**UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA**

Faculté de Technologie

Département de Génie Électrique

**Mémoire de fin d'études pour l'obtention du Diplôme de Master**

Filière : **ENERGIE RENOUVLABLE**

Spécialité : **Génie ELECTRIQUE**

# *SIMULATION NUMERIQUE DE CHAMP MAGNETIQUE AUTOUR D'UN AIMENT PERMANANT DANS UN DISPOSITIF DE REFRIGERATION PROPRE*

**Prépare par l** *dirigé par :*

- *Omar taha* **dr. Chiba youness*
- *Boussouar Mohamed el amine* **dr. kehailiche brahim*

**Promotion 2021/2022**

# Remerciements

*Avant tout, nous remercions ALLAH de nous avoir donné le courage, la patience et la volonté pour Achever ce travail.*

*Technologique de l'Université de Médéa.*

*Nous remercions notre promoteur* ***Dr Chiba Younes*** *qui a toujours été à l'écoute et disponible lors de l'établissement de ce mémoire et pour la confiance qu'ils ont placés en nous tout au long de ce travail.*

*Et Co-promoteur* ***Dr. kehailiche brahim*** *pour m'avoir suivi avec patience et intérêt dans ce travail leurs conseils précieux et leurs encouragement m'ont été d'une aide très importante dans la réalisation de ce projet nous tenons tout d'abord à remercier les membres de jury qui nous font l'honneur de juger à*

*ce travail. Nous remerciements Plus également tous les enseignants et les étudiants du département de la science de Technologie*

# *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail à*

*Ma très chère mère, qui a toujours été présente pour moi, dans lesmoments les plus difficiles et qui sans cesse veille sur moi avec ses prières, pour ses grands sacrifices et tout l'amour quelle me porte.*

*Mon très cher père, pour tous ses conseils et pour toute la confiancequ'il a mise en moi et pour son dévouement pour*

*mon bonheur de ma femme*

*A mes chers sœurs*

*A ma cher tante Masouda*

*A tous mes amis et spécialement rafik et tadjo & aziz &lahcen & mokhtar*

***Taha***

# *Dédicaces*

*Je dédie ce travail :*

*A mes parents qui mes sont très chers et dont le soutien m'ont toujours aidé à réussir dans la vie J'espère qu'ils sont*

*Fières de moi et de mon travail, car je suis fierté d'avoir des tels parents. Aucune dédicace ne pourra exprimer la profondeur de mes sentiment.*

*Je dédie ce travail à mes frères :*

*Taha & djamel*

*A toute ma famille*

*A tous mes amis :*

*Tadjo & sidali & moncenf*

*A tous ceux qui m'ont aidé, de près ou de loin, même avec un mot d'encouragement.*

***Mohamed el amine***

**RESUME**

La réfrigération magnétique, qui fait l'objet des travaux de thèse présentés ici, est une technologie de production de froid basée sur un phénomène physique appelé effet magnétocalorique.

Ce travail de mémoire se situe dans le domaine de l'étude de ces matériaux et des dispositifs de réfrigération magnétique à aimants permanents autour de la température ambiante. D'autre part, un système complet de réfrigération magnétique à aimants permanents initié par une thèse précédente a été réalisé et testé.

**ملخص**

التبريد المغناطيسي، وهو موضوع البحث المقدم هنا، هو تقنية إنتاج بارد تعتمد على ظاهرة فيزيائية تسمى التأثير المغناطيسي.

هذه المذكرة في مجال دراسة هذه المواد وأجهزة التبريد المغناطيسية ذات المغناطيس الدائم حول درجة الحرارة المحيطة. من ناحية أخرى، تم إنتاج واختبار نظام تبريد مغناطيسي كامل بمغناطيس دائم بدأه أطروحة سابقة.

**ABSTRACT**

Magnetic refrigeration, which is the subject of the thesis work presented here, is a cold production technology based on a physical phenomenon called the magnetocaloric effect.

This thesis work is in the field of the study of these materials and magnetic refrigeration devices with permanent magnets around the ambient temperature. On the other hand, a complete magnetic refrigeration system with permanent magnets initiated by a previous thesis has been realized and tested

**Mots clé:** Refrigeration magnétique - effet magnetocalorique - CMSOL**.**

# SOMMAIRE

# SOMMAIRE

## Table des matières

**Introduction générale** ..... II
CHAPITRE I ..... 1
Généralités Sur La Réfrigération Magnétique ..... 1
**1.1-Introduction** ..... **2**
**1.2- Historique et revue des travaux antérieurs** ..... **3**
**1.3- Principaux démonstrateurs de réfrigération magnétiques** ..... **6**
**Démonstrateur de NASA, USA** ..... **6**
**1.4 Démonstrateur de Astronautics USA** ..... **6**
**1.5- Démonstrateur de Université of Western Switzerland** ..... **8**
**1.6- Cycles de réfrigération magnétique** ..... **8**
**I.7- : Cycle magnétique de Brayton** ..... **9**
**1.8 Cycle magnétique d'Ericsson** ..... **9**
**1.9 Critères de sélection de réfrigérant magnétique** ..... **10**
**1.10 Effet magnétocalorique (EMC)** ..... **11**
**1.10.1- Définition** ..... 11
**1.10.2- Principe :** ..... 11
**1.10.3- Matériaux magnétocaloriques** ..... 13
**1.11-Classification des matériaux magnétiques** ..... **15**
**1.12- Sources de champ magnétique** ..... **17**
**1.12-1 Électro-aimants** ..... 17
**1.12.2-Bobines supraconductrices** ..... 17
**1.12-3Aimants permanents** ..... 18
**1.13 Conclusion :** ..... **18**
**CHAPITRE II** ..... **19**
**2.1-Introduction** ..... **20**
**2.2-Description de l'effet magnétocalorique (MCE)** ..... **20**
**2.3-Observation du phénomène d'hystérésis** ..... **22**
**2.4-Association série d'un matériau d'oux et d'un matériau dur :** ..... **29**
**2.5-Désaimantation** ..... **30**
**2.6-Objectif de la fabrication** ..... **30**
**2.7-Détermination des dimensions L et S du matériau dur** ..... **31**

# SOMMAIRE

**2.8 Conclusion** ..... **32**
**CHAPITRE III** ..... **33**
**3.1 Introduction :** ..... **34**
**3.2 Interprétation des résultats :** ..... **41**
**3.3 Conclusion** ..... **41**
**Conclusion General** ..... 43
**4.1 Reference bibliographique** ..... 46

# LES DES FIGURE


| N° | FIGURE | PAGE |
|---|---|---|
| **1.1** | présente aussi les quatre étapes fondamentales d'un procédé de réfrigération conventionnel. | **4** |
| **1.2** | Variation de la température adiabatique et de l'entropie magnétique pour un champ | **5** |
| **1.3** | démonstrateur de la NASA réalisé par Brown et son équipe | **6** |
| **1.4** | Démonstrateur de RM développé récemment par Astronautics (Jacobs et al. | **7** |
| **1.5** | démonstrateurs de RM rotatif développé par HES-SO (Sari et al. 2006) Cycles de réfrigération magnétique | **8** |
| **1.6** | Les cycles de la réfrigération magnétique de Brayton | **9** |
| **1.7** | Les cycles de la réfrigération magnétique d'Ericsson | **10** |
| **1.8** | Schéma de principe de l'effet magnétocalorique | **12** |
| **1.9** | Effet magnétocalorique fleshes symbolisant l'orientation des moments magnétique | **12** |
| **1.10** | Schématisation de l'effet magnétocalorique | **13** |
| **1.11** | Types matériaux magnétocalorique | **14** |
| **1.12** | Variation de l'effet magnétocalorique de l'entropie magnétique en fonction de fonction de champ magnétique pour différents matériaux magnétocalorique (Gschneidner Jr et al 2005) | **15** |
| **1.13** | Cycle hystérésis B (H). | **16** |

# LES DES TABLEAUX


| N° | TABLEAUX | PAGE |
|---|---|---|
| **1.1** | Classification des matériaux magnétiques. | **16** |

# *INTRODUCTION*

# INTRODUCTION

## Introduction générale

Le mémoire sera composé de trois chapitres. Dans ce premier chapitre introductif nous retrouverons une étude bibliographique nécessaire et généralités de réfrigération magnétique.

Le deuxième chapitre sera contiens une modélisation des équations pour faire une simulation d'un aiment permanant.

La troisième chapitre nous discutons les résultats obtenus dans cette simulation avec des figures par le programme COMSOL.

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 permanents.

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 mentionnée comme la possibilité de réaliser des systèmes compacts, le matériau étant solide et non gazeux, l'absence 2 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 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, aboutir à des systèmes industriels tels sont les challenges que se sont fixés un certain nombre de groupes de recherche universitaire en partenariat fort avec des industriels.

C'est aussi celui du groupe grenoblois créé il y a environ 6 ans dans lequel a été mené ce travail de thèse et qui fait collaborer l'Institut Néel, le G2Elab et le CRETA. Cette thèse a été consacrée plus particulièrement à l'étude et la modélisation de la réfrigération magnétique. Elle avait pour objectif de développer, et d'offrir par la même occasion aux chercheurs et aux industriels, des outils de calculs, d'analyse et d'optimisation pour étudier, concevoir et développer des systèmes de réfrigération magnétique.

Les travaux réalisés ont été focalisés sur les cycles thermiques et les sources de champ magnétique. Ces deux axes définissent ainsi les trois volets suivants développés dans ce mémoire de thèse : Réfrigération magnétique : C'est un volet introductif auquel a été consacré le premier chapitre. Nous y détaillerons le principe de la réfrigération magnétique et nous donnerons les définitions nécessaires qui permettent de mieux la cerner.

L'effet magnétocalorique (EMC) a été découvert par Warburg3 vers la fin du 19ième siècle. La nature de l'EMC et son utilisation pour atteindre des températures près du zéro absolu ont été suggérées indépendamment par Debye4 en 1926 et Giauque5 en 1927. Depuis, la démagnétisation adiabatique est la méthode privilégiée pour la réfrigération à très basse température (sous 4 K). Cependant, sans régénération thermique, l'abaissement de température est limité à la valeur de l'EMC (2 ou 3 Ktf) autour de la température de transition du matériau magnétique.

L'utilisation de la RM à plus haute température et sur une plus grande étendue de température avec un cycle thermodynamique comprenant de la régénération n'a été suggérée qu'à partir du milieu des années 19606 . Au cours des 20 dernières années, quelques prototypes ont étés conçus pour opérer à des températures supérieures à 20 K. Ironiquement, beaucoup de ces prototypes nécessitent l'utilisation d'un électro-aimant supraconducteur, donc maintenu à très basse température (4-8 K), pour produire un champs magnétique suffisant (2 à 7 teslas).

Les performances et l'efficacité obtenus sont encore loin des prédictions, mais la

technologie progresse et laisse présager un avenir prometteur. 2 Au début des années 90, Astronautics Corporation of America7 publie les résultats de tests menés avec un appareil de démonstration de la réfrigération magnétique opérant à partir de la température de l'azote liquide (77 K). Sans charge utile à réfrigérer, la température est descendue jusqu'à 34 K à l'extrémité froide du régénérateur, n'atteignant pas l'objectif de 20 K, la température de liquéfaction de l'hydrogène.

Pour éliminer les difficultés de design associées à la température cryogénique, la recherche s'est par la suite principalement orientée sur le premier étage de réfrigération, près de la température ambiante. Le matériau privilégié près de la température ambiante est le gadolinium (Gd), un élément de la série des lanthanides qui a un EMC élevé (2 ou 3 Kff) et dont la température de transition, le point de Curie dans ce cas, est de 293 K. En 1998, Astronautics et Ames Laboratory8 rapportaient les performances d'un réfrigérateur, fonctionnant avec du Gd et un champ magnétique de 5 T, pouvant atteindre une puissance de réfrigération appréciable, soit 600 W pour une plage de 10 K.

L'équipe soutenait qu' en soustrayant plusieurs pertes évitables, le prototype pourrait fonctionner avec une efficacité équivalant à 60% de celle du cycle de Carnot, le cycle idéal. Ils rapportèrent aussi qu'avec un champ magnétique d'une intensité de 1.5 T, qui peut être produit par un aimant permanent, l'appareil avait atteint une puissance de réfrigération de 200 W sur une plage de température de 7 K. C'était la confirmation de l'idée que la RM pouvait fonctionner avec une puissance acceptable en n'utilisant qu'un aimant permanent.

En 2000, la compagnie japonaise Chubu Electric Power en collaboration avec Toshiba9, annonçait le développement d'un réfrigérateur magnétique semblable avec une puissance de 100 W sur une plage de 23 K et avec un champ magnétique de 4 T. Un regain d'intérêt pour la réfrigération magnétique en 2001 quand Astronautics et Ames Laboratory2 annoncèrent le développement d'un réfrigérateur magnétique utilisant un aimant permanent de 1.5 T et pouvant réfrigérer une cinquantaine de watts sur 10 K à partir de la température ambiante.

En 2002 et 2003 l'équipe Chubu-Toshiba1o annonçait le développement de prototypes fonctionnant avec un aiment permanent de 0.6 T et de 0.76 T mais en utilisant des alliages de Gdl-xDyx (x=0.11 , 0.13, 0.16). En 2003, la réalisation de prototypes de réfrigérateurs magnétiques utilisant un aimant permanent et du Gd fut aussi annoncée par une équipe du Sichuan Institute of Technologie et de 3 Nanjing University!! Ainsi que par une équipe du Laboratoire d'Électrotechnique de Grenoble12 •

# INTRODUCTION

Un résumé des données disponibles sur les performances de ces appareils est présenté à l'annexe 1, la méthode de calcul de l'efficacité thermodynamique est revue dans la section 3.1.4. Malgré ces percées, il ne semble pas, encore aujourd'hui, qu'un réfrigérateur magnétique fonctionnant à partir de la température ambiante n'ait été suffisamment performant pour en débuter la production commerciale. Même si quelques prototypes ont été élaborés, plusieurs questions concernant le design d'un réfrigérateur magnétique demeurent en suspens.

Quelle serait le matériau magnétique idéal pour le cycle RMA? Quelle masse de matériaux devrait-elle être utilisée? Quelles seront les conditions d'opération optimales et leur lien avec les propriétés des matériaux? Comment augmenter l'efficacité du régénérateur? Les relations analytiques utilisées en RM sont souvent d'une utilité limitée et les modèles numériques sont rarement confrontés à la réalité des expériences. Une étude expérimentale des propriétés des régénérateurs magnétiques, le cœur du réfrigérateur, est donc nécessaire à l'obtention d'informations fortes utiles pour le design de réfrigérateur. Pour répondre à ce besoin, en 2002, Rowe et Barclay de l'Université de Victoria 13 achevaient la construction d'un appareil de RM appelé AMRTA pour« active magnétique régénérateur test apparats».

Cet appareil a été conçu pour permettre de mieux comprendre les phénomènes liés à la réfrigération magnétique et d'assurer la caractérisation dynamique des régénérateurs magnétiques actifs. Deux points limitent beaucoup la plage de température opérationnelle d'un stage de réfrigération magnétique. En premier lieu, en réfrigération, plus on abaisse la température, plus les fuites de chaleur à partir du milieu ambiant sont importantes et plus la puissance de réfrigération de l'appareil devra être élevée. Cet effet ne peut être minimisé qu'en s'assurant d'avoir une bonne isolation thermique. En second lieu, l'EMC du matériau est maximum autour de sa température de transition magnétique et diminue rapidement en s'en éloignant. En augmentant la plage de température du réfrigérateur, on s'éloigne donc de la température à laquelle le matériau est performant. La majorité des prototypes mentionnés plus haut ont utilisé un seul matériau magnétique comme 4 réfrigérant. La combinaison de plusieurs couches de matériaux différents dans un seul régénérateur apporte une solution à ce problème. Cela aurait pour effet d'augmenter la puissance de réfrigération ou la capacité à abaisser la température du réfrigérateur et ce, pour une même masse de réfrigérant. L'utilisation de plusieurs couches de matériaux pourrait donc réduire significativement le coût d'un réfrigérateur magnétique et permettre éventuellement d'atteindre la température de l'hydrogène liquide.

# INTRODUCTION

Ce principe a été énoncé au début des années 198014 et est largement accepté. Cependant, à notre connaissance, il n'y a eu qu'une seule tentative pour comparer expérimentalement un régénérateur composé de couches de plusieurs matériaux à un régénérateur utilisant un seul matériau. Elle a été réalisée au David Taylor Research Center en 199015 et n'a pas été concluante. La réussite de cette démonstration et, plus important encore, la détermination d'une règle

claire sur la façon d'arranger les matériaux sont des étapes nécessaires au développement de liquéfacteurs magnétiques.

# *CHAPITRE I*
# *Généralités Sur La Réfrigération Magnétique*

# CHAPITRE I : GENERALITES SUR LA REFRIGERATION MAGNETIQUE

## 1.1-INTRODUCTION

La réfrigération magnétique est considérée actuellement comme l'une des alternatives les plus prometteuses, pour remplacer les systèmes de réfrigération classique. En effet, elle pourrait s'avérer énergiquement plus efficace et avec des densités de puissance importante et laisse entrevoir de nombreuses applications : réfrigération domestique ou industrielle, climatisation de bâtiment ou de véhicule, refroidissement de systèmes portables,…. etc., Elle possède plusieurs avantages tels qu'on peut citer :

Absence de polluant atmosphérique qui contribue à l'effet de serre comme le chlorofluorocarbure (*CFC*) ou ses substituts hydro chlorofluorocarbure (*HCFC*) et hydrofluorocarbure (*HFC*), les fluides utilisés dans les démonstrateurs étant l'eau ou le glycol.

Absence de bruits et de vibrations grâce à la suppression de compresseur. Efficacités thermodynamique pouvant atteindre plus de 60% de l'efficacité de *Carnot*, à comparer au cycle thermodynamique conventionnel (au mieux 40%).

Le coefficient de performance énergétique (*COP*) du système de réfrigération est de 2 à 3fois supérieure à celui de la réfrigération classique.

Possibilités de réaliser des systèmes compactes avec de fortes densités, le matériau étant solide et non gazeux.

Cette synthèse de recherche sur la réfrigération magnétique repose sur un phénomène connu sous le nom de l'effet magnétocalorique (*EMC*).

## 1.2- Historique et revue des travaux antérieurs

L'effet magnétocalorique a été découvert par Warburg en 1881 [13].

Il se manifeste dans certains matériaux magnétocaloriques à des températures proches de leur température de changement de phase magnétique (la température de Curie). Ces matériaux ont la propriété de s'élever en température lorsqu'ils sont soumis à un champ magnétique et se refroidissent de ce même écart de température lorsque ce champ est éliminé comme le montre les figures (1.1),(1.2).

Ce changement de température est attribué au couplage entre le magnétisme et le réseau atomique du matériau considéré en présence d'un champ magnétique extérieur. En appliquant un champ magnétique, les moments magnétiques ont tendance à s'aligner selon la direction du champ appliqué, ce qui réduit l'entropie magnétique du matériau.

Dans des conditions adiabatiques, la diminution de l'entropie magnétique est accompagnée par un désordre au niveau de l'arrangement atomique ce qui augmente la température du matériau. En supprimant le champ extérieure, ces moments magnétiques retournent à leur état désordonné, l'entropie magnétique augmente, l'entropie du réseau diminue et par conséquent le matériau se refroidit [6].

La fgure(1.1) montre que le principe de la réfrigération magnétique est similaire à celui de réfrigération conventionnel ;la seule déférence est que le compresseur et le fluide frigorigène dans le cas conventionnel ont été remplacés par le régénérateur(matériau magnétocalorique) et le fluide caloporteur respectivement dans le cas de réfrigération magnétique

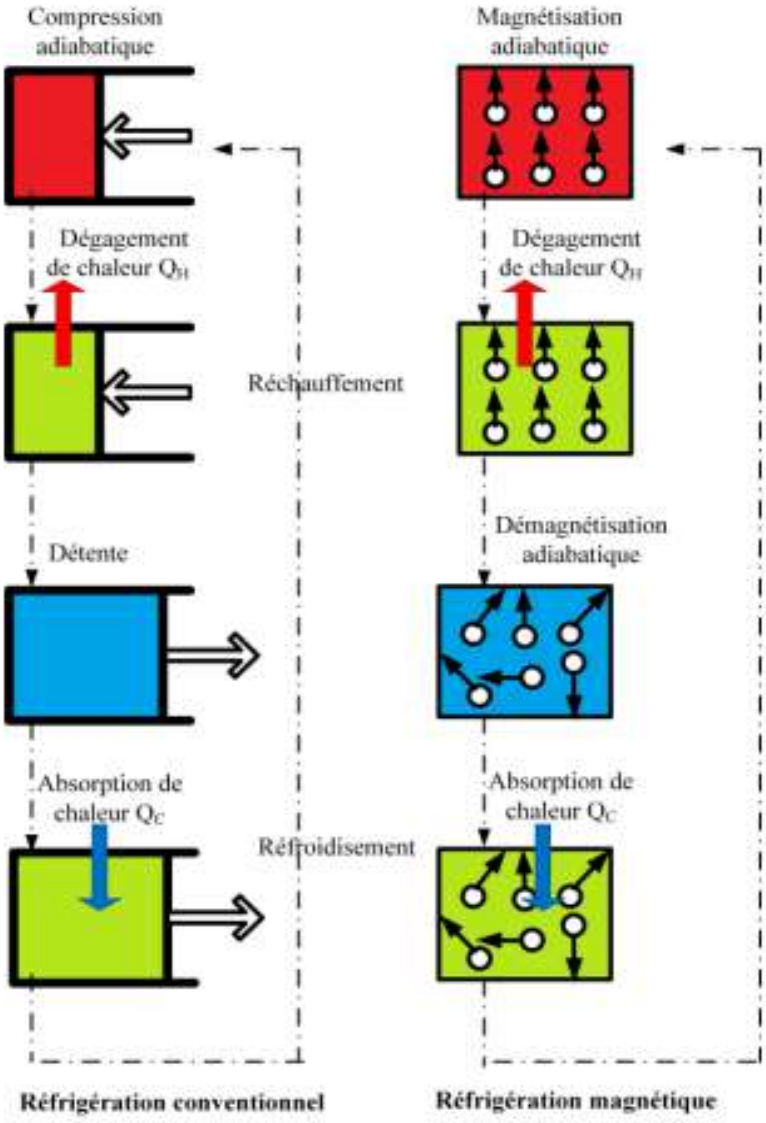



**figure I.1 1**présente aussi les quatre étapes fondamentales d'un procédé de réfrigération conventionnel.

Celles-ci sont la compression du gaz au niveau du compresseur, le dégagement de la chaleur dans le condenseur (source chaude), la détente du gaz et l'absorption de la chaleur au niveau de l'évaporateur (source froide). Les étapes de dégagement de chaleur et de détente engendrent le processus de refroidissement en deux étapes. Les étapes du procédé de réfrigération magnétique sont analogues.

En comparant entre les deux procédés, on peut voir qu'au lieu de la compression du fluide frigorigène, un matériau  magnétocalorique est placé dans un champ magnétique et qu'au lieu champ. Comme il est expliqué dans la partie précédente, ces procédés changent la température du matériau et la chaleur peut être dégagée ou absorbée, comme dans le procédé conventionnel.

En revanche, il existe des différences entre les deux procédés. L'absorption et le dégagement de chaleur par un fluide frigorigène constituent un processus relativement rapide, car les mouvements turbulents transfèrent la chaleur très rapidement. Mais, ce n'est pas le cas pour les matériaux magnétocaloriques.

Car, le mécanisme de transfert de chaleur ici s'effectue par convection d'une manière très lente.

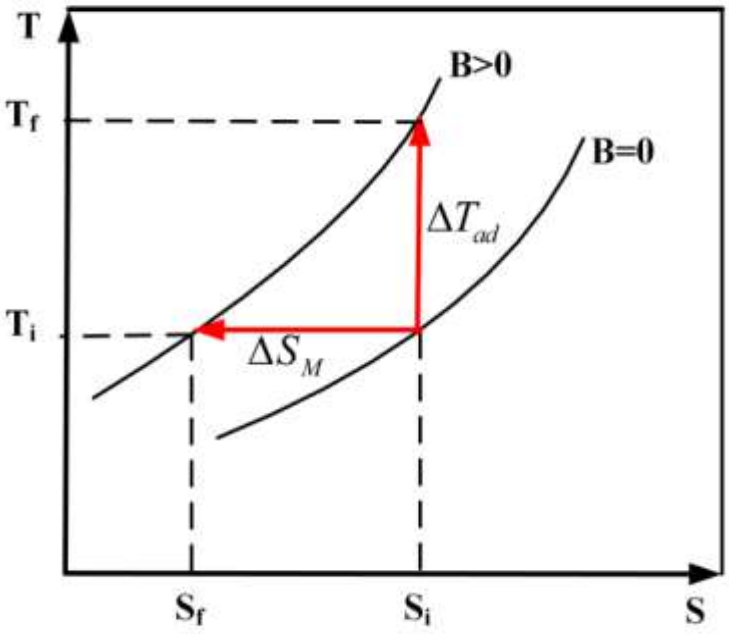



**Figure 1.2:Variation de la température adiabatique et de l'entropie magnétique pour un champ**

Il convient de souligner que ces dernières années de nombreuses manifestations scientifiques spécialisées sur les recherches en froid magnétique ont été organisées par l'Institut International du Froid (IIF-IIR) à Paris. [4]

La première conférence de froid magnétique près de la température ambiante (Thermag) a été organisée en Suisse à Montreux en 2005 par les professeurs Egolf et Sari [4, 5], dont les objectifs sont focalisés sur les deux volets suivants:

Recherches orientées vers le développement de nouveaux matériaux magnétocaloriques visant à remplacer le gadolinium par d'autres matériaux plus performants en satisfaisant les exigences économiques et thermiques.

Les matériaux magnétocaloriques destinés à la réfrigération magnétique proche de la température ambiante, doivent présenter un effet magnétocalorique (EMC) important [6],

c'est-à-dire avoir des variations de température élevées pour des inductions magnétiques

faibles [6].

Pour ce faire, il faut qu'ils regroupent deux conditions : Une variation de température adiabatique élevée au voisinage de température de transition. Une variation d'entropie-magnétique élevée, ceci se traduit par un moment magnétique élevé ou/et une large transition de phase magnétique de premier ordre.

### 1.3- Principaux démonstrateurs de réfrigération magnétiques

**Démonstrateur de NASA, USA**

En 1976, Brown [17, 18] a conçu le premier démonstrateur de réfrigération magnétique près de la température ambiante (figure1.6), utilisant des supraconducteurs qui génèrent un champ magnétique de 7T et un régénérateur passif. Il s'agit d'un démonstrateur linéaire constitué d'un bloc de gadolinium perforé pour permettre le passage du fluide caloporteur durant le cycle vers les échangeurs situés aux extrémités de la colonne verticale. Au premier temps Brown a réussi à obtenir un écart de température entre la source chaude et la source froide de $\Delta T = 47K$. Puis par la suite en 1978 [18], il a pu atteindre un $\Delta T = 80K$ en utilisant le cycle de Stirling avec le même dispositif.

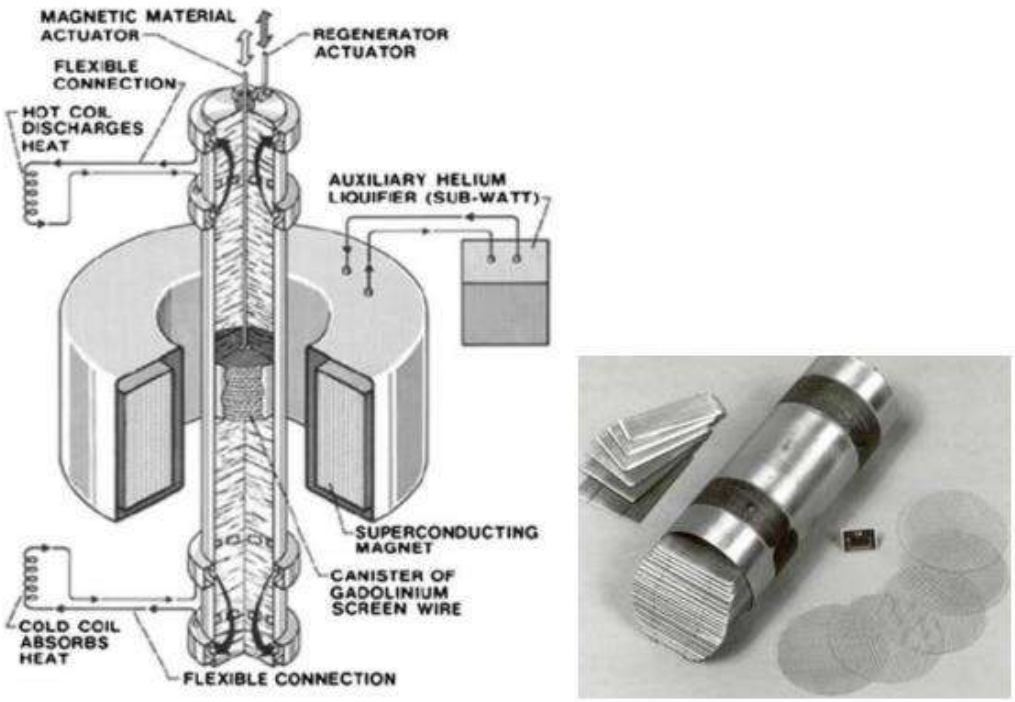



Figure 1-3 démonstrateur de la NASA réalisé par Brown et son équipe

### 1.4 Démonstrateur de Astronautics USA

En 1997, l'association de l'entreprise Astraunotics avec Ames Laboratory a permis de réaliser un démonstrateur de RM ; il s'agit d'un démonstrateur linéaire opérant près de la

température ambiante utilisant des bobines supraconductrices qui génèrent un champ magnétique de 5T avec une masse de gadolinium de 3kg [12].

Les tests effectués sur ce démonstrateur pendant 18 mois ont permis de montrer la faisabilité de ce type de réfrigérateur dans le marché de l'industrie frigorique fournissant une puissance de l'ordre de 600W. En 2001, l'équipe d'Astronautics ont réussi à réaliser un prototype rotatif produisant une puissance de 95W avec un écart de température de l'ordre de 20C, en utilisant des aimants permanents qui génère un champ magnétique de 1.5T et de Gd sous forme de sphères comme matériau magnétocalorique. En 2005 l'équipe d'Astronautics [12]

a modifié le démonstrateur rotatif de source magnétique 1.5T en introduisant de nouveaux matériaux magnétocaloriques, à savoir ; le Gd, Gd-Tb et LaFeSiH sous forme sphérique permis d'atteindre un écart de température de 25C avec une puissance de 50W. En 2007, l'équipe d'Astronautics [12]

a réussit à construire un nouveau démonstrateur rotatif qui utilise le Gd sous forme de plaques parallèles comme réfrigérant magnétique et une source d'aimant permanent de 1.4T type Halbach. Le démonstrateur a permis de produire des puissances plus élevées de l'ordre de 220W avec un écart de température de 11C. Récemment, dans la conférence Thermag V à Grenoble, l'équipe d'Astronautics USA a présenté



Figure 1.4 Démonstrateur de RM développé récemment par Astronautics (Jacobs et al.

2014)

### 1.5- Démonstrateur de Université of Western Switzerland

En 2006, Sari et Egolf [27] ont publié les résultats de leur démonstrateur rotatif (figure 1.12) qui est différent par rapport aux autres démonstrateurs de point de vue conception et fonctionnement. Il s'agit d'un démonstrateur rotatif utilisant le gadolinium et l'air comme fluide caloporteur, ainsi l'écart de température maximum envisagé entre les deux sources est de 1C pour un champ magnétique de 1 Tesla. En 2010, l'équipe de TiS-HES-SO dirigée par le professeur Sari a mis au point un nouveau prototype (figure 1.13) [28].

La particularité de ce dernier réside dans sa compacité, sa simplicité et la technologie utilisée dans la conception des sources de champ magnétique, ce qui conduit à un grand avantage dans l'industrie de froid. Il s'agit d'un démonstrateur linéaire à base d'aimants permanents qui génèrent un champ magnétique de 1.45T dont le matériau magnétocalorique utilisé est le gadolinium avec de l'eau comme fluide caloporteur. Ainsi, ce démonstrateur constitué de deux sources de champ magnétique conçus d'une façon à minimiser les forces magnétiques d'environ de 90% ; ce qui permet d'économiser l'énergie consommée au niveau du moteur. Récemment des améliorations importantes

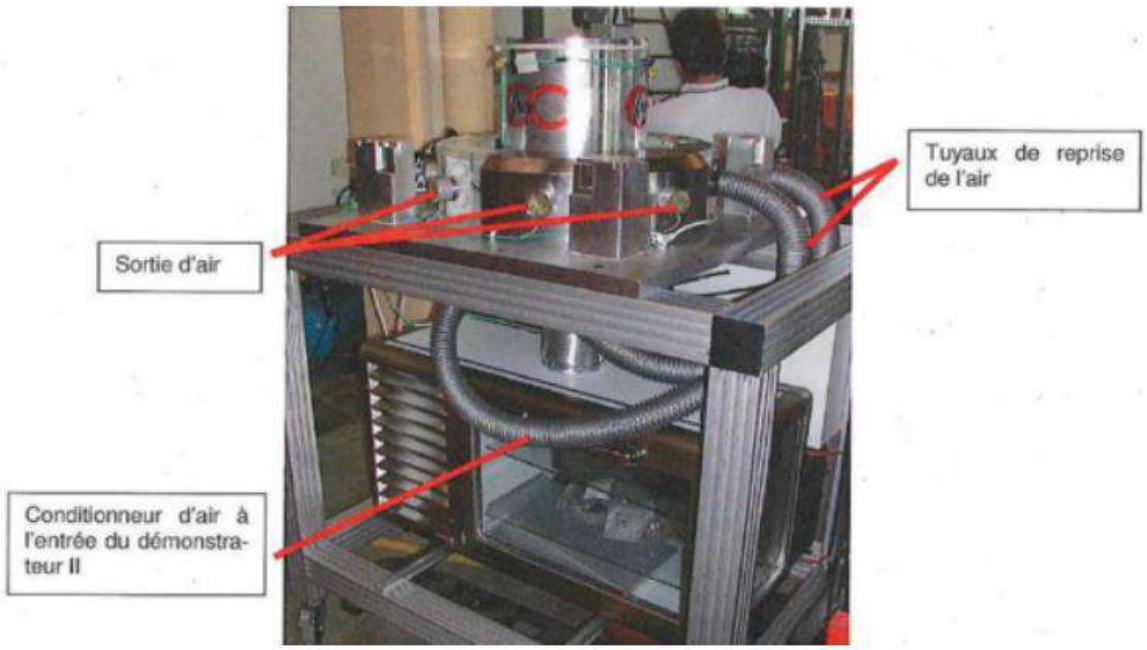



**Figure 1.5 démonstrateurs de RM rotatif développé par HES-SO (Sari et al. 2006)**

### 1.6- Cycles de réfrigération magnétique

En général, un cycle de réfrigération magnétique consiste en l'aimantation et la désaimantation du régénérateur au cours desquelles la chaleur est respectivement rejetée et

Absorbée. Les cycles basiques pour la réfrigération magnétique sont : le cycle de Carnot, le Cycle magnétique de Stirling, le cycle magnétique d'Ericsson et le cycle magnétique de Baryton. Parmi ces cycles, les cycles de Baryton (figure I.14) et les cycles d'Ericsson (figure I.15) ; qui sont applicables pour la réfrigération magnétique autour de la température ambiante [30].

### I.7- : Cycle magnétique de Brayton

Le cycle de Baryton est l'un des cycles les plus basiques de la réfrigération magnétique. Une machine basée sur ce cycle opère entre deux iso champs (champ magnétique constant) et deux courbes adiabatiques (une entropie totale constante) 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 et le travail fournie w:

$$\text{Cop} = \frac{qc}{w}$$

Cop = (Equation I.1) L'application de la relation (1.1) pour le cycle de Baryton donne **:**

$$\text{COP}_{\text{Baryton}} = \frac{\int_1^4 Tds}{-\int_1^4 Tds - \int_2^3 Tds}$$

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

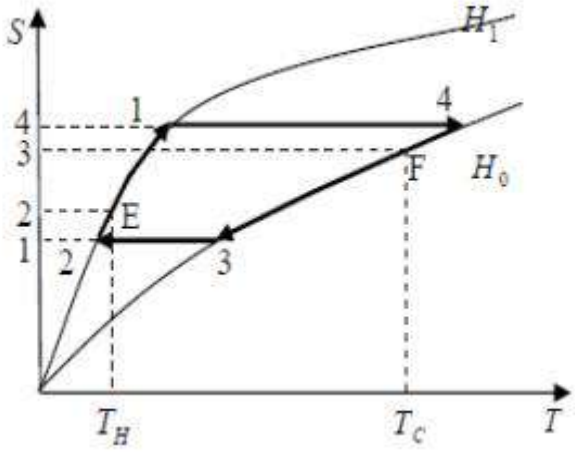



Figure I.6: Les cycles de la réfrigération magnétique de Brayton

### 1.8 Cycle magnétique d'Ericsson

Une machine basée sur le cycle d'Ericsson opère avec deux processus isothermes (Température constante) et deux processus iso champs (champ magnétique constant) Le

COP d'un cycle d'Ericsson est donné par :

$$\text{Cop}_{\text{Ericsson}} = \frac{T_0[S1-S2]}{T_0[S1-S2]-T_0[S3-S2]}$$

$$\lim_{T0\to T1} Cop_{Erisson} = \frac{T_0}{T_1-T_0} = Cop_{carnot}$$

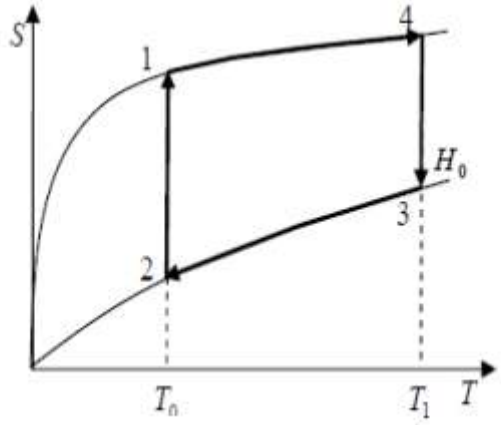



**Figure I.7 Les cycles de la réfrigération magnétique d'Ericsson**

### 1.9 Critères de sélection de réfrigérant magnétique

La performance d'un système de réfrigération magnétique dépend du fluide caloporteur, du réfrigérant, du type de cycle et de la source de champ magnétique. Comme le matériau magnétocalorique est le noyau principal de la réfrigération magnétique, ET pour avoir un réfrigérateur magnétique rentable et efficace il doit disposer de certaines caractéristiques pour être intéressant [31], [32] :

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

commerciales.

- ✓ Grandes valeurs de changement d'entropie magnétique et de température adiabatique.
- ✓ Une bonne stabilité chimique.
- ✓ Faible impact sur l'environnement.
- ✓ Une faible viscosité du fluide pour minimiser les pertes de charge. Non toxique magnétique.

**1.10 Effet magnétocalorique (EMC)**

**1.10.1- Définition**

La première constatation de l'effet magnétocalorique fut découverte par Warburg en 1881 en plaçant une plaquette de fer pur dans un champ magnétique, il observa une élévation puis abaissement de température. Weiss et Picard l'ont expliqués théoriquement et lui ont donnés le nom d'effet magnétocalorique en 1918, puis dans les années (1926,1927) Débye et Giauque ont proposés d'utiliser cette idée pour atteindre de très basses températures, en se basant sur le cycle (d'aimantation/désaimantation) .

L'EMC une propriété intrinsèque de certains matériaux magnétique, cet effet se traduit par un changement de l'état thermique du matériau (chaud/froid) lors de la variation de son état Magnétique (aimanté/désaimanté) induit par un champ magnétique extérieur dans des conditions adiabatiques.

**1.10.2- Principe :**

L'effet magnétocalorique est considéré comme le résultat du changement de l'entropie du matériau dû aux couplages entre les moments magnétiques et le réseau atomique sous l'action d'un champ magnétique extérieur. L'entropie totale d'un matériau magnétique est la somme de l'entropie magnétique $S_m$ (provenant de la distribution des spins dans le matériau d'où les moments magnétiques sont portés par des électrons localisés), de l'entropie de réseau $S_r$ (associés aux phonons) et de l'entropie électronique $S_e$ (attribuée aux électrons de conduction d'où la contribution thermique des électrons est négligeable par rapport à celle des phonons en particulier a haute température «théorie statistique de Fermi Dirac »).

L'entropie totale doit rester constante si on considère $S_e$ pour négligeable. Elle est donnée par :

$$(T, H) = (T, H) + (T) + S(T) \quad \text{(I.1)}$$

L'application d'un champ magnétique au matériau entraîne l'alignement des moments magnétiques selon la direction du

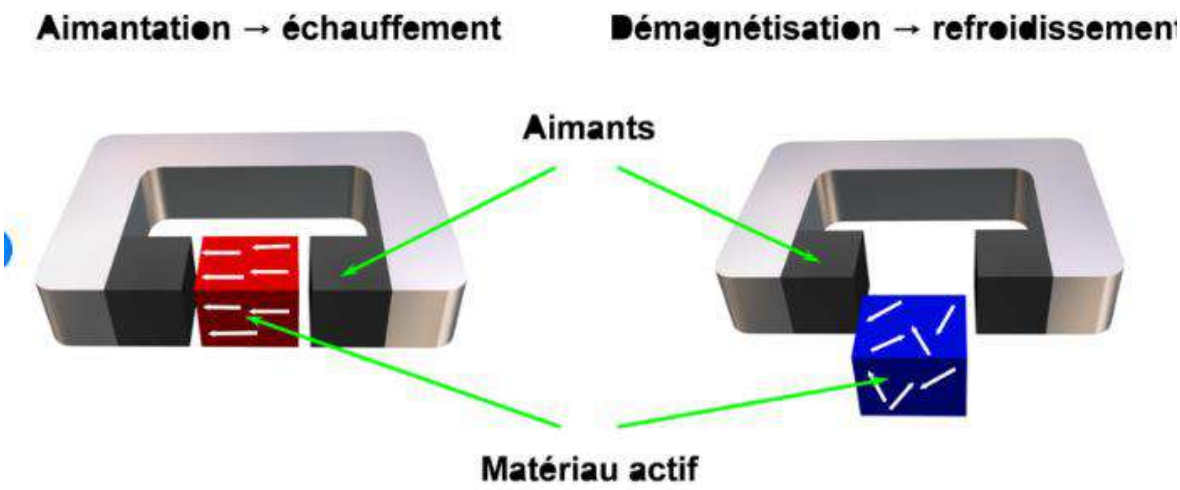



**Figure I.8 Schéma de principe de l'effet magnétocalorique**

Magnétique va être compensée par une augmentation de l'entropie du réseau qui correspond à une augmentation de l'agitation thermique du système, donc à une augmentation de la température : c'est l'échauffement par aimantation adiabatique. Inversement, la suppression du champ magnétique favorise le désordre des moments magnétiques va conduire à une diminution de la température du système : c'est le refroidissement par désaimantation adiabatique

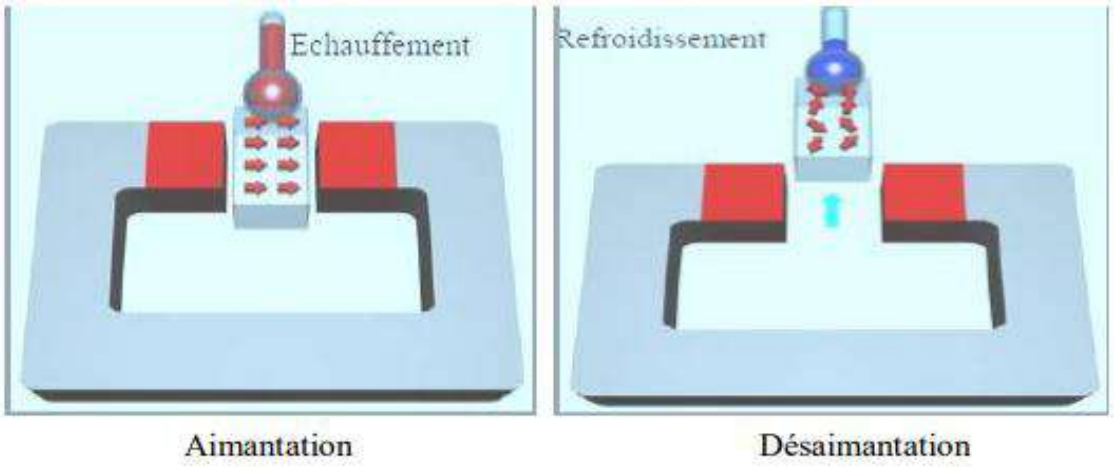



**Figure 1.9 Effet magnétocalorique fleshes symbolisant l'orientation des moments magnétique**

L'effet magnétocalorique est une propriété intrinsèque des matériaux paramagnétiques et ferromagnétiques qui se traduit par une variation de leur température lorsqu'ils sont soumis à une variation de champ magnétique dans des conditions

adiabatiques. La plupart des matériaux magnétocaloriques s'échauffent lorsqu'on les aimante et se refroidissent lorsqu'on les désaimante, on parle d'effet magnétocalorique direct.

L'application d'un champ magnétique au matériau entraîne l'alignement des moments magnétiques selon la direction du champ et donc une diminution de l'entropie magnétique. Si le champ magnétique est appliqué dans des conditions adiabatiques, alors la diminution de l'entropie magnétique va être compensée par une augmentation de l'entropie du réseau qui correspond à une augmentation de l'agitation thermique du système, donc à une augmentation de la température du système. Inversement, le retrait du champ magnétique dans des conditions adiabatiques va conduire à une diminution de la température du système. Ce phénomène est illustré sur la Figure 1.2.

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

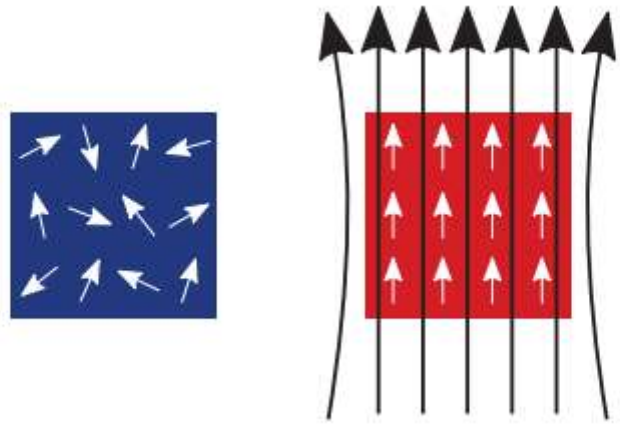


**Fig. 1.10 Schématisation de l'effet magnétocalorique.**

**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.

### 1.10.3- Matériaux magnétocaloriques

Généralement, on distingue deux types de matériaux magnétocaloriques utilisés en réfrigération magnétique : matériaux de premier ordre et matériaux de seconde d'ordre [32, 34, 35]. Le gadolinium (Gd) est un matériau de terres rares de second d'ordre qui cristallise

sous forme hexagonale à la température ambiante. Son nom provient de la gadolinite, le minerai duquel il a été extrait.

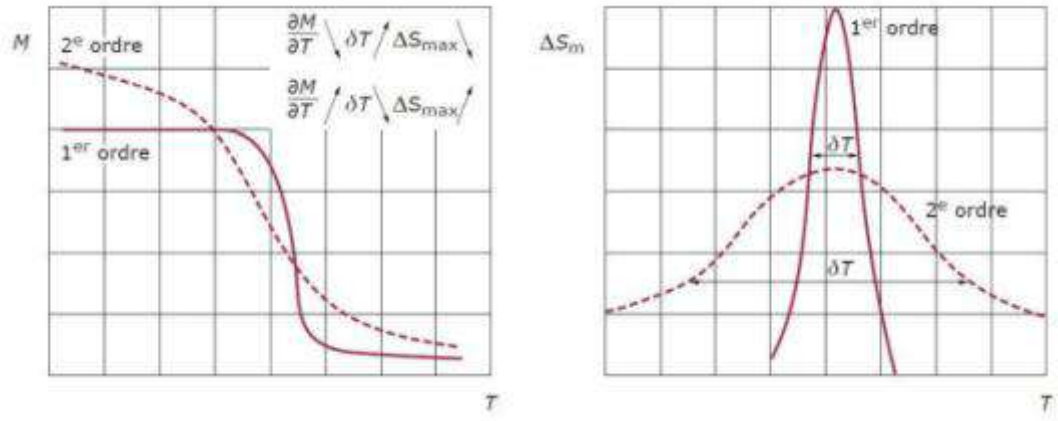



**Figure 1.11 Types matériaux magnétocalorique**

Généralités Types de matériaux magnétocaloriques (Lebouc et al. 2005) Il est utilisé dans plusieurs domaines comme la supraconductivité, l'imagerie par résonnance magnétique nucléaire (RMN) etc.

Le gadolinium présente un comportement ferromagnétique à basses températures. Au voisinage de la température ambiante, plus précisément à sa température de Curie (TC = 294K), il change de phase magnétique et devient paramagnétique.

Ce changement de phase qualité de second ordre est accompagné par une forte variation de l'entropie du matériau, d'où l'intérêt suscité dans le domaine de la réfrigération magnétique au voisinage de la température ambiante. A la température de Curie et sous l'application d'un champ magnétique externe, le Gd passe d'un état magnétique désordonné à un état ordonné, ce qui diminue l'entropie magnétique et augmente l'agitation du réseau atomique et par conséquent augmente la température du matériau.

Ce fort pouvoir magnétocalorique, fait de Gd une référence pour les matériaux magnétocaloriques. Précédemment, le Gd est parmi les matériaux le plus utilisé dans la majorité des systèmes de réfrigération magnétique, mais son prix trop élevé, son oxydation facile et son application limitée à la température ambiante ont poussé des chercheurs à recourir à de nouveaux matériaux moins dispendieux, plus propres et performants. Aujourd'hui, les recherches sur les matériaux à EMC géant autour de la température ambiante s'orientent vers des transitions de phase du premier ordre qui offrent une large variété de compositions à explorer.

Il s'agit de trouver des compositions permettant de disposer d'un EMC élevé sous un champ magnétique faible [34].

Compte tenu de l'équation de la variation de l'entropie magnétique (1.24) décrite précédemment et caractérisant le comportement magnétocalorique, un EMC géant peut être obtenu même pour une densité de moments magnétiques faibles en jouant sur la nature de la transition de phase comme le montre la figure (1.16).

En effet, une transition du premier ordre (brusque) peut amplifier considérablement la variation de l'entropie. Cela ne peut se faire cependant qu'au détriment de la plage de température d'utilisation δT qui s'en trouve réduite[34

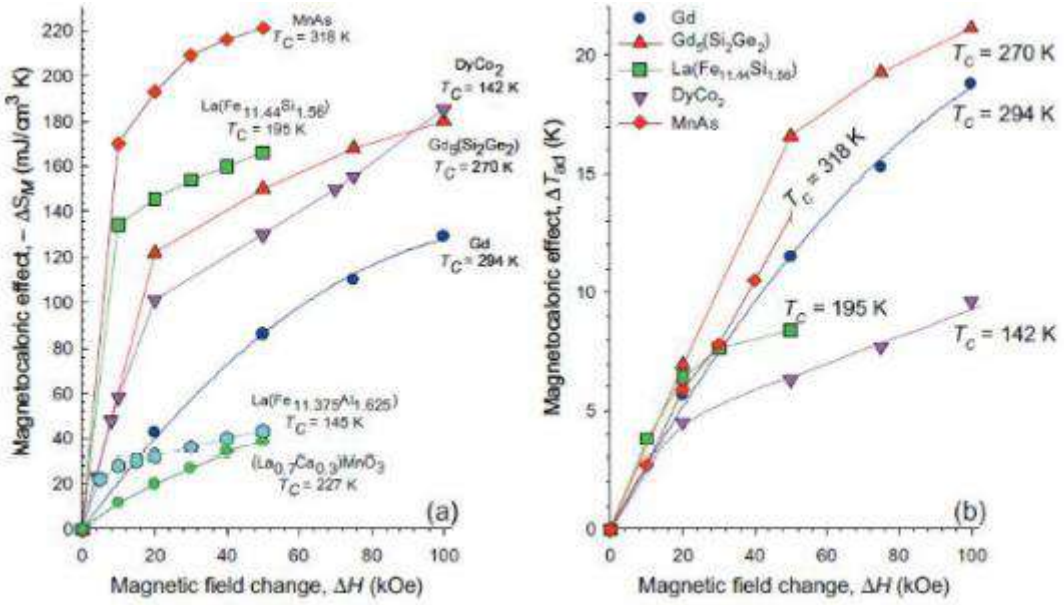



**Figure 1.12 Variation de l'effet magnétocalorique de l'entropie magnétique en fonction de fonction de champ magnétique pour différents matériaux magnétocalorique (Gschneidner Jr et al 2005)**

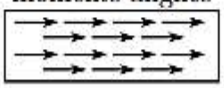
### 1.11-Classification des matériaux magnétiques

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.

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 Bs correspond à l'induction maximale générée par le matériau.
- l'induction rémanente Br représente l'induction présente dans le matériau lorsqu'on annule le champ d'excitation.

– le champ coercitif HcB correspond à la valeur du champ qu'il faut appliquer pour désaimanter le matériau.

| Matériau | Diamagnétique | Paramagnétique | Ferromagnétique |
|---|---|---|---|
| Perméabilité relative $\mu_r$ | $\mu_r < 1$ | $\mu_r \approx 1$ | $\mu_r \gg 1$ |
| Susceptibilité $\chi$ | $-10^{-5}$ | $10^{-3}$ | $10^{6}$ |
| 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  |

**Tab. 1.1 Classification des matériaux magnétiques.**

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.

Les propriétés des matériaux magnétiques durs et doux sont détaillées dans l'Annexe E.

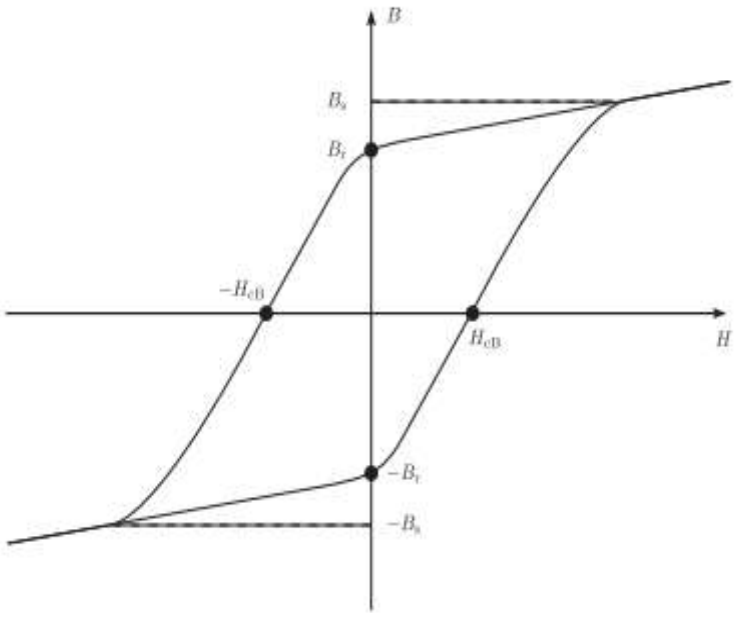



**Fig. 1.13 Cycle hystérésis B (H).**

### 1.12- 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.

### 1.12-1 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 μr et de longueur lc.

L'induction dans un entrefer de longueur lg est déduite du théorème d'Ampère et s'exprime 1 :

$$B = \mu_0 NI * 1/ lc/\mu r + lg$$

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 :

$$B \approx \mu_0 NI / lg$$

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 $jS = 3\ A \cdot mm^{-2}$ , 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 électroaimants 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).

### 1.12.2-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.

**1.12-3Aimants 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.

**1.13 Conclusion :**

En conclure dans ce chapitre une étude bibliographique présente la généralités de la réfrigération magnétique avec des expériences (NASA.USA.ERICSSON BRIGHTON)

# *CHAPITRE II*
# *Modalisation Mathématique De L'aiment Permanent*

# CHAPITRE II : MODALISATION MATHEMATIQUE DE L'AIMENT PERMANENT

## 2.1-INTRODUCTION

Dans ce chapitre en présente la modélisation mathématique avec des équations nécessaire pour faire des calcule du l'aiment permanant

## 2.2-Description de l'effet magnétocalorique (MCE)

L'effet magnétocalorique est la réponse thermique de certains matériaux à la variation du flux magnétique. Lorsque la densité de flux magnétique augmente, la température du matériau augmente, et en contraste, la suppression du flux magnétique la densité réduit la température du matériau.

Tout d'abord, la relation thermodynamique de l'effet magnétocalorique sera donné, puis la simulation numérique du problème dans COMSOL Multi physiques sera discuté. Les propriétés thermiques et magnétiques de certains les matériaux dépendent des plages de température spécifiques qui permet de les utiliser dans des systèmes de conversion d'énergie.

Selon la première loi de la thermodynamique, les changements dans l'énergie interne (U) est assurée par transfert de chaleur (Q) et travail (W) appliqué au système. En appliquant le flux magnétique au matériau ferromagnétique, la première loi de la thermodynamique peut être récupéré

$$\mathbf{d}U = T\mathbf{d}S - P\mathbf{d}V + \mu_0 H\mathbf{d}M \qquad (2.1)$$

Ici, H est l'intensité du magnétique externe appliqué flux, P est la pression, V est le volume du solide, $\mu_0$ est la perméabilité au vide coefficient, et M est le induit flux magnétique dans le matériau. S'il n'y a pas changement dans le corps solide ou il peut être ignoré, l'interne l'énergie est exprimée comme suit :

$$dU = TdS + \mu_0 HdM \qquad (2.2)$$

La valeur d'entropie d'une substance à pression constante est température et la densité de flux magnétique. Trois les termes d'entropie peuvent être désactivés pour tout matériel, y compris entropie en treillis, entropie électronique et entropie magnétique pour le matériau magnétique.

$$S(T, H) = Sm(T, H) + Slat(T) + Sel(T) \qquad (2.3)$$

Deux processus adiabatiques et isothermes peuvent être envisagés. afin de mieux comprendre l'effet magnétocalorique :

Processus adiabatique Si le flux magnétique est appliqué à un matériau magnétique dans le processus adiabatique, l'entropie demeure constante dans un processus réversible. En diminuant l'entropie magnétique, l'entropie totale doit être maintenue constante; ainsi, le réseau et l'entropie d'électron doit être augmenté, ce qui augmente la température par rapport au matériel.

L'augmentation de la température adiabatique sera désactivée comme la différence de température entre avant et après lorsque le flux magnétique s'applique [25].

Procédé isotherme Par application d'un flux magnétique dans un procédé isotherme, seul le terme d'entropie magnétique Le taux de entropie du système. En raison de la dépendance de l'entropie d'une substance sur le température et le flux magnétique, la relation suivante peut être défalqué pour les variations d'entropie

$$dS = \left(\frac{\partial s}{\partial T}\right)_H dT + \left(\frac{\partial s}{\partial H}\right)_T dH \qquad (2.4)$$

La capacité thermique spécifique du matériau à pression et température constantes est exprimée selon l'équation suivante.

$$\mathbf{CpH = T}\left(\frac{\partial s}{\partial T}\right)_H \qquad \mathbf{(2.5)}$$

La relation entre l'entropie et le flux magnétique est exprimée en utilisant les relations de Maxwell comme suit :

$$\left(\frac{\partial s}{\partial H}\right)_T = \mu_0 \left(\frac{\partial M}{\partial T}\right)_H \qquad \mathbf{(2.6)}$$

où M indique la magnétisation interne du matériau.

En remplaçant les éq. 5 et 6 par l'éq. 4, on peut exprimer une relation générale pour le changement d'entropie :

$$\mathrm{d}S = \left(\frac{c_{\mathrm{pH}}}{T}\right)\mathrm{d}T + \mu_0 \left(\frac{\partial M}{\partial T}\right)_{\mathrm{H}} \mathrm{d}H \qquad \mathbf{(2.7)}$$

Pour obtenir la différence de température réversible dans le processus adiabatique,

nous pouvons mettre en œuvre la condition suivante dans Eq. 7 :

$$\Delta T_{\text{ad}} = -\mu_0 \int_{H_0}^{H_1} \left( \frac{T}{c_{\text{pH}}} \right) \left( \frac{\partial M}{\partial T} \right)_{\text{H}} dH \qquad \textbf{(2.8)}$$

En outre, pour obtenir des changements d'entropie réversibles pendant un processus isotherme, nous pouvons régler les changements de température à l'intérieur Éq. 7 à zéro

$$\Delta S_{\text{m}} = \mu_0 \int_{H_0}^{H_1} \left( \frac{\partial M}{\partial T} \right)_{\text{H}} \text{d}H \qquad \textbf{(2.9)}$$

Dans un processus adiabatique, la chaleur générée par le flux magnétique est obtenue à partir de l'équation suivante :

$$\dot{Q}_{\text{MCE}} = \rho c_{\text{H}} \left( \frac{\text{d}T}{\text{d}t} \right) = -\rho \mu_0 T \left( \frac{\partial M}{\partial T} \right)_{\text{H}} \left( \frac{\text{d}H}{\text{d}t} \right)$$

$$\dot{Q}_{\text{MCE}} = \rho_{\text{s}} c_{\text{P,s}} \left( \frac{\partial T_{\text{ad}}}{\partial H} \frac{\text{d}H}{\text{d}t} + \frac{\partial T_{\text{ad}}}{\partial T_{\text{s}}} \frac{\text{d}T_{\text{s}}}{\text{d}t} \right) \qquad \textbf{(2.10)}$$

Quel MCE Q sera utilisé comme source de chaleur dans la simulation CFD.
Selon les équations ci-dessus, le terme source de chaleur dépend fortement des propriétés magnétiques du corps solide. Par conséquent, se familiariser avec les matériaux magnétiques et leurs propriétés est plus important que jamais.

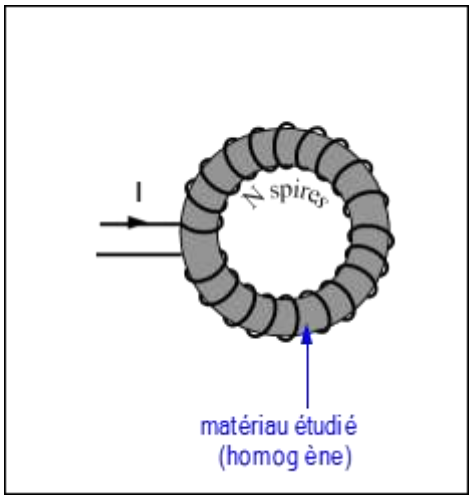
## 2.3-Observation du phénomène d'hystérésis

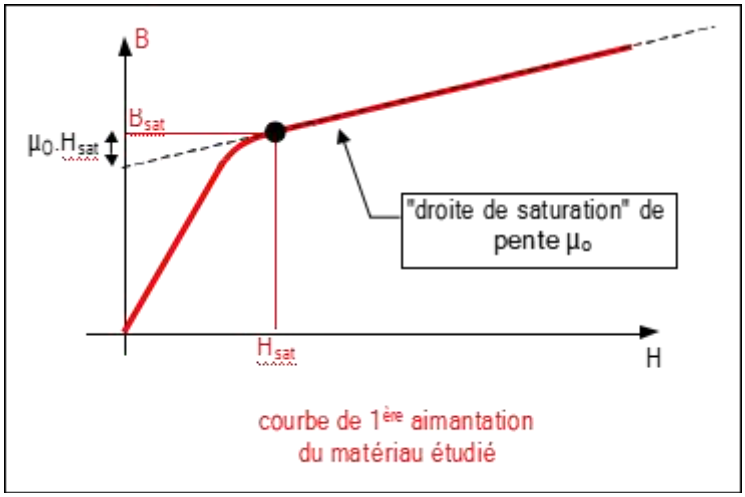
On sait que la courbe B(H) dite "de 1ère aimantation" d'un matériau magnétique nous permet de distinguer les matériaux magnétiques des matériaux non magnétiques. Cette courbe a été construite à partir des relevés du flux et du courant I constant appliqués au matériau usiné en forme de tore fermé, avec lesquels on en déduit B = Φ/S et H = NI/ℓ

(avec S = section du tore et

ℓ = longueur moyenne du tore) qui ne dépendent plus des dimensions du tore mais uniquement du matériau étudié, et qui

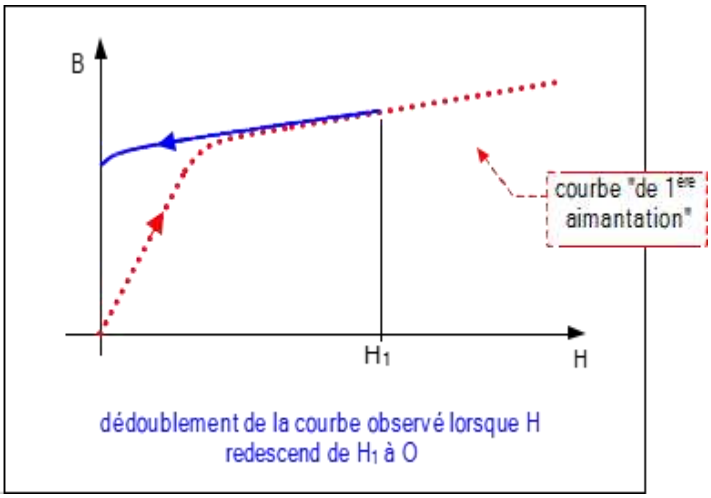
permet, en outre, de contrôler parfaitement l'excitation H en agissant sur I :



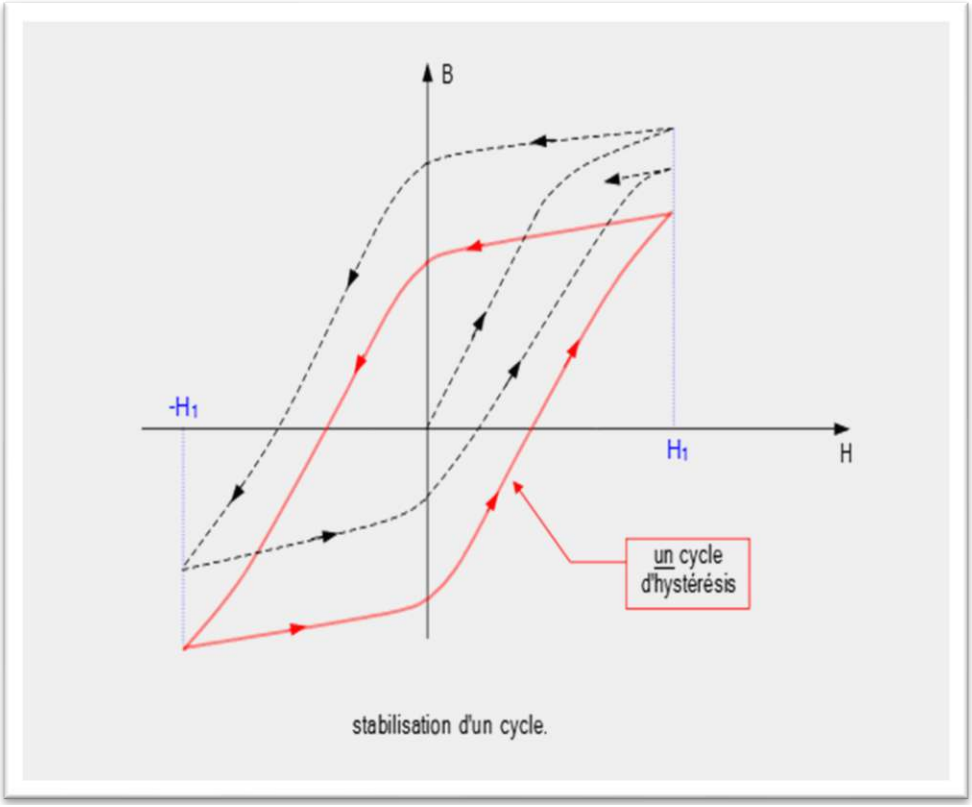

En traçant cette courbe on n'a jamais fait "marche arrière" : on a toujours augmenté l'intensité du courant sans jamais la diminuer…or il se trouve que tous les matériaux magnétiques ne réagissent pas de la même manière lorsqu'on diminue l'intensité du courant. Pour certains matériaux, le fait de diminuer I (donc H) à partir d'une certaine valeur provoque un "dédoublement de la courbe" au lieu d'un simple retour sur la courbe d'origine : ce cas est typique des matériaux que l'on nomme alors "durs". Une absence de dédoublement de la courbe caractérise les matériaux que l'on nomme "doux" [1]. Ce phénomène de dédoublement est appelé phénomène d'Hystérésis du grec huttérien, "être

en retard" = retard à la démagnétisation (désaimantation = démagnétisation dans le langage courant).




[1] En réalité, un matériau magnétique parfaitement doux n'existe pas, il y a toujours un léger dédoublement de la courbe.Ce dédoublement de courbe met en évidence la "non réversibilité" [2] du phénomène de magnétisation d'un matériau magnétique dur : pour une excitation H donnée, B peut avoir plusieurs valeurs possibles, cela dépend du passé magnétique du matériau. En d'autres termes il y a un effet de mémorisation (qui sera utilisé pour les bandes magnétiques audio ou vidéo !). Cet effet de mémorisation[3] sera inévitablement suivi d'un emmagasinement d'une énergie (magnétique) dans le matériau[4], à l'origine des pertes par hystérésis observées en courant alternatif, c'est-à-dire où le phénomène d'hystérésis se met en évidence.

La courbe B(H) d'un matériau dur se dédoublant, on finit par obtenir un cycle lorsqu'on applique un I variant progressivement de $-I_1$ à $+ I_1$ (donc H varie de $-H_1$ à $H_1$) : un cycle fermé est obtenu lorsqu'on effectue plusieurs "passes" de $-I_1$ à $+ I_1$ : on dit que l'on "stabilise" le cycle. Le cycle fermé obtenu est appelé "cycle d'hystérésis" :



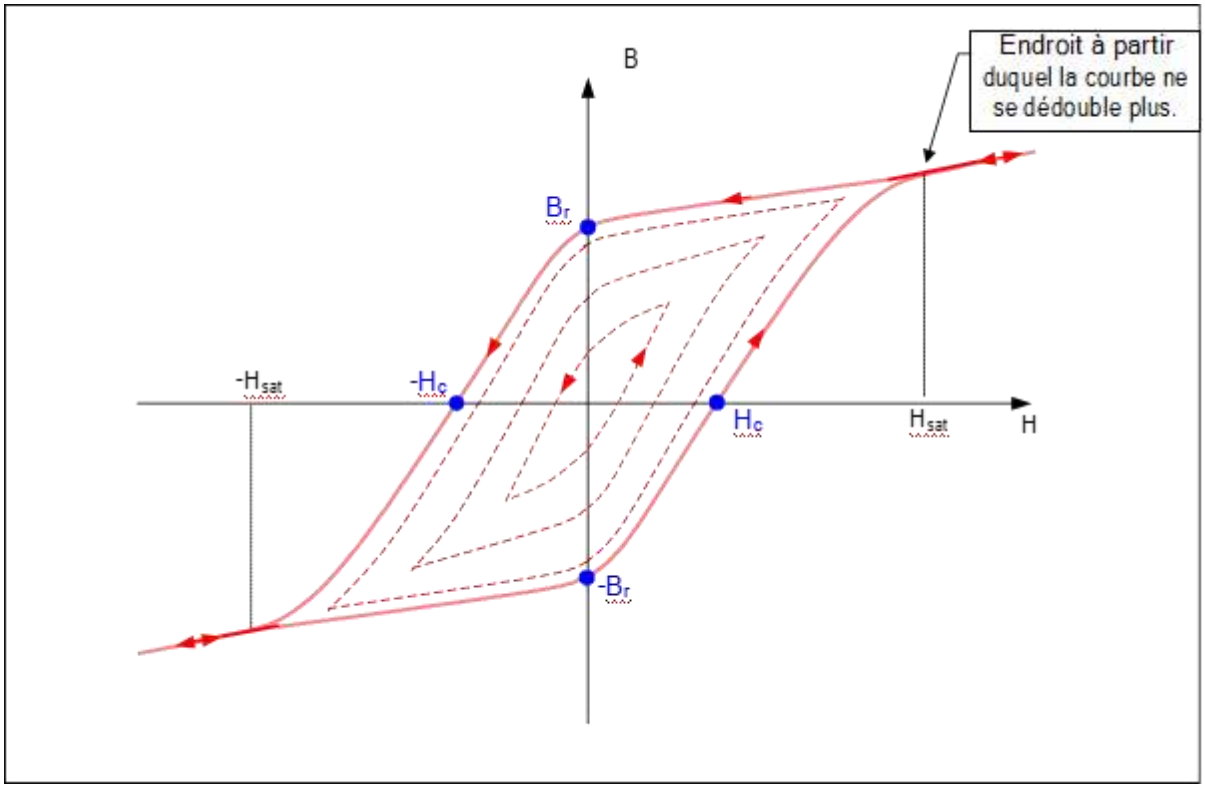

stabilisation d'un cycle.

Le cycle d'hystérésis précédent ne possède cependant pas une forme précise typique du matériau : il dépendait de l'intensité maximale $I_1$ obtenue pour réaliser le cycle. Pour obtenir un cycle caractéristique du matériau seul (et indépendant de I maximum appliqué à la bobine magnétisante) il faut augmenter I jusqu'à $I_{sat}$ (vu à la courbe de 1ère aimantation) qui provoque la saturation du matériau (repérable précisément par une absence de dédoublement de la courbe lorsqu'on réduit à nouveau l'intensité du courant). On aboutit alors à un cycle limite qui, quant à lui, est bien caractéristique du matériau seul. Les intersections qu'il a avec les axes sont donc caractéristiques du matériau : on les appelle "excitation coercitive $H_c$" et "induction (ou champ magnétique) rémanent $B_r$", donné par le fabriquant du matériau étudié ;

On pourra constater que la courbe d'hystérésis ne passe pas par le point (O,O). On verra que cela signifie qu'avec la présence d'un entrefer on pourra avoir H différent de O alors même que I = O : la relation H = NI/ℓ (c'est-à-dire H = O lorsque I = O) n'est valable

qu'en absence d'entrefer ou en présence de matériaux doux uniquement.

Noter également que $B_{sat}$ ne peut pas se lire sur le cycle d'hystérésis mais seulement sur la courbe de première aimantation[5].



Une fois que le matériau a été complètement magnétisé (c'est-à-dire mené à saturation), on constate que la coupure du courant (I = O ⇒ en absence d'entrefer on a H= NI/ℓ = O) n'aboutit plus à une annulation du champ magnétique : on obtient $B_r$ ou $B_r$ selon le sens de variation du courant au moment de sa coupure. C'est cette propriété que l'on va exploiter pour fabriquer des aimants permanents.

Remarques :

- la réluctance Æ NI/Φ n'est plus connue car à un flux Φ donné correspond une infinité de NI possibles (infinité de cycles d'hystérésis)⇒ Æ (donc également µ) n'existe pas pour un matériau dur. (6)
- Pour annuler le champ magnétique on constate qu'il ne suffit plus de couper le courant de la bobine magnétisante, comme

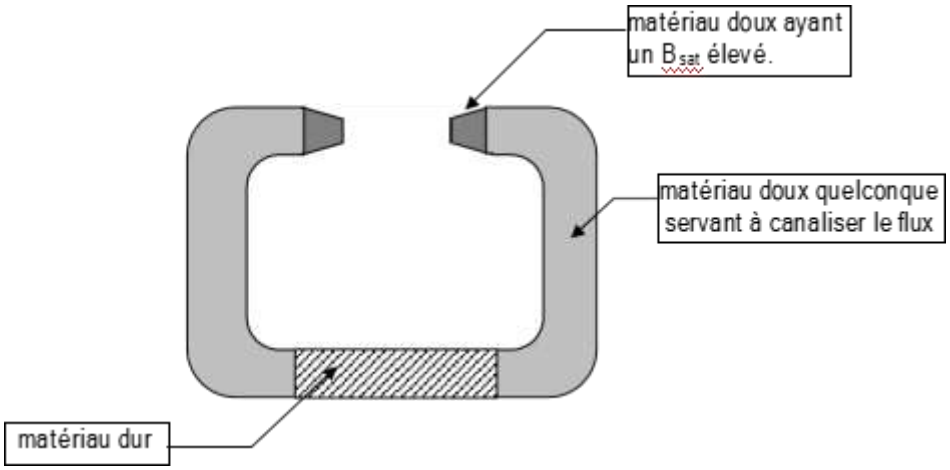
on le faisait pour un matériau doux : il faut appliquer l'excitation coercitive, c'est-à-dire un courant (positif ou négatif selon l'état de magnétisation) tel que I = $H_c$ × ℓ/N. Attention : le champ magnétique n'est annulé que si le tore est complètement fermé ; en la présence d'un entrefer cela n'aboutit pas tout à fait à une annulation de champ magnétique (il faudrait un courant plus intense). On en parlera ultérieurement plus précisément avec "la droite de recul".

A noter qu'un matériau parfaitement doux (c'est-à-dire B = O lorsque H = O) n'existe pas : il existe toujours un cycle d'hystérésis, aussi "mince" soit-il. L'excitation coercitive minimale que l'on arrive à créer (matériaux amorphes au cobalt) est de l'ordre de O,O1 A/m. L'excitation coercitive maximale que l'on arrive à créer (avec un alliage Nd, Fe, B) est quant à elle de l'ordre de 1 OOO OOO A/m (soit 1OO millions de fois plus élevée que précédemment).

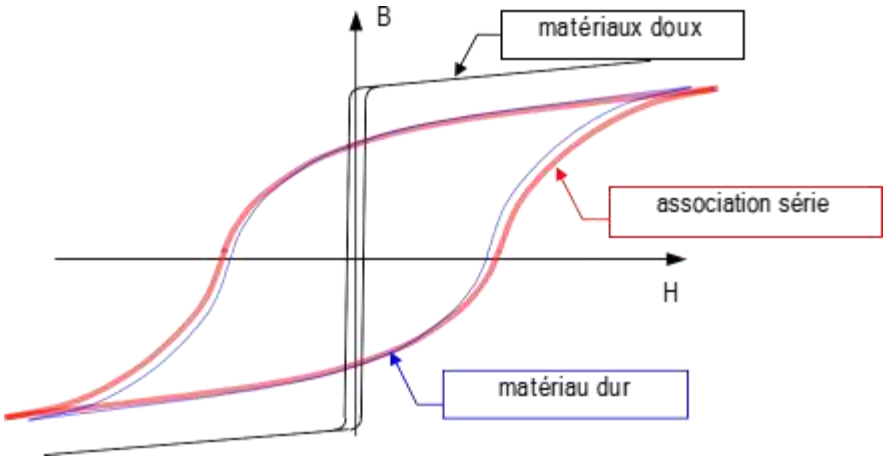
[6] A noter que les constructeurs indiquent parfois µ pour un matériau dur : il s'agit en fait

du μ maximal obtenu sur la courbe de 1ère aimantation, parfaitement inexploitable en régime alternatif. On peut cependant définir un μ dynamique lorsque le courant est légèrement variable autours d'une valeur fixe. Sur ce sujet il faut voir plus précisément un cours sur les bobines de lissage de courant.

### 2.4-Association série d'un matériau d'oux et d'un matériau dur :




Un aimant permanent n'est généralement pas fabriqué à partir d'un seul matériau :




L'association série7 d'un matériau doux et d'un matériau dur donne un matériau dur : le cycle d'hystérésis de l'association (en rouge) est pratiquement identique à celle du matériau dur à condition que Bsat des matériaux doux soit > Bsat du matériau dur. On peut donc considérer que l'association série d'un matériau dur et d'un matériau doux est équivalent à la présence du matériau dur seul (on verra ultérieurement que les dimensions du matériau doux sont également "transparentes" car elles n'interviendront pratiquement pas lors de la construction de l'aimant paermanent).

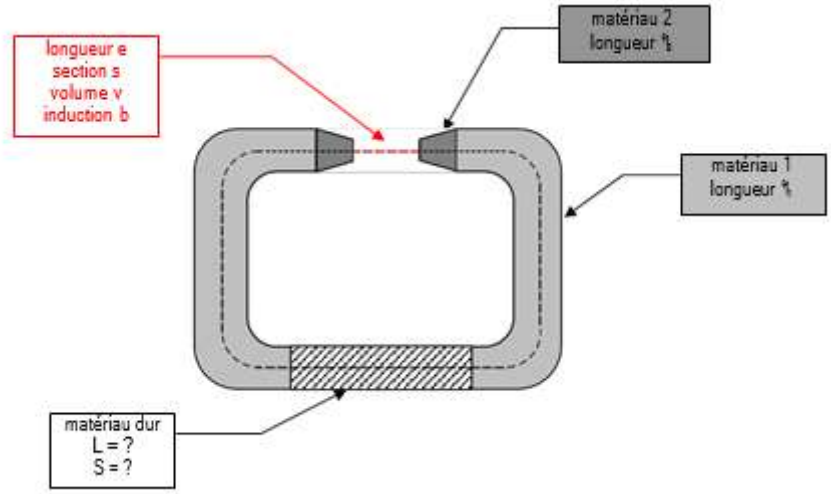
### 2.5-Désaimantation

Désaimanter un aimant (ou tout matériau magnétique) revient à lui retirer son passé magnétique. Il ne s'agit pas seulement d'obtenir B = O (une simple excitation égale à l'excitation coercitive suffirait si le matériau était refermé sur lui-même, légèrement supérieure dans le cas contraire) mais d'obtenir B = O lorsque H = O, c'est - à - dire B = O lorsque l'aimant est isolé de tout champ magnétique ou excitation extérieure. Pour obtenir cela, la solution la plus simple est de faire décrire au point de fonctionnement (B,H) des cycles d'hystérésis de + en + petits centrés autour de l'origine O des axes, cela s'effectue en appliquant un courant i(t) alternatif que l'on diminue petit à petit.

Des désaimantations accidentelles peuvent cependant avoir lieu lorsque la température du matériau augmente (8) (à la température de Curie du matériau le champ magnétique s'annule) ou lors de chocs mécaniques (certains matériaux magnétiques y sont sensibles). On verra ultérieurement que la présence d'un entrefer a également pour effet de désaimanter plus ou moins légèrement le matériau mais il ne s'agit pas de la désaimantation du matériau, au sens strict du terme.

### 2.6-Objectif de la fabrication

Un aimant correctement fabriqué a été soumis à des règles de fabrication précises. Ces règles visent toutes à atteindre un seul but : produire une induction b donnée dans l'air (entrefer) avec le minimum de volume de matériau. Le volume d'entrefer v = e× c'est imposé (il s'agit donc d'une donnée de départ, issu d'un cahier des charges par exemple) par des contraintes d'encombrement ou de puissance (en général e est pris le plus petit possible et s est tel que l'on ait un flux ou des surfaces utiles acceptables). Les caractéristiques de l'entrefer sont donc des données du problème (en rouge ci-dessous) :

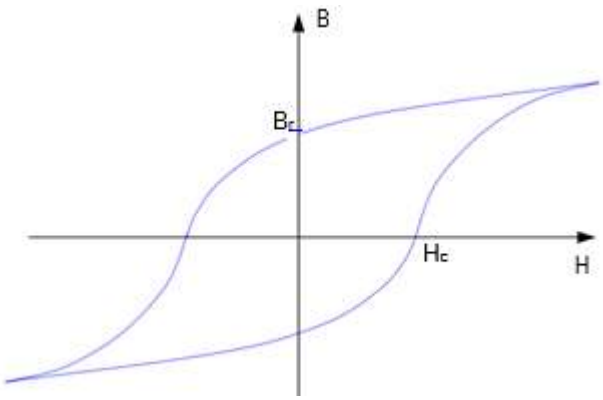


Le matériau 1 est du fer doux pas cher, facilement "usinable" [9] pour donner la géométrie voulue à l'aimant et le matériau 2 est un matériau doux dont $B_{sat}$ est ≥ b qui est là pour permettre la production d'un b éventuellement intense (la technologie actuelle permet de fabriquer des matériaux dont $B_{sat}$ atteint 2,45 T).

Les matériaux 1 et 2 seront des matériaux "transparents" pour notre étude : on verra que leur longueur $\mu_1$ et $\mu_2$ n'interviendra pas. Le matériau dur est souvent moins facilement usinable que les matériaux doux [10]. Ce sera un "pavé" dans la suite du cours.

## 2.7-Détermination des dimensions L et S du matériau dur

Le matériau dur est supposé choisi [11], c'est-à-dire que son cycle d'hystérésis est une donnée du problème. Imaginons que le cycle d'hystérésis du matériau dur est le suivant :




Ce matériau dur impose une caractéristique B(H) qui joue le même rôle que la caractéristique statique d'un générateur U(I) d'un circuit électrique. L'entrefer peut être considéré comme la "charge" du circuit magnétique, il impose également une caractéristique B(H) au circuit magnétique et joue le même rôle qu'une résistance électrique connectée au générateur électrique précédent. Si l'on applique le théorème d'Ampère à la ligne de champ moyenne dessinée au paragraphe 2.1. précédent nous pouvons connaître la caractéristique B(H) imposée par la présence de l'entrefer :

$\sum Hl = NI \Rightarrow \sum Hl = 0$ (pas de bobine magnétisante, donc $I = 0$) $\Rightarrow H.L + H1.\mu 1 + H2.\mu 2 + h.e = O$

Or les matériaux 1 et 2 sont des matériaux magnétiques doux, qui possèdent donc forcément un H faible devant le H du matériau dur (et devant le h de l'entrefer qui est de loin le plus intense) on peut donc supposer que l'on peut négliger $H_1.ℓ_1 + H_2.ℓ_2$ devant H.L (une fois tous les calculs terminés, il faudrait s'assurer, pour être rigoureux, que cette hypothèse de calcul est bien vérifiée). On considère donc que l'équation précédente se résume à :

$$H.L + h.e = O$$

Il faut obtenir une fonction B(H) à partir de la relation précédente afin de pouvoir l'associer à la courbe B(H) du matériau magnétique : il faut donc éliminer la variable h…on n'a pas encore grillé toutes nos cartouches car on sait que l'entrefer est non magnétique, et donc que $h = b/\mu_0$. La relation précédente peut donc s'écrire également

$$H.L + \frac{b}{\mu_0}.e = O$$

considérer que l'on a un tube de champ, et si l'on considère que l'entrefer sera suffisamment petit pour que les lignes de champ ne s'écartent pas les unes des autres lorsqu'elles le traverse, on peut considérer que le flux se conserve, et donc que $B \times S = b \times$

$$H.L + \frac{S.e}{s.\mu_0}B = O$$

s. On obtient donc la relation :

C'est gagné ! On en déduit que :

$$B = -\mu_0 \frac{s.L}{S.e} \times H$$

## 2.8 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons étudié la technologie de réfrigération magnétique. Ensuite la modélisation mathématique et les équations qui permettant de calculer et faire une simulation dans le programme COMSOL pour un aiment permanant.

# *CHAPITRE III*
# *Résultats ET Discussion*

## 3.1 Introduction :

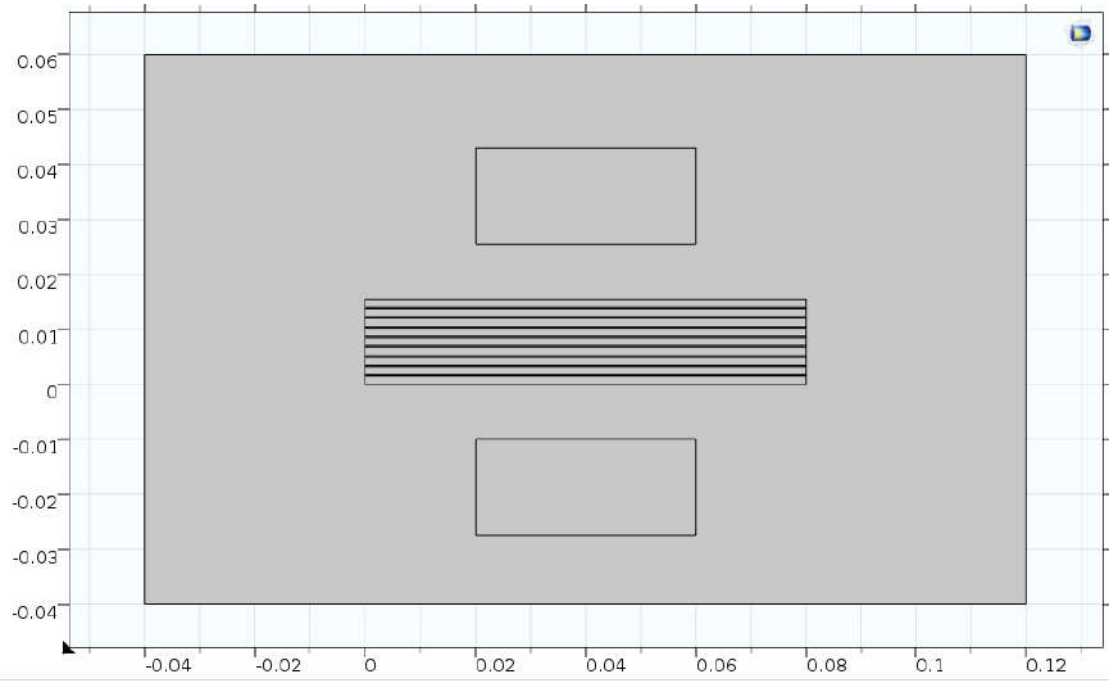
Dans ce chapitre, nous avons étudié la simulation avec les résultats et la discussion par le logiciel COMSOL ; **COMSOL** Multi physiques est un logiciel de simulation numérique basé sur la méthode des éléments finis. Ce logiciel permet de simuler de nombreuses physiques et applications en ingénierie, et tout particulièrement les phénomènes couplés ou simulation multi-physiques

Le logiciel COMSOL et la société correspondante ont été créés en 1986 par des étudiants de Germund Dahlquist, dans la suite de son cours consacré à la simulation numérique à l'Institut royal de technologie (KTH)[1] à Stockholm en Suède. La première version de COMSOL Multi physiques est sortie en 1998.

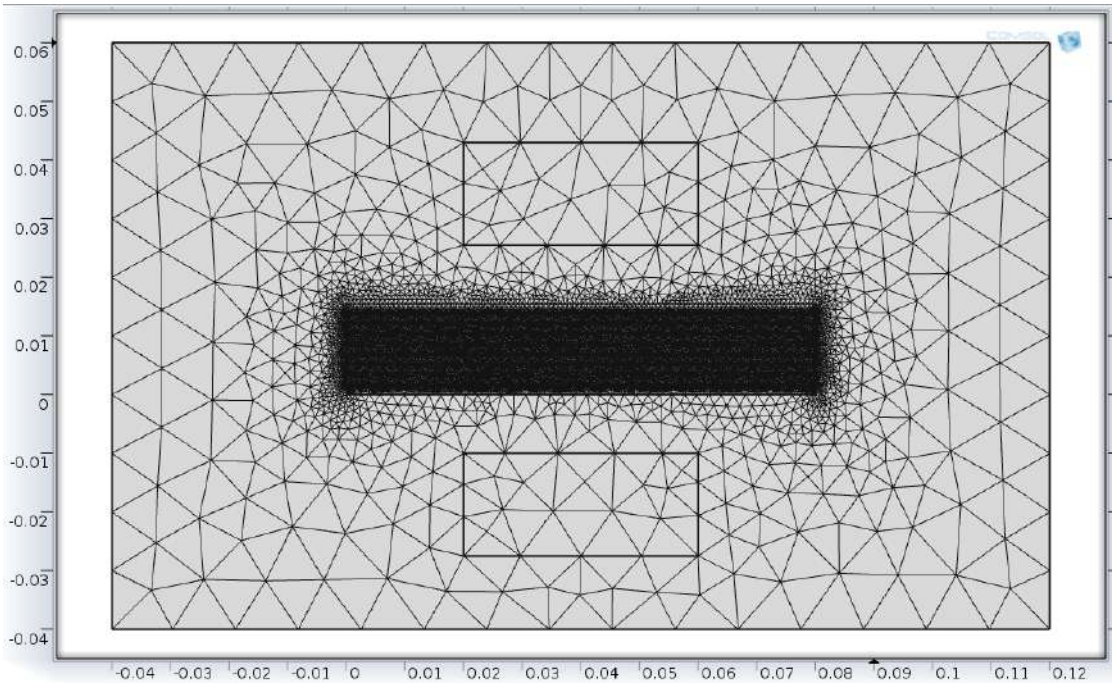
La version initiale (avant 2005) de COMSOL Multi physiques s'appelait FEMLAB

Les ingénieurs et les scientifiques utilisent le logiciel COMSOL Multi physiques pour simuler des conceptions, des dispositifs et des procédés dans tous les domaines de l'ingénierie, de la fabrication et de la recherche scientifique. COMSOL Multi physiques® est une plateforme de simulation qui offre des capacités de modélisation multi physique et mono physique entièrement couplées. Le Constructeur de modèles comprend toutes les étapes de la méthodologie de travail de la modélisation et définition des géométries et des propriétés des matériaux, spécification de la physique qui décrit des phénomènes spécifiques à la résolution, jusqu'au post-traitement des modèles pour produire des résultats précis et documentés.

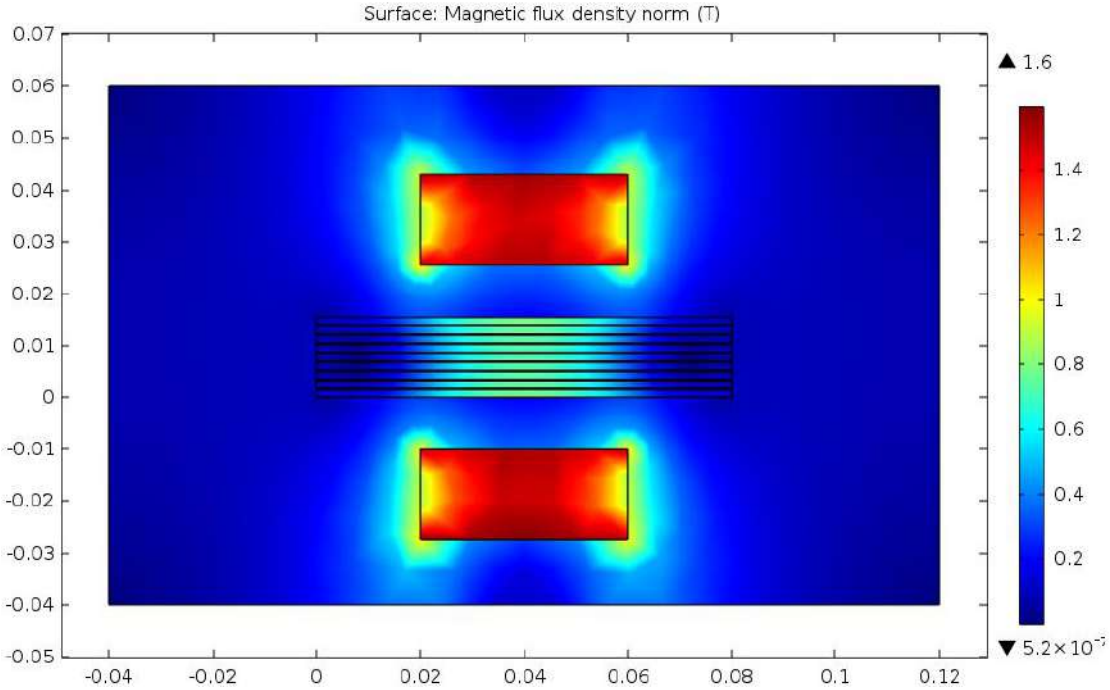
**Géométrie ;**




**Résulta :** maillage

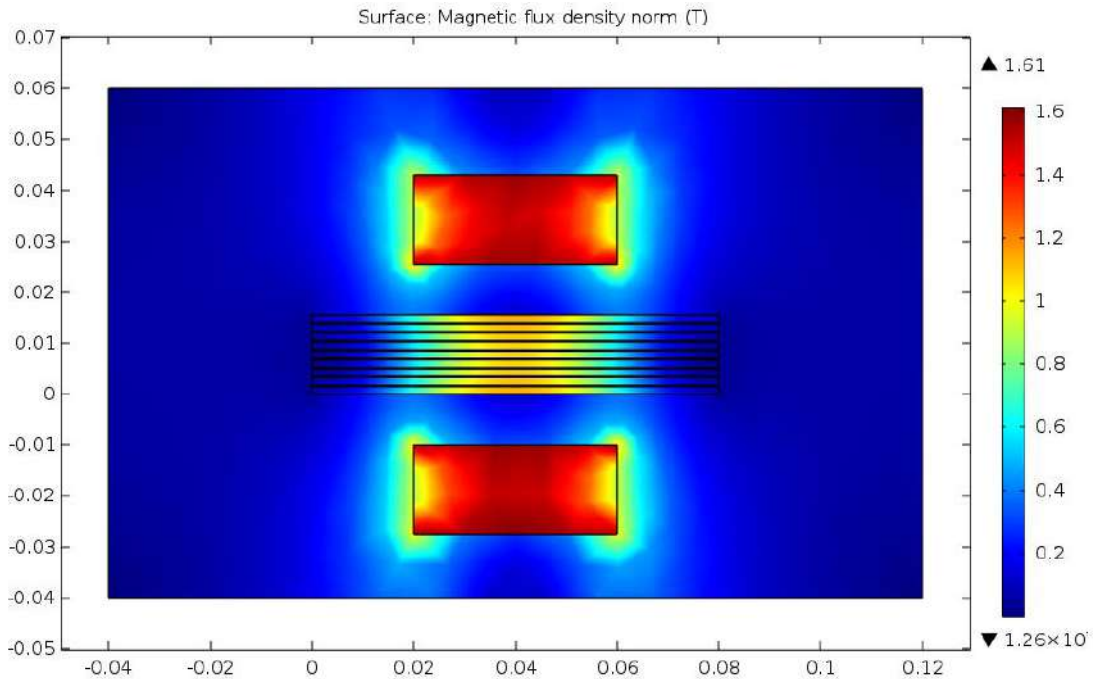


Influence de la densité flux magnétique :




B= 0.5T

Figure 3.1 Simulation de la densité de flux magnétique avec une moyenne de (0.5)T



B : 1T

Figure 3.2 Simulation de la densité de flux magnétique avec une moyenne de (1) T

B :2T

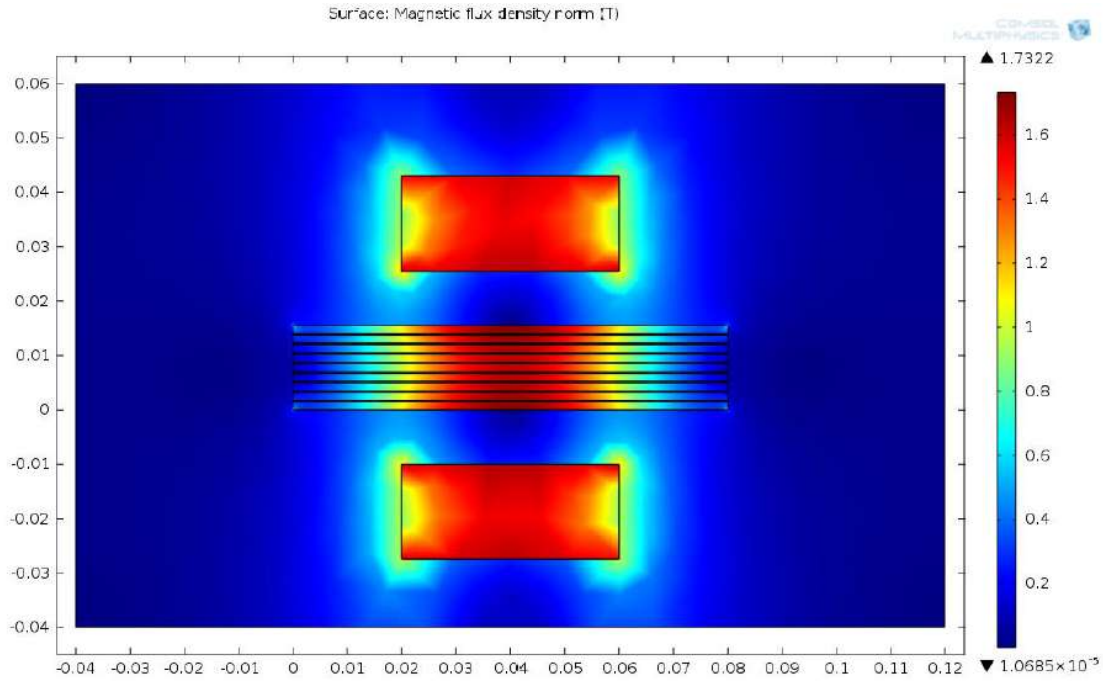
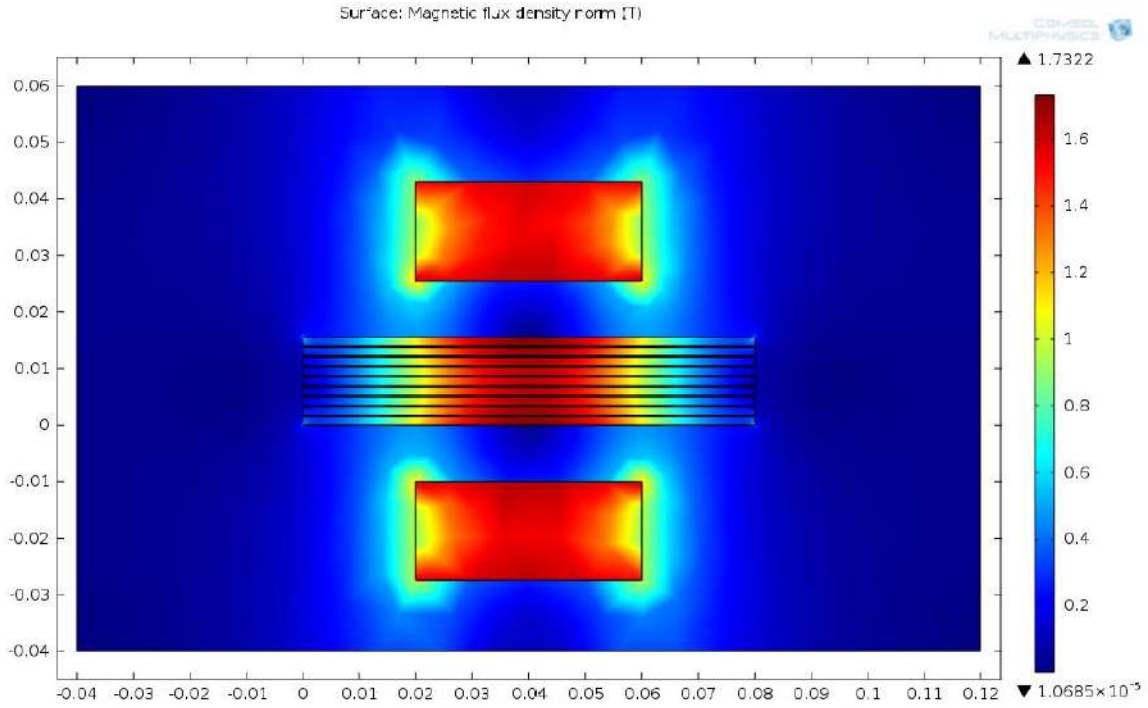
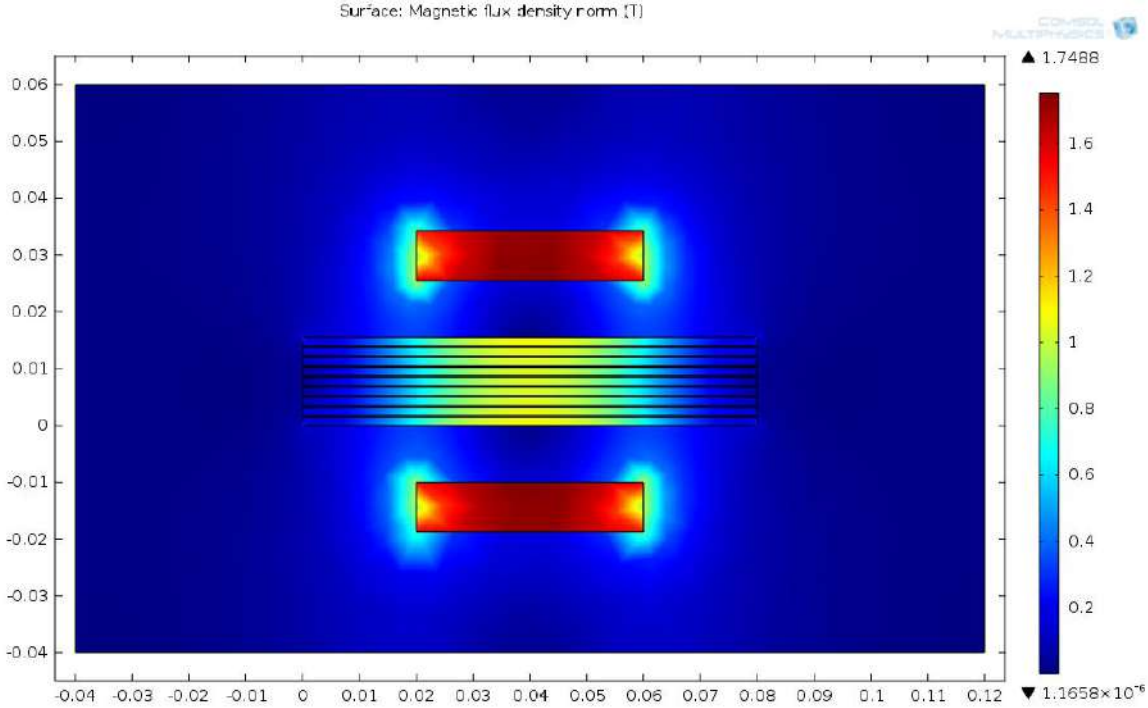
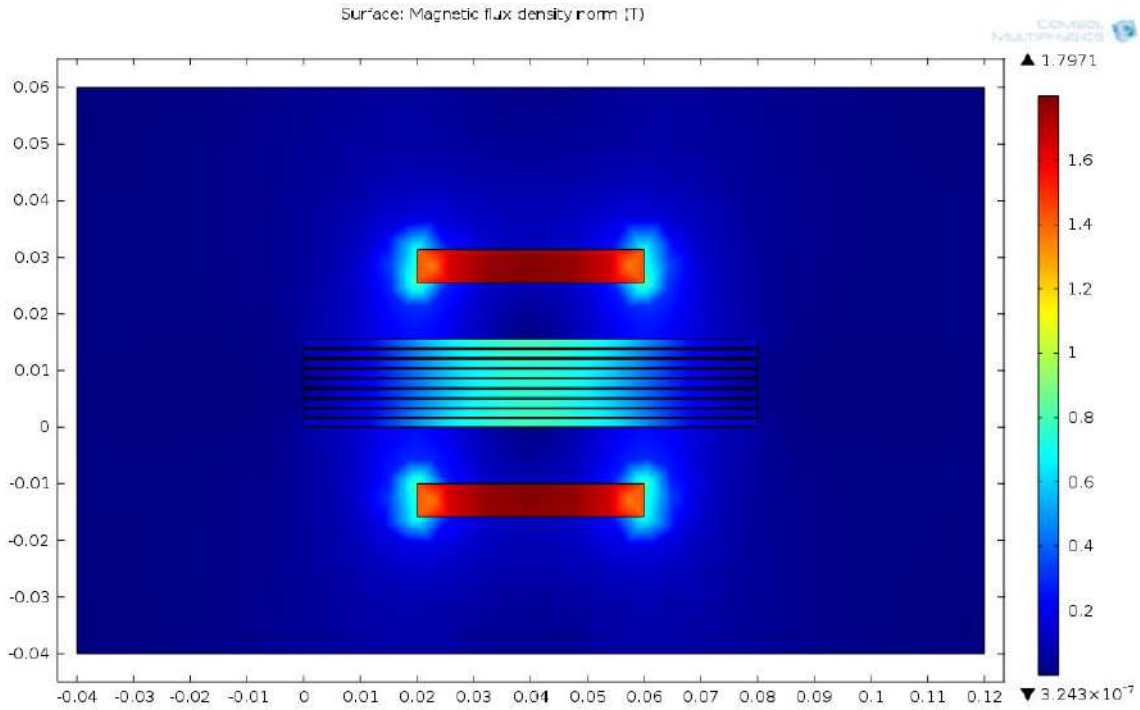



Figure 3.3 Simulation de la densité de flux magnétique avec une moyenne de (2)T

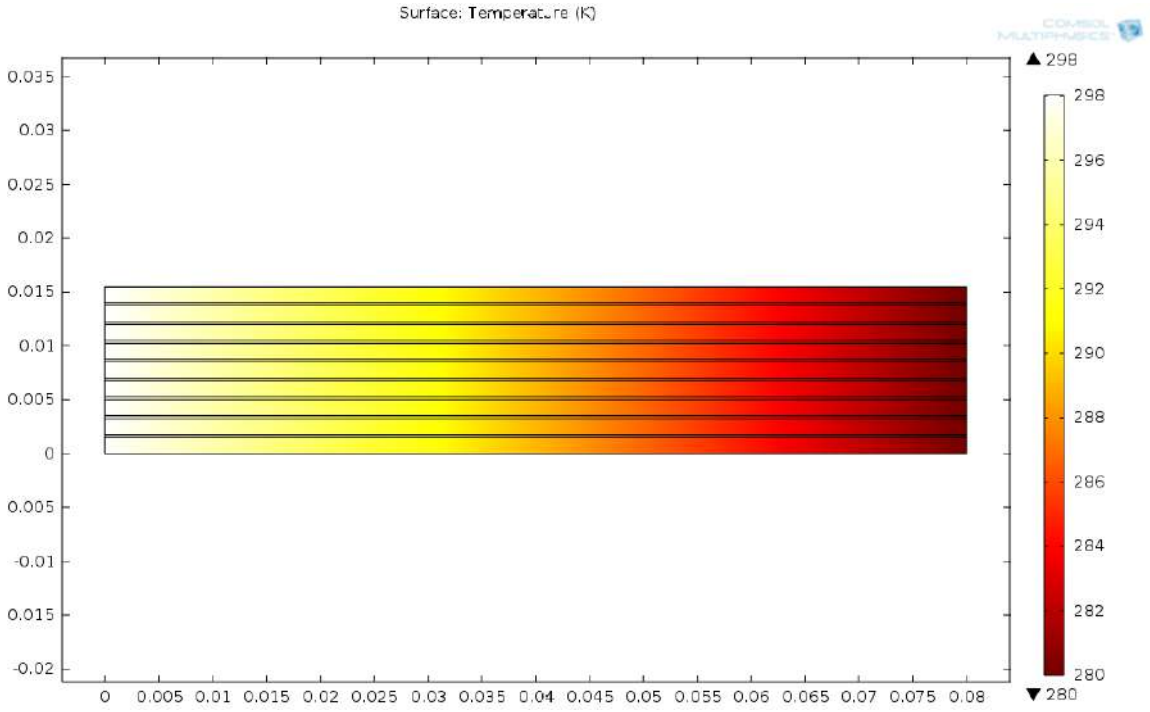
2


Surface: Magnetic flux density norm (T)
▲ 1.7322
1.6
1.4
1.2
1
0.8
0.6
0.4
0.2
▼ 1.0685×10⁻³
0.06
0.05
0.04
0.03
0.02
0.01
0
-0.01
-0.02
-0.03
-0.04
-0.04 -0.03 -0.02 -0.01 0 0.01 0.02 0.03 0.04 0.05 0.06 0.07 0.08 0.09 0.1 0.11 0.12


Surface: Magnetic flux density norm (T)
▲ 1.7488
1.6
1.4
1.2
1
0.8
0.6
0.4
0.2
▼ 1.1658×10⁻⁶
0.06
0.05
0.04
0.03
0.02
0.01
0
-0.01
-0.02
-0.03
-0.04
-0.04 -0.03 -0.02 -0.01 0 0.01 0.02 0.03 0.04 0.05 0.06 0.07 0.08 0.09 0.1 0.11 0.12




Distrubition de la tempurature (figure1)


Surface: Temperature (K)
▲ 298
298
296
294
292
290
288
286
284
282
280
▼ 280
0.035
0.03
0.025
0.02
0.015
0.01
0.005
0
0.005
-0.01
0.015
-0.02
0 0.005 0.01 0.015 0.02 0.025 0.03 0.035 0.04 0.045 0.05 0.055 0.06 0.065 0.07 0.075 0.08

## 3.2 Interprétation des résultats :

Observant les figures précédents, on peut faire les observations suivantes :
La proportionnalité entre le champ et le potentiel électrique est une Proportionnalité exponentielle, où que chaque fois le potentiel augmente, il y a une augmentation correspondante à la quantité du champ électrique
* Une proportionnalité inverse entre le champ électrique et la distance inter-Électrode.
A partir de ces résultats, nous avons tiré les observations suivantes :
* Une proportionnalité inverse entre le champ électrique et l'angle du pointe ,
Dans cette partie, on a effectué une simulation en utilisant le logiciel COMSOL D'après l'étude menée, on a conclue que :
*Le champ augmente quand la distance inter-électrode diminue.
*L'intensification des champs électriques dépend des régions où le rayon est petit (pouvoir de pointe).
*La progression de la décharge électrique modifie la répartition du champ sur le plan en particulier au point situé au dessous de la pointe.
C'est pour cela dans les appareils de HT , les distances inter-électrodes sont grandes.

## 3.3 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons fait une simulation par logiciel COMSOL pour étude une variation de champ magnétique pour un aiment permanant

# CONCLUSION GENERAL

## Conclusion General

La réfrigération magnétique constitue une alternative à la technologie classique de production du froid. Elle est prometteuse et devrait permettre de réaliser des systèmes compacts et à haute efficacité énergétique tout en préservant l'environnement. Elle répond de ce fait aux préoccupations actuelles relatives à la maîtrise et l'économie de l'énergie et à la réduction des gaz à effet de serre. Cependant c'est une thématique émergente qui malgré l'importance et la richesse des travaux de recherche réalisées ces dernières années reste encore "vierge".

La rupture technologique qu'elle offre nécessite de lever un certain nombre de verrous scientifiques et techniques relatifs au matériau et au système. Le travail réalisé dans le cadre de cette thèse est une contribution à l'étude et la modélisation thermique et électromagnétique des systèmes de réfrigération magnétique. Il montre déjà clairement que la conception et l'optimisation de ces systèmes doivent faire appel à des outils de simulation numérique spécifiques, car les difficultés liées au comportement thermique, au comportement magnétique, aux contraintes mécaniques et surtout aux besoins de l'utilisateur sont souvent nombreuses.

Après une analyse du principe de fonctionnement de la réfrigération magnétique, nous nous sommes intéressés au comportement thermique de ces systèmes, le cycle mis en œuvre pouvant être direct ou à régénération magnétique active AMRR. Nous avons alors proposé deux modèles thermiques ; le premier analytique pour les cycles directs et le deuxième numérique basé sur la méthode des différences finies pour les systèmes AMRR. Ces modèles et les outils associés ont été développés dans un souci de simplicité et de flexibilité afin qu'ils puissent être utilisés de manière aisée et surtout de pouvoir être complétés et enrichis ultérieurement. Ainsi nous les avons tout d'abord exploités pour évaluer les caractéristiques thermiques de quelques blocs réfrigérants. Par la suite nous avons pu intégrer les échangeurs et analyser l'influence du milieu externe (air ambiant, charge, perturbations, disfonctionnement, etc.). De manière plus originale, nous avons implanté une méthode inverse permettant, à partir des besoins de l'utilisateur, de calculer les dimensions d'un système RM respectant un cahier des charges et des contraintes données. De plus, une étude par la méthode statistique des plans d'expériences nous a permis d'identifier les facteurs les plus influents sur ce modèle, ces facteurs ayant été optimisés par la suite. Au cours de ces études, nous avons été confrontés à des problèmes

de convergence numérique majeurs qui n'ont pas été complètement résolus en particulier lors de la prise en compte de la conduction thermique. Il serait important de compléter ces travaux car ce phénomène peut altérer de manière non négligeable les performance du cycle AMRR. De même, il serait également important de généraliser l'outil développé à des formes quelconques de blocs réfrigérants et de l'exploiter en approche directe ou inverse pour évaluer leur performance et les optimiser.

En complément du comportement thermique, la deuxième partie de cette thèse a été consacrée à la conception et l'optimisation électromagnétiques des systèmes de réfrigération magnétique. Cette étude a été axée sur deux plans ; il fallait d'une part répertorier les structures existantes, les modéliser et les optimiser et d'autre part, imaginer de nouvelles structures puis en faire la conception. Pour ce faire, nous avons utilisé le logiciel Flux. Mais compte tenu de nombre important de simulations effectuées, nous avons développés des interfaces spécifiques. Elles ont permis de faciliter et d'accélérer la description géométrique d'une part et d'autre part d'exploiter les résultats de manière systématique et dans des conditions comparatives identiques. Les systèmes de réfrigération étudiés ont été classés suivant leurs performances en trois catégories : 1ère, 2ème et 3ème génération. Pour chaque catégorie nous avons proposé un certain nombre de structures comportant chacune différentes configurations possibles et nous avons évalué leurs performances magnétiques. Ces structures sont basées sur des sources de champ à aimants permanents ou à bobines supraconducteurs. Certaines sont tout a fait originales.

Les modélisations thermique et électromagnétique ont été menées dans ce travail de manière indépendante. Nous savons que ces phénomènes sont fortement couplés en pratique. Un travail important reste à faire pour réaliser ce couplage fort et aboutir à une modélisation complète d'un système de réfrigération magnétique.

Nous espérons avoir posé, par ce travail, les jalons des systèmes de réfrigération magnétique qui permettront à des recherches ultérieures d'approfondir un ou plusieurs des systèmes proposés ou même de s'en inspirer pour faire la conception de nouveaux systèmes

# REFERENCES

# REFERENCES

## 4.1 Reference bibliographique


[1] G. V. Brown. Magnetic heat pumping near room temperature. Journal of appleid physics, 47 (8):3673_3680, 1976.

[2] B. Yu, M. Liu, P. W. Egolf, and A. Kitanovski. A review of magnetic refrigerator and heat pump prototypes built before the year 2010. International Journal of Refrigeration, 33(6) : 1029 _ 1060, 2010.

[3] O. Sari, P. W. Egolf, N. Alber, and N. Erbeau. Démonstrateur magnétique. Rapport _nal : Bundesamt für Energie BFE, pages 01_14, 2006.

[4] M. Balli, O. Sari, C. Mahmed, Ch. Besson, Ph. Bonhote, D. Duc, and J. Forchelet. A preindustrial magnetic cooling system for room temperature application. Applied Energy, 98(0) : 556 _ 561, 2012.

[5] O. Sari and M. Balli. From conventional to magnetic refrigerator technology. International Journal of Refrigeration, 37 :8_15, 2014.

[6] K. A. GschneidnerJr and V. K. Pecharsky. Thirty years of near room temperature magnetic cooling: Where we are today and future prospects. International Journal of Refrigeration, 31:945_961, 2008.

A. Rowe and A. Tura. Experimental investigation of a three-material layered active magnetic regenerator. International Journal of Refrigeration, 29(8) :1286 _ 1293, 2006Lebouc, A., Allab, F., Fournier, J. M. et Yonnet, J. P. (2005).

Réfrigération magnétique. Tech. Ing., (RE 28-1):1–16.

[7] E. Warburg. Magnetische untersuchungen. Ann. Phys., 13 :141_164, 1881.

[8] A. Smaïli and R. Chahine. Thermodynamic investigations of optimum active magnetic regenerators. Cryogenics, 38 :247_252, 1998.

[9] P. W. Egolf and S. Gama. The 5th international conference on magnetic refrigeration, {THERMAG} v, in grenoble. International Journal of Refrigeration, 36(5) :1584 _ 1586, 2013.

[10] H. Auracher and D. Coulomb. A tribute to peter w. egolf. International Journal of Refrigeration, 37 :6_4, 2014.

K. A. GschneidnerJr and V. K. Pecharsky. Thirty years of near room temperature

# REFERENCES

magnetic cooling : Where we are today and future prospects. International Journal of Refrigeration, 31 :945_961, 2008

[11] Transducteurs électromécaniques, de Jüffer, Traité de l'école Polytechnique Fédérale de Lausanne Matériaux aimants permanents pour l'électrotechnique, de Gilbert NICOUD, revue RGE - Mars 1981. Renouveau des petits moteurs électriques, de Gérard lacroux, revue RGE - Mars 1981