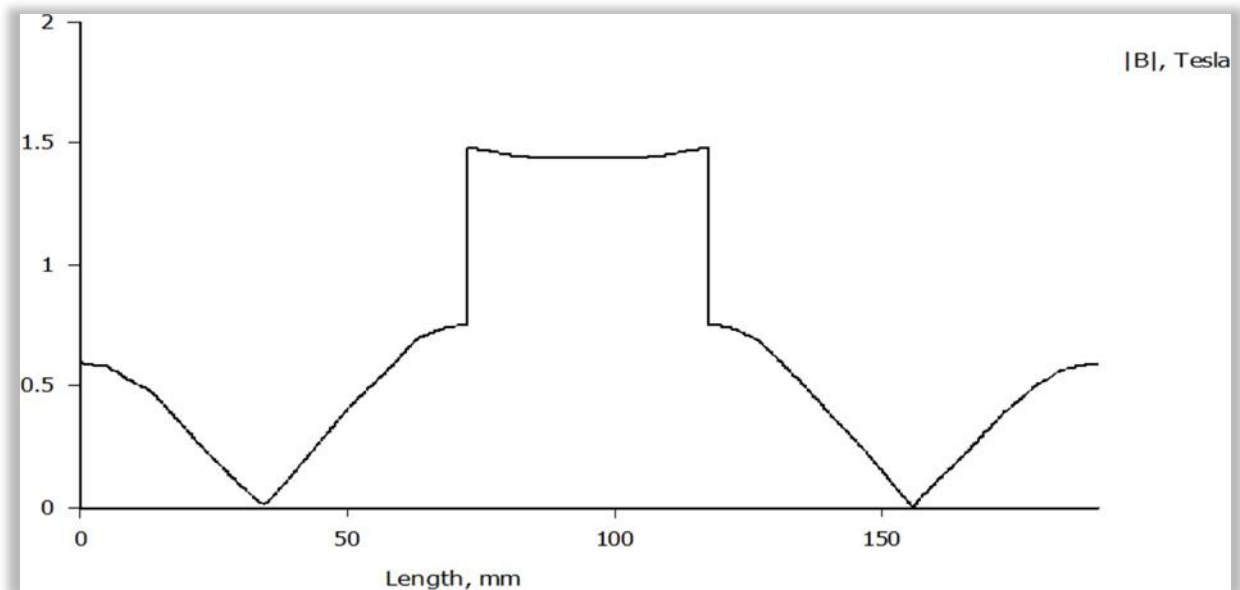


Figure V. 7:L'induction magnétique B le long de l'entrefer dans le cas en présence du Gadolinium

Les figures (V.5) et (V.7) représentent l'induction (B) du matériau en fonction du déplacement. Ces courbes schématisent les phases d'aimantation et de désaimantation réalisées par cette structure.

Différents calculs avec plusieurs valeurs d'induction magnétique B (Voir Annexe A) nous ont permis d'avoir les graphes suivants :

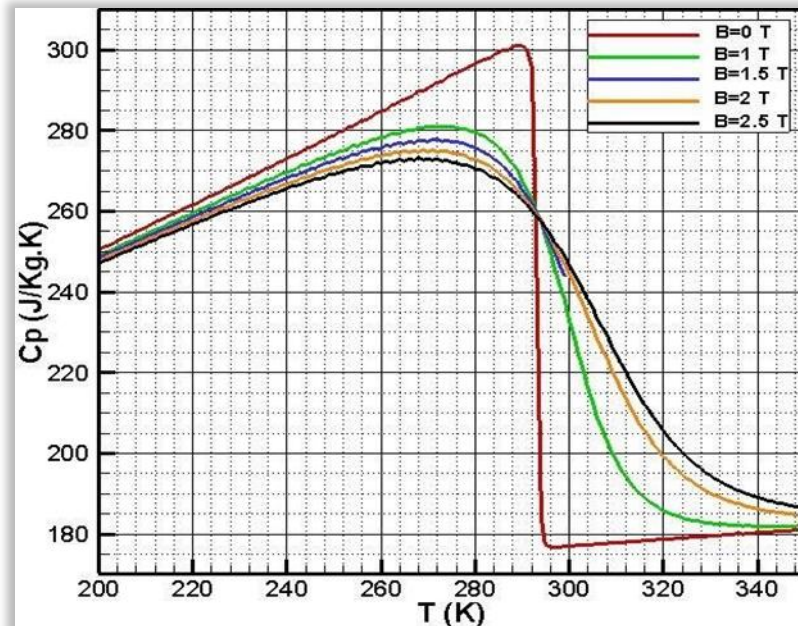


Figure V. 8: Variation de C_p en fonction de T pour différents B

On remarque sur la figure V.8 qu'en présence d'un champ magnétique de différentes inductions ($B \neq 0$), le C_p augmente avec l'augmentation de la température jusqu'à atteindre son maximum au voisinage de $T=273$ K, et diminue avec l'augmentation de la température, tandis qu'en l'absence du champ magnétique ($B=0$) le C_p observe un pic au voisinage de la température de Curie ($T=294$ K) à cause de la transition ferromagnétique à paramagnétique.

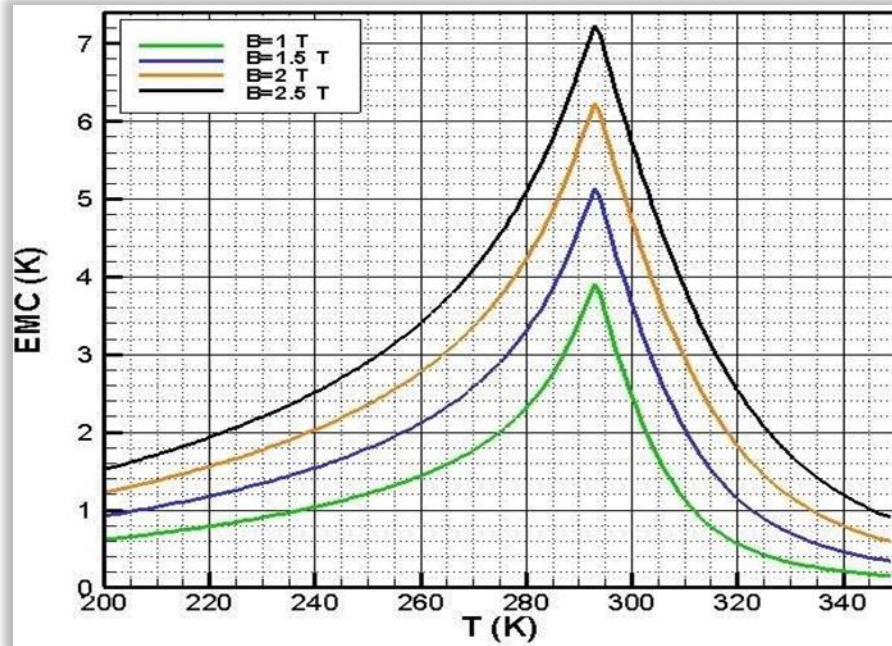


Figure V.9: Variation de l'EMC en fonction de T pour différents B

La courbe représentée sur la figure V.9 montre l'effet magnétocalorique en fonction de la température et des différentes valeurs de champ magnétique.

Ces graphes présentent une transition de phase de l'état ferromagnétique vers l'état paramagnétique au voisinage du point de Curie $T_C=294\text{K}$, avec une évolution proportionnelle suivant l'accroissement du champ magnétique appliqué. Ainsi, ces résultats théoriques sont en très bon accord avec les valeurs rapportées dans la littérature, où la variation de la température adiabatique et la chaleur spécifique dans les mêmes conditions du champ magnétique prennent les mêmes valeurs à $T_C=294\text{K}$

V.4 CONCLUSION

Les résultats obtenus dans ce chapitre nous ont permis de mettre en relief le potentiel de la réfrigération magnétique.

Grâce au logiciel FEMM 4.2, on a pu concevoir un dispositif à aimant permanent qui nous a permis de bien comprendre l'importance du choix de la source de champ.

A l'aide d'un code de calcul qui s'appuie sur la théorie du champ moléculaire, on a pu avoir les graphes du C_p , EMC en fonction de la température.

COCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

S'il existe bien une multitude de moyen de production de froid, la consommation énergétique ou bien l'impact des fluides utilisés sur l'environnement reste les points sombres de tous les systèmes de réfrigération utilisés jusqu'aujourd'hui.

Des recherches ont été entreprises afin d'y remédier à ces problèmes, et parmi les alternatives à ces techniques conventionnelles, la réfrigération magnétique est considérée comme l'une des technologies les plus prometteuses dans le secteur.

A la lumière de cette étude, on a pu voir la faisabilité de la réfrigération magnétique autours de la température ambiante démontré par Zimm (1998) qui a laissé entrevoir de réelles applications potentielles vu son efficacité remarquable et qui offre de nombreux avantages, qui pourrait concurrencer les autres systèmes de réfrigération conventionnelles.

Le froid magnétique présente de véritables avantages potentiels vis-à-vis des machines conventionnelles parmi eux on peut citer :

- Technologie « verte », sans recours aux frigorigènes conventionnels.
- Technologie insonore (sans compresseur). Ceci est appréciable dans les applications médicales, par exemple.
- Efficacité énergétique plus élevées. Des cycles thermodynamiques proches desprocédés de Carnot sont réalisables grâce à la réversibilité de l'EMC.
- Conception simple des machines.
- Coûts de maintenance faibles.
- Basse pression (atmosphérique). Ceci constitue un avantage pour certaines applications telles que le conditionnement d'air fixe et automobile.
- En revanche, il existe des inconvénients :
- Des matériaux à EMCG (Effet Magnétocalorique Géant) doivent être développés pour permettre des fréquences plus élevées dans les réfrigérateurs magnétiques rectilignes ou rotatifs.
- Nécessité de protéger les composants électroniques des champs magnétiques. Mais il faut préciser qu'ils sont statiques, de faible portée et qu'ils peuvent être blindés.
- Les aimants permanents ont une force de champ limitée. Les aimants et les électroaimants supraconducteurs sont (trop) onéreux.

- Les changements de température sont limités. Les systèmes multiétages perdent de l'efficacité à cause du transfert de chaleur entre les étages.
- Les machines mobiles nécessitent une grande précision afin d'éviter une réduction du champ magnétique causée par les écarts entre les aimants et le matériau magnétocalorique.

Dans l'optique de ce travail une présentation globale de cette technologie et revue des travaux antérieurs réalisés par quelques instituts et centres de recherche ont été résumés.

Nous nous sommes penchés sur la présentation de la réfrigération magnétique.

Nous nous sommes intéressés au principe de la technique, et nous avons fait une revue sur les principaux prototypes réalisés pour le moment ; nous avons présenté par la suite l'aspect thermodynamique, les matériaux magnétocaloriques, composition, le fonctionnement et les différents cycles qui régissent les systèmes. Nous avons vu quelques notions de base sur le magnétisme, les différents moyens de génération de champs magnétique nécessaire pour la poursuite du projet, le deuxième aspect de notre travail a porté sur le développement d'un modèle numérique 2D.

En conclusion, le froid magnétique est sans aucun doute une technologie prometteuse qui doit être encouragée en raison de ses nombreux avantages, notamment en termes d'économies d'énergie et d'impact sur l'environnement. Désormais, des prototypes efficaces pour des applications spécifiques doivent être développés afin d'entrer dans la phase de commercialisation de nouveaux réfrigérateurs magnétiques.

ANNEXES

ANNEXE A

Le code de calcul Fortran nous ont permis d'avoir pour différentes valeurs d'induction B, les valeurs des Cp et l'EMC ci-dessous pour une plage de température comprise entre 200K et 300K avec lesquelles on a pu tracer les graphes du chapitre V :

| | B=0 T | | B=1 T | | B=1.5 T | | B=2 T | | B=2.5T | |
|-----|----------|----------|--------|----------|---------|----------|--------|----------|--------|--|
| T | Cp | Cp | EMC | Cp | EMC | Cp | EMC | Cp | EMC | |
| 200 | 250.1325 | 249.1714 | 0.6175 | 248.0903 | 0.9212 | 247.7148 | 1.2213 | 247.1061 | 1.5180 | |
| 201 | 250.7030 | 249.5699 | 0.6246 | 248.6249 | 0.9317 | 248.2391 | 1.2358 | 247.6152 | 1.5360 | |
| 202 | 251.2199 | 250.0582 | 0.6323 | 249.2664 | 0.9430 | 248.7060 | 1.2509 | 248.0704 | 1.5546 | |
| 203 | 251.7905 | 250.6080 | 0.6399 | 249.6486 | 0.9543 | 249.3959 | 1.2643 | 248.5870 | 1.5731 | |
| 204 | 252.3313 | 251.1176 | 0.6477 | 250.1541 | 0.9659 | 249.7347 | 1.2804 | 249.2291 | 1.5910 | |
| 205 | 252.8790 | 251.6425 | 0.6556 | 250.6563 | 0.9776 | 250.2304 | 1.2958 | 249.5605 | 1.6104 | |
| 206 | 253.6313 | 252.1656 | 0.6644 | 251.1674 | 0.9902 | 250.7316 | 1.3122 | 250.0558 | 1.6305 | |
| 207 | 253.9928 | 252.6780 | 0.6726 | 251.6653 | 1.0024 | 251.2169 | 1.3282 | 250.5278 | 1.6502 | |
| 208 | 254.5743 | 253.4223 | 0.6804 | 252.2028 | 1.0145 | 251.7457 | 1.3442 | 251.0445 | 1.6700 | |
| 209 | 255.1148 | 253.7622 | 0.6885 | 252.6976 | 1.0271 | 252.2273 | 1.3607 | 251.5176 | 1.6903 | |
| 210 | 255.6621 | 254.2748 | 0.6970 | 253.3902 | 1.0382 | 252.7070 | 1.3774 | 251.9889 | 1.7109 | |
| 211 | 256.1988 | 254.7845 | 0.7057 | 253.7072 | 1.0518 | 253.3888 | 1.3933 | 252.4570 | 1.7318 | |
| 212 | 256.7690 | 255.3185 | 0.7152 | 254.2295 | 1.0655 | 253.7178 | 1.4113 | 252.9503 | 1.7537 | |
| 213 | 257.5329 | 255.8216 | 0.7243 | 254.7149 | 1.0788 | 254.1901 | 1.4288 | 253.6143 | 1.7731 | |
| 214 | 257.9241 | 256.3779 | 0.7333 | 255.2593 | 1.0921 | 254.7179 | 1.4463 | 253.9483 | 1.7959 | |
| 215 | 258.4541 | 257.0940 | 0.7420 | 255.7312 | 1.1059 | 255.1794 | 1.4644 | 254.3945 | 1.8182 | |
| 216 | 258.9935 | 257.4107 | 0.7511 | 256.2251 | 1.1198 | 255.6617 | 1.4827 | 254.8601 | 1.8407 | |
| 217 | 259.5759 | 257.9486 | 0.7605 | 256.9607 | 1.1320 | 256.1665 | 1.5011 | 255.3532 | 1.8634 | |
| 218 | 260.3349 | 258.4355 | 0.7712 | 257.2402 | 1.1482 | 256.8425 | 1.5197 | 255.7950 | 1.8877 | |
| 219 | 260.7345 | 259.0024 | 0.7809 | 257.7839 | 1.1625 | 257.1759 | 1.5388 | 256.3073 | 1.9110 | |
| 220 | 261.2403 | 259.4648 | 0.7912 | 258.2294 | 1.1776 | 257.6046 | 1.5586 | 256.9564 | 1.9327 | |
| 221 | 261.8011 | 260.2280 | 0.8007 | 258.7336 | 1.1927 | 258.0895 | 1.5783 | 257.2169 | 1.9585 | |
| 222 | 262.3943 | 260.5586 | 0.8107 | 259.2604 | 1.2078 | 258.5979 | 1.5982 | 257.7173 | 1.9829 | |
| 223 | 262.9137 | 261.0347 | 0.8222 | 259.7155 | 1.2224 | 259.0367 | 1.6198 | 258.1332 | 2.0093 | |
| 224 | 263.7741 | 261.5562 | 0.8330 | 260.4867 | 1.2393 | 259.5193 | 1.6406 | 258.6023 | 2.0348 | |
| 225 | 264.0632 | 262.0569 | 0.8440 | 260.7202 | 1.2555 | 260.2501 | 1.6592 | 259.0474 | 2.0609 | |
| 226 | 264.6227 | 262.8153 | 0.8544 | 261.2030 | 1.2720 | 260.4651 | 1.6823 | 259.7416 | 2.0855 | |
| 227 | 265.1794 | 263.1053 | 0.8655 | 261.6949 | 1.2887 | 260.9488 | 1.7041 | 259.9739 | 2.1131 | |
| 228 | 266.0481 | 263.6218 | 0.8780 | 262.1966 | 1.3054 | 261.4197 | 1.7274 | 260.4350 | 2.1414 | |
| 229 | 266.3533 | 264.1298 | 0.8899 | 262.9523 | 1.3230 | 261.8847 | 1.7502 | 260.8748 | 2.1694 | |
| 230 | 266.8935 | 264.6084 | 0.9020 | 263.1674 | 1.3408 | 262.5910 | 1.7717 | 261.2931 | 2.1980 | |
| 231 | 267.4632 | 265.4053 | 0.9133 | 263.6522 | 1.3588 | 262.8150 | 1.7958 | 261.7430 | 2.2268 | |
| 232 | 268.3031 | 265.6340 | 0.9268 | 264.1049 | 1.3785 | 263.2411 | 1.8211 | 262.4322 | 2.2542 | |
| 233 | 268.6089 | 266.1350 | 0.9396 | 264.5809 | 1.3957 | 263.6978 | 1.8456 | 262.6165 | 2.2863 | |
| 234 | 269.1724 | 266.6361 | 0.9526 | 265.3616 | 1.4151 | 264.1444 | 1.8706 | 263.0443 | 2.3168 | |
| 235 | 269.7237 | 267.4088 | 0.9649 | 265.5440 | 1.4347 | 264.8721 | 1.8930 | 263.4532 | 2.3481 | |
| 236 | 270.6172 | 267.6349 | 0.9796 | 266.0026 | 1.4559 | 265.0474 | 1.9220 | 263.8661 | 2.3812 | |
| 237 | 270.8853 | 268.1240 | 0.9935 | 266.4657 | 1.4746 | 265.4780 | 1.9486 | 264.5840 | 2.4098 | |
| 238 | 271.4248 | 268.5831 | 1.0078 | 267.2077 | 1.4959 | 265.8840 | 1.9758 | 264.6956 | 2.4455 | |
| 239 | 272.3550 | 269.4256 | 1.0223 | 267.4161 | 1.5182 | 266.6498 | 2.0022 | 265.1356 | 2.4802 | |
| 240 | 272.5961 | 269.5863 | 1.0372 | 267.8348 | 1.5402 | 266.7596 | 2.0317 | 265.4927 | 2.5151 | |
| 241 | 273.1775 | 270.0743 | 1.0524 | 268.2938 | 1.5605 | 267.1918 | 2.0604 | 266.2095 | 2.5472 | |
| 242 | 274.0126 | 270.4805 | 1.0695 | 269.0029 | 1.5853 | 267.5332 | 2.0918 | 266.2557 | 2.5866 | |

| | | | | | | | | | |
|-----|----------|----------|--------|----------|--------|----------|--------|----------|--------|
| 243 | 274.3482 | 271.3857 | 1.0826 | 269.2085 | 1.6082 | 268.3331 | 2.1190 | 266.7094 | 2.6226 |
| 244 | 274.8977 | 271.5124 | 1.1002 | 269.6302 | 1.6322 | 268.4310 | 2.1510 | 267.0659 | 2.6603 |
| 245 | 275.7383 | 271.8721 | 1.1188 | 269.9611 | 1.6551 | 268.7245 | 2.1847 | 267.3345 | 2.7011 |
| 246 | 276.0189 | 272.7442 | 1.1331 | 270.7919 | 1.6818 | 269.1594 | 2.2167 | 268.0984 | 2.7351 |
| 247 | 276.9464 | 272.8702 | 1.1533 | 270.8880 | 1.7088 | 269.8904 | 2.2483 | 268.1335 | 2.7799 |
| 248 | 277.1861 | 273.2940 | 1.1716 | 271.2748 | 1.7330 | 269.9316 | 2.2838 | 268.4583 | 2.8213 |
| 249 | 277.7425 | 274.1298 | 1.1886 | 272.0494 | 1.7620 | 270.2986 | 2.3199 | 269.1460 | 2.8612 |
| 250 | 278.6586 | 274.1662 | 1.2095 | 272.0679 | 1.7902 | 270.9529 | 2.3532 | 269.1184 | 2.9069 |
| 251 | 278.9156 | 275.0067 | 1.2288 | 272.5060 | 1.8159 | 271.0334 | 2.3922 | 269.4813 | 2.9521 |
| 252 | 279.8264 | 275.0370 | 1.2495 | 273.2075 | 1.8479 | 271.3157 | 2.4303 | 269.7268 | 2.9983 |
| 253 | 280.0362 | 275.4537 | 1.2718 | 273.2466 | 1.8793 | 272.0035 | 2.4671 | 270.4145 | 3.0406 |
| 254 | 280.9837 | 276.2416 | 1.2902 | 273.5655 | 1.9064 | 271.9740 | 2.5087 | 270.3323 | 3.0926 |
| 255 | 281.5352 | 276.2371 | 1.3157 | 274.3077 | 1.9425 | 272.2470 | 2.5512 | 270.5772 | 3.1435 |
| 256 | 281.7510 | 277.0250 | 1.3354 | 274.2744 | 1.9727 | 272.9135 | 2.5898 | 271.2200 | 3.1882 |
| 257 | 282.7509 | 277.0658 | 1.3621 | 275.0328 | 2.0088 | 272.8852 | 2.6360 | 271.1508 | 3.2452 |
| 258 | 282.8766 | 277.7693 | 1.3849 | 274.9278 | 2.0430 | 273.0803 | 2.6827 | 271.3141 | 3.3009 |
| 259 | 283.8868 | 277.7699 | 1.4119 | 275.6335 | 2.0800 | 273.7581 | 2.7230 | 271.9614 | 3.3492 |
| 260 | 284.4037 | 278.4633 | 1.4364 | 275.5121 | 2.1194 | 273.5595 | 2.7761 | 271.7385 | 3.4125 |
| 261 | 284.9820 | 278.4007 | 1.4670 | 276.1703 | 2.1547 | 274.1661 | 2.8225 | 272.2985 | 3.4675 |
| 262 | 285.1824 | 279.1475 | 1.4929 | 276.0919 | 2.1991 | 274.0198 | 2.8765 | 272.1402 | 3.5317 |
| 263 | 286.1216 | 279.3918 | 1.5238 | 276.6608 | 2.2374 | 274.5321 | 2.9266 | 272.2300 | 3.5959 |
| 264 | 286.7589 | 279.3509 | 1.5559 | 276.5983 | 2.2812 | 274.3972 | 2.9837 | 272.8209 | 3.6537 |
| 265 | 287.2525 | 279.9309 | 1.5858 | 277.0953 | 2.3294 | 274.8233 | 3.0378 | 272.4619 | 3.7274 |
| 266 | 287.8479 | 280.1955 | 1.6199 | 276.9446 | 2.3735 | 274.6098 | 3.0993 | 272.9746 | 3.7912 |
| 267 | 288.3831 | 279.9822 | 1.6567 | 277.4551 | 2.4251 | 275.0404 | 3.1567 | 272.6174 | 3.8675 |
| 268 | 288.9986 | 280.6369 | 1.6898 | 277.2482 | 2.4708 | 274.7878 | 3.2225 | 273.0947 | 3.9356 |
| 269 | 289.8697 | 280.6955 | 1.7278 | 277.6637 | 2.5251 | 275.1072 | 3.2851 | 272.6235 | 4.0180 |
| 270 | 290.1013 | 280.8943 | 1.7694 | 277.8204 | 2.5836 | 274.7998 | 3.3572 | 273.0646 | 4.0923 |
| 271 | 290.9787 | 280.9256 | 1.8108 | 277.4012 | 2.6368 | 275.1114 | 3.4227 | 272.5664 | 4.1802 |
| 272 | 291.1582 | 280.9973 | 1.8553 | 277.8446 | 2.6986 | 274.6527 | 3.5030 | 272.8948 | 4.2609 |
| 273 | 292.0968 | 281.0155 | 1.9005 | 277.8122 | 2.7641 | 274.9810 | 3.5729 | 272.3957 | 4.3542 |
| 274 | 292.6211 | 280.9863 | 1.9496 | 277.7349 | 2.8260 | 274.8298 | 3.6546 | 272.6245 | 4.4417 |
| 277 | 294.1541 | 280.5209 | 2.1152 | 277.2474 | 3.0470 | 274.1002 | 3.9196 | 271.4837 | 4.7508 |
| 278 | 295.0443 | 280.2773 | 2.1775 | 277.0059 | 3.1280 | 273.7911 | 4.0157 | 271.6144 | 4.8519 |
| 279 | 295.4831 | 279.8856 | 2.2425 | 276.6409 | 3.2139 | 272.9744 | 4.1230 | 271.1949 | 4.9679 |
| 280 | 295.9317 | 279.8360 | 2.3108 | 276.2430 | 3.3055 | 272.9153 | 4.2240 | 270.3539 | 5.0953 |
| 281 | 296.7572 | 278.9373 | 2.3898 | 275.8102 | 3.4014 | 272.4187 | 4.3356 | 270.3226 | 5.2115 |
| 282 | 297.0663 | 278.6144 | 2.4665 | 275.1814 | 3.5039 | 271.7574 | 4.4556 | 269.6984 | 5.3446 |
| 283 | 297.8519 | 277.5361 | 2.5568 | 274.6277 | 3.6112 | 271.1757 | 4.5783 | 268.7656 | 5.4879 |
| 284 | 298.3872 | 276.9539 | 2.6484 | 273.8146 | 3.7277 | 270.3484 | 4.7123 | 268.4456 | 5.6257 |
| 285 | 298.6309 | 275.9382 | 2.7489 | 273.0577 | 3.8505 | 269.5778 | 4.8498 | 267.7479 | 5.7755 |
| 286 | 299.6485 | 274.6966 | 2.8593 | 272.4672 | 3.9773 | 268.2339 | 5.0049 | 266.8945 | 5.9367 |
| 287 | 299.9034 | 272.9723 | 2.9850 | 271.0511 | 4.1248 | 267.6482 | 5.1536 | 265.6503 | 6.1126 |
| 288 | 300.3931 | 271.7052 | 3.1117 | 269.8239 | 4.2755 | 266.4779 | 5.3191 | 265.0504 | 6.2792 |
| 289 | 300.7564 | 270.2436 | 3.2507 | 268.5081 | 4.4317 | 265.2685 | 5.4940 | 264.0151 | 6.4635 |
| 290 | 300.8917 | 267.8493 | 3.4101 | 267.4607 | 4.6115 | 263.9704 | 5.6784 | 262.8888 | 6.6585 |
| 291 | 301.1100 | 265.5558 | 3.5797 | 265.4744 | 4.7948 | 262.5296 | 5.8723 | 261.6706 | 6.8597 |
| 292 | 300.2045 | 263.0168 | 3.7579 | 264.0846 | 4.9775 | 260.9983 | 6.0691 | 260.0263 | 7.0722 |
| 293 | 295.8431 | 260.1088 | 3.9070 | 261.7602 | 5.1395 | 259.2651 | 6.2306 | 258.9590 | 7.2275 |
| 294 | 254.6866 | 257.3283 | 3.7721 | 259.6834 | 5.0048 | 257.8677 | 6.0963 | 257.5105 | 7.1039 |
| 295 | 184.1707 | 253.6270 | 3.5355 | 257.7726 | 4.7716 | 255.6053 | 5.8653 | 255.9494 | 6.8669 |
| 296 | 177.4026 | 249.9306 | 3.2999 | 254.9760 | 4.5318 | 253.5626 | 5.6259 | 254.2602 | 6.6280 |
| 297 | 176.9491 | 246.0410 | 3.0735 | 252.7242 | 4.2938 | 251.4389 | 5.3909 | 252.1821 | 6.4009 |

| | | | | | | | | | |
|-----|----------|----------|--------|----------|--------|----------|--------|----------|--------|
| 298 | 176.8322 | 241.6417 | 2.8614 | 249.5969 | 4.0754 | 248.8172 | 5.1700 | 250.6780 | 6.1620 |
| 299 | 176.9695 | 237.7667 | 2.6536 | 246.7928 | 3.8566 | 246.8951 | 4.9390 | 248.8276 | 5.9367 |
| 300 | 176.9694 | 233.1387 | 2.4634 | 243.7169 | 3.6492 | 244.4225 | 4.7241 | 246.7988 | 5.7178 |
| 301 | 177.0372 | 228.8037 | 2.2822 | 240.5881 | 3.4499 | 241.8840 | 4.5157 | 244.3888 | 5.5116 |
| 302 | 177.2025 | 224.6292 | 2.1112 | 237.4754 | 3.2575 | 239.3819 | 4.3135 | 242.6912 | 5.2937 |
| 303 | 177.2025 | 220.4183 | 1.9539 | 234.1522 | 3.0759 | 236.6959 | 4.1194 | 240.1156 | 5.1010 |
| 304 | 177.3222 | 216.2965 | 1.8069 | 230.9218 | 2.9055 | 233.7913 | 3.9352 | 238.3044 | 4.8956 |
| 305 | 177.3904 | 212.5950 | 1.6698 | 227.6722 | 2.7363 | 231.4145 | 3.7503 | 236.0425 | 4.7064 |
| 306 | 177.4536 | 208.9239 | 1.5456 | 224.1790 | 2.5836 | 228.4334 | 3.5808 | 233.4260 | 4.5281 |
| 307 | 177.5642 | 206.0150 | 1.4265 | 221.1154 | 2.4345 | 225.8531 | 3.4135 | 231.2088 | 4.3490 |
| 308 | 177.6474 | 202.9929 | 1.3204 | 218.1001 | 2.2939 | 223.5616 | 3.2481 | 229.2753 | 4.1694 |
| 309 | 177.7464 | 200.4086 | 1.2220 | 215.2334 | 2.1611 | 220.7437 | 3.0992 | 226.7125 | 4.0087 |
| 310 | 177.8487 | 198.1346 | 1.1316 | 212.5081 | 2.0360 | 218.3096 | 2.9525 | 224.5237 | 3.8475 |
| 311 | 177.8699 | 195.9061 | 1.0499 | 209.8603 | 1.9187 | 215.8968 | 2.8130 | 222.3047 | 3.6932 |
| 312 | 177.9994 | 194.2731 | 0.9735 | 207.4849 | 1.8105 | 213.6724 | 2.6788 | 220.4762 | 3.5378 |
| 313 | 178.0951 | 192.7056 | 0.9044 | 205.0362 | 1.7047 | 211.4977 | 2.5515 | 218.1370 | 3.3984 |
| 314 | 178.1307 | 191.1125 | 0.8431 | 203.1208 | 1.6101 | 209.4078 | 2.4306 | 216.0835 | 3.2609 |
| 315 | 178.2740 | 190.0909 | 0.7847 | 201.0743 | 1.5185 | 207.2811 | 2.3173 | 214.2077 | 3.1273 |
| 316 | 178.3386 | 188.9860 | 0.7330 | 199.2803 | 1.4329 | 205.6549 | 2.2064 | 212.0546 | 3.0040 |
| 317 | 178.3831 | 187.8934 | 0.6856 | 197.8237 | 1.3555 | 203.9026 | 2.1027 | 210.5228 | 2.8794 |
| 318 | 178.5178 | 187.2267 | 0.6413 | 196.2349 | 1.2816 | 202.1274 | 2.0068 | 208.8418 | 2.7620 |
| 319 | 178.5815 | 186.4901 | 0.6019 | 194.8777 | 1.2120 | 200.8215 | 1.9113 | 207.2198 | 2.6499 |
| 320 | 178.6593 | 185.7335 | 0.5656 | 193.6577 | 1.1480 | 199.2156 | 1.8258 | 205.6496 | 2.5431 |
| 321 | 178.7805 | 185.3351 | 0.5314 | 192.6245 | 1.0879 | 198.1691 | 1.7397 | 204.0187 | 2.4427 |
| 322 | 178.8073 | 184.8054 | 0.5007 | 191.7400 | 1.0316 | 196.7366 | 1.6634 | 202.8353 | 2.3436 |
| 323 | 178.9196 | 184.3983 | 0.4728 | 190.7034 | 0.9802 | 195.8290 | 1.5868 | 201.5502 | 2.2500 |
| 324 | 179.0090 | 184.0324 | 0.4467 | 189.9083 | 0.9316 | 194.6443 | 1.5181 | 200.1392 | 2.1628 |
| 325 | 179.0489 | 183.5738 | 0.4229 | 189.1408 | 0.8864 | 193.6618 | 1.4514 | 199.1776 | 2.0768 |
| 326 | 179.1753 | 183.4218 | 0.4003 | 188.5260 | 0.8430 | 193.0260 | 1.3873 | 197.9449 | 1.9972 |
| 327 | 179.2722 | 183.2217 | 0.3797 | 187.9564 | 0.8033 | 192.1045 | 1.3293 | 197.2093 | 1.9182 |
| 328 | 179.3183 | 182.9293 | 0.3608 | 187.3675 | 0.7666 | 191.4607 | 1.2721 | 196.1946 | 1.8452 |
| 329 | 179.4083 | 182.7595 | 0.3431 | 187.0464 | 0.7313 | 190.6535 | 1.2204 | 195.1700 | 1.7772 |
| 330 | 179.4891 | 182.6255 | 0.3267 | 186.4689 | 0.6993 | 190.0543 | 1.1698 | 194.5805 | 1.7083 |
| 331 | 179.6266 | 182.5073 | 0.3114 | 186.1330 | 0.6687 | 189.6611 | 1.1217 | 193.6582 | 1.6468 |
| 332 | 179.6284 | 182.3166 | 0.2974 | 185.7027 | 0.6398 | 188.9273 | 1.0786 | 193.0695 | 1.5850 |
| 333 | 179.7452 | 182.3438 | 0.2839 | 185.4251 | 0.6124 | 188.5092 | 1.0355 | 192.3039 | 1.5279 |
| 334 | 179.8560 | 182.1895 | 0.2717 | 185.2932 | 0.5876 | 188.2394 | 0.9949 | 191.8873 | 1.4721 |
| 335 | 179.8679 | 182.0593 | 0.2603 | 184.8616 | 0.5635 | 187.6350 | 0.9576 | 191.0943 | 1.4212 |
| 336 | 180.0472 | 182.1048 | 0.2493 | 184.7211 | 0.5410 | 187.5052 | 0.9209 | 190.8647 | 1.3698 |
| 337 | 180.0292 | 181.9303 | 0.2390 | 184.5204 | 0.5200 | 186.9210 | 0.8884 | 190.0817 | 1.3241 |
| 338 | 180.1738 | 182.0513 | 0.2293 | 184.3171 | 0.5003 | 186.8351 | 0.8547 | 189.8984 | 1.2776 |
| 339 | 180.2228 | 181.9186 | 0.2206 | 184.1188 | 0.4809 | 186.4036 | 0.8251 | 189.3029 | 1.2353 |
| 340 | 180.3092 | 181.9018 | 0.2122 | 184.0846 | 0.4636 | 186.2802 | 0.7951 | 189.0807 | 1.1936 |
| 341 | 180.4298 | 181.9397 | 0.2039 | 183.8973 | 0.4463 | 185.9747 | 0.7681 | 188.7585 | 1.1539 |
| 342 | 180.4308 | 181.9123 | 0.1965 | 183.7048 | 0.4305 | 185.6766 | 0.7419 | 188.2111 | 1.1182 |
| 343 | 180.5687 | 181.8983 | 0.1895 | 183.7523 | 0.4157 | 185.6778 | 0.7166 | 188.1072 | 1.0809 |
| 344 | 180.6660 | 181.9898 | 0.1825 | 183.5914 | 0.4009 | 185.3749 | 0.6930 | 187.7069 | 1.0479 |
| 345 | 180.6905 | 181.8860 | 0.1764 | 183.5490 | 0.3878 | 185.3061 | 0.6704 | 187.5359 | 1.0145 |
| 346 | 180.8051 | 181.9424 | 0.1701 | 183.4197 | 0.3746 | 185.0782 | 0.6489 | 187.1967 | 0.9835 |
| 347 | 180.8913 | 182.0172 | 0.1645 | 183.4544 | 0.3624 | 185.0608 | 0.6284 | 187.1223 | 0.9534 |
| 348 | 180.9335 | 181.9456 | 0.1589 | 183.3011 | 0.3508 | 184.8881 | 0.6087 | 186.8582 | 0.9249 |
| 349 | 181.0968 | 182.1208 | 0.1538 | 183.4245 | 0.3395 | 184.7834 | 0.5904 | 186.6617 | 0.8981 |
| 350 | 181.0779 | 181.9793 | 0.1492 | 183.2209 | 0.3291 | 184.6751 | 0.5723 | 186.4992 | 0.8716 |

BIBIOGRAPHIE

- [1] [Allab 03] F. Allab, A. Lebouc, J.M. Fournier, J.P Yonnet, D. Fruchart, D. Gignoux “Réfrigération magnétique : caractérisation des matériaux à EMC géant” Conférence EF'2003 (Décembre 2003), Gif/Yvette – Paris.
- [2] [Allab 2008]: F. Allab, “Conception et réalisation d’un dispositif de réfrigération Magnétique basé sur l’effet magnétocalorique et dédié à la climatisation Automobile”Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, 2008.
- [3] [Bjørk et al., 2008] Bjørk, R., Bahl, C. R. H., Smith, A. ET Pryds, N. (2008). Optimization and improvement of Halbach cylinder design. J. Appl. Phys., 104(1) :013910.1– 013910.9. Doi : 10.1063/1.2952537
- [4] [Bohigas et al. 2000] Bohigas, X., Molins, E., Roig, A., Tejada, J. et Zhang, X.X . (2000). Room-temperature magnetic refrigerator using permanent magnets. IEEE Trans. Magn., 36(3):538–544. Doi: 10.1109/20.846216.
- [5] [Brown 76] G. V. Brown, “Magnetic heat pumping near room temperature” Journal of Applied Physics Volume 47, Issue 8, pp. 3673-3680 (1976).
- [6] [Brown]: Brown, G. V. (1978). Magnetic heat pumping.
- [7] [Bruck, 2005] : ”Développements in magnétocalorique réfrigération”. J. Phys. D : Appl. Phys., 38(23) :R381–R391.
- [8] [Charlotte MAYER] : Nouveaux matériaux magnétocaloriques pour la réfrigération magnétique. Thèse Ecole Doctorale des Sciences Chimique Université Bordeaux 1 France 2011.
- [9] [Chell et Zimm, 2006] Chell, J. et Zimm, C. B. (2006). Permanent magnet assembly. U.S.Patent No. 7,148, 777.
- [10] [De Lacheisserie 99]E. T. de Lacheisserie “Magnétisme tome 1 : Fondements ”EDP Sciences, ISBN 2-86 883-464-7 (2000).
- [11] [Farid ALLAB] : Etude et conception d'un dispositif de réfrigération magnétique basé sur l'effet magnétocalorique géant. Thèse institut polytechnique de Grenoble France 2008.

- [12] [Halbach, 1980] Halbach, K. (1980). Design of permanent multipole magnets with oriented rare-earth cobalt material. *Nuclear Instruments & Methods*, 169(1) :1–10. Doi : 10.1016/0029-554X(80)90094-4
- [13] [Houssef Rafik El-Hana BOUCHEKARA] : Recherche sur les systèmes de réfrigération magnétique. Modélisation numérique, conception et Optimisation. Thèse Institut Polytechnique de Grenoble France 2008
- [14] [Julien ROUDAUT] : Modélisation et conception de systèmes de réfrigération magnétique autour de la température ambiante. Thèse Université de Grenoble France 2006.
- [15] [Kirol et Dacus, 1988] : Kirol, L. D. et Dacus, M. W. (1988). Rotary recuperative.
- [16] [Lebouc 2005] : A. Lebouc, F. Allab, J.M. Fournier, J.P Yonnet, “Réfrigération Magnétique”, [RE 28], Techniques de l’Ingénieurs, 2005.
- [17] [Lebouc 2005]: Réfrigération magnétique. Techniques de l’Ingénieurs, 2005.
- [18] [Lee et al. 2002] Lee, S. J., Kenkel, J. M., Pecharsky, V. K. et Jiles, D. C. (2002). Permanent magnet array for the magnetic refrigerator. *J. Appl. Phys.*, 91(10):8894–8896. Doi :10.1063/1.1451906.
- [19] [Okamura 2007] T. Okamura, K. Yamada, N. Hirano, S. Nagaya “Improvement of 100W class room temperature magnetic refrigerator”. *International Conference on Magnetic Refrigeration at Room Temperature*.
- [20] [Okamura et al. 2007] Okamura, T., Rachi, R., Hirano, N. et Nagaya, S. (2007). Improvement of 100 W class room temperature magnetic refrigerator. In *Proc. Second IIF-IIR International Conference on Magnetic Refrigeration at Room Temperature*, pages 377–382, Portoroz, Slovenia.
- [21] [Okamura et al. 2006] Okamura, T., Yamada, K., Hirano, N. et Nagaya, S. (2006). Performance of a room-temperature rotary magnetic refrigerator. *Int. J. Refrigeration*, 29(8):1327–1331. Doi: 10.1016/j.ijrefrig.2006.07.020.
- [22] [Pecharsky et Gschneidner Jr., 1997]: “Tunable magnetic regenerator alloys with a géant Magnetocaloric effect f magnetic refrigeration from 20 to 290 k”. *Appl. Phys. Lett.*, 70(24):3299–3301
- [23] [Steyert, 1978]: Steyert, W. A. (1978). Sterling-cycle rotating magnetic refrigerators and heat engines for use near room temperature.

- [24] [Tishin et Spichkin, 2003]: Tishin, A. M. et Spichkin, Y. I. (2003). The Magnetocaloric Effect and it's Applications. Series in Condensed Matter Physics. Institute of Physics Publishing, Bristol. ISBN 0-750-30922-9.
- [25] [Tura 2002]: A. Tura, "Active Magnetic Regenerator Experimental Optimization", Master of Applied Science, Université de Victoria, 2005.
- [26] [Tura]: A. Tura, "Active Magnetic Regenerator Experimental Optimization", Master of Applied Science, 2002.
- [27] [Tura 2]: Design and Analysis of a Nested Halbach Permanent Magnet. Magnetic Refrigerator.
- [28] [Ulrich LEGAIT] : Caractérisation et modélisation magnétothermique appliquée à la réfrigération magnétique. P5. Thèse Université de Grenoble France 2006.
- [29] [Vasile et Muller, 2006] Vasile, C. et Muller, C. (2006). Innovative design of a magnetocaloric system. *Int. J. Refrig.*, 29(8):1318–1326. Doi: 10.1016/j.ijrefrig
- [30] [Yu] B.f. Yu, Q. Gao, B. Zhang, X.Z. Meng, Z. Chen, "Review on Research of Room Temperature Magnetic Refrigeration", *International Journal of Refrigeration*.2003
- [31] [YU 2003]: B.f. Yu, Q. GAO, B. Zhang, X.Z. Meng, Z. Chen, "Review on Research of Room Temperature Magnetic Refrigeration", *International Journal of Réfrigération* 26, 622-636, 2003.
- [32] [Zheng et al. 2009] Zheng, Z. G., Yu, H. Y., Zhong, X. C., Zeng, D. C. et Liu, Z. W. (2009). Design and performance study of the active magnetic refrigerator for room-temperature application. *Int. J. Refrigeration*, 32(1):78–86. Doi: 10.1016/j.ijrefrig.2008.06.004
- [33] [Zimm et al., 2007] Zimm, C. B., Auringer, J., Boeder, A., Chell, J., Russek, S. L. et Sternberg, A. (2007). Design and initial performance of a magnetic refrigerator with a rotating permanent magnet. In *Proc. Second IIF-IIR International Conference on Magnetic Refrigeration at Room Temperature*, pages 341–347, Portoroz, Slovenia
- [34] [Zimm 98]Zimm C, Jastrab A, Sternberg A, Pecharsky VK, Gschneider Jr KA, Osborne M, Anderson I. "Description and performance of near-room temperature magnetic refrigerator" *Advances in Cryogenic Engineering* 43, pp.1759-1766 (1998)

- [35] [Zimm] C. Zimm, A. Boerder, J. Chell, A. Sternberg, A. Fujita, S. Fujieda, K. Fukamichi, “Design and performance of a permanent-magnet rotary refrigerator”, *International Journal of Refrigeration*.
- [36] [Z.Brissonneau, 1997] Brissonneau, P. (1997). *Magnétisme et matériaux magnétiques pour l'électrotechnique*. Hermès, Paris. ISBN 2-86601-579-7.
- [37] [Leupold et al., 1988] Leupold, H. A., Potenziani II, E. et Abele, M. G. (1988). Applications of yokeless flux confinement. *J. Appl. Phys.*, 64(10) :5994–5996. doi : 10.1063/1.342148.
- [38] [Tura et Rowe, 2007] Tura, A. et Rowe, A. (2007). Design and testing of a permanent magnet magnetic refrigerator. In *Proc. Second IIF-IIR International Conference on Magnetic Refrigeration at Room Temperature*, pages 363–370, Portoroz, Slovenia.