الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE DR. YAHIA FARES DE MEDEA

FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE

**Département du Génie de la matière**



**Présenté pour l'obtention du :**
**Diplôme de Master en Génie Climatique**

***Spécialité* : Energie et froid industriel**

THEME

# CONCEPTION DE LA SOURCE DE CHAMP MAGNETIQUE DES DISPOSITIFS DE REFRIGERATION MAGNETIQUE MAGNETIQUE

**Proposé et dirigé par :**

**Mr : Chiba Younes**

**Mr : Houassine Hamza**

**Préparé et présenté par :**

BOUAFIA Tarik
SOUIDI Lokmane

*Promotion : 2015/2016*

**ملخص**

يهدف هذا العمل المنجز في في اطار هذا البحث مساهمة في الدراسة الحرارية و الكهرومغناطيسية لأنظمة التبريد المغناطيسية، يبرهن هذا البحث بوضوح أن المفهوم الاحسن للأنظمة يتطلب وسائل محاكاة عددية لأن الصعوبات المرتبطة بالتعزيز الحراري والمغناطيسي والصعوبات الميكانيكية وخاصة بالنسبة لحاجة المستعمل هي غالبا عديدة، تناولت عدة بحوث للدراسات الحرارية والكهرومغناطيسية بشكل حر.

نامل في هذا العمل طرح علامة لأنظمة التبريد المغناطيسي التي ستسمح للبحوث التي تأتي بعدها بالتعمق في أحد أو عديد للأنظمة المقترحة او تكون مصدر إلهام لوضع مفهوم للأنظمة الجديدة وتحقيقها.

---

**Résumé**

Le travail réalisé dans le cadre de cette mémoire 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. Les modélisations thermique et électromagnétique ont été menées dans ce travail de manière indépendante. 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 et les réaliser.

**Mots-clés** réfrigération magnétique, champ magnétique, effet magnétocalorique, simulation numérique**.**

---

**ABSTRACT**

The work achieved within this mémoire is a contribution to the study and modelling of thermal and electromagnetic behaviour of magnetic refrigeration systems. It shows clearly that the design and optimization of such systems must use specific numerical simulation tools due to the numerous difficulties related to the thermal behaviour, the magnetic behaviour, the mechanical behaviour and especially to the user's needs. Both of thermal and electromagnetic modelling have been carried out in this work independently. We hope to have posed by this work, the foundation for magnetic refrigeration systems that will allow further research to deepen one or more of the proposed systems or even inspire them to design new systems and achieve them .

**Keywords :** Magnetic Refrigeration, Magnetic field **,**Magnetocaloric effect , Numerical simulation,

# DEDICACE

À la source de tendresse, de générosité de bonheur, à celle qui a consacré sa vie

Pour que je réussisse dans tout ce que j'entretiens, à toi ma très chère mère

À Qui je souhaite une longue vie.

À mon très cher père. Pour l'affection dont tu me comble, pour ta patience, ton

Optimisme, ta tolérance, ta présence régulière et constante à tout Instant.

À mes très chères frères et mes très chères sœurs qui me poussé jusqu'au bout, sans

Oublier mes oncles, mes cousines et mes cousins.

Je remercie mes amies : Abdel ghani , hichem , Abdel nour , Hamza et abdel kader.

Pour leur encouragement .

À toutes mes collègues de la promotion 2015/2016.

Enfin À toute personne qui a contribué de près ou de loin à la réalisation De ce

modeste travail.

TARIK

# إهداء

نحن لا نخط اهداء الا للغرباء فقط ، اما الذين نحبهم وتاريخنا كله مؤثث بذكراهم والذين بأسمائهم طرزوا تفاصيل عمري أما الذين يستحقون أن أستهلك معهم احتياطي الحب واحتياطي الوفاء لذاكرة مشتركة ، والذين وجودهم في حياتي أغلى ما أستطيع الحفاظ عليه بين أهداب عيني فمكانهم ليس في الصفحة البيضاء الأولى و لا حتى داخل صفحات الكتاب ،وانما مكانهم في المكان الطبيعي الذي أتمنى على فوضاه وصغره أن يكون مناسبا لهم ، والذي من دونهم سوف لن يكون ال موحشا كالصحراء وباردا كمقبرة القلب.

والى أبي رحمة الله عليه وأمي أطال الله في عمرها .

لقمان

# REMERCIEMENT

Par où commencer ? C'est toujours la grande question qui se pose lorsqu'on arrive aux remerciements. Mes premiers remerciements vont naturellement à mon encadrant, Mr CHIBA Younes, Je remercie également les membres de mon jury  Merci à monsieur Mr houassine Hamza  pour l'aide,  J'exprime aussi ma gratitude aux personnes m'ayant permis de réaliser ce parcours qui m'a mené jusqu'à la réalisation de cette thèse : merci à aux enseignants et encadrants que j'ai eu au cours de mon parcours scolaire et universitaire .

J'ai aussi une pensée pour tous mes amis et collègues, Je remercie très spécialement toute ma famille commençant par ma princesse mère, pour tous les sacrifices qu'elle a faits pour moi. Un très grand merci à celles et ceux qui ont participé à la préparation de mon pot de thèse que j'ai trouvé fabuleux!

Tarik et Lokmane

# Table des matières

## Tables des matières

Dédicaces ..... i

Remerciements..... iii

Table des matières ..... iv

Liste des figures ..... vi

Liste des tableaux ..... vii

Nomenclature..... viii

Introduction générale .....15

**Chapitre 1 : La réfrigération magnétique**

1.1 Généralité sur la réfrigération magnétique .....18

1.1.1 principe de fonctionnement .....18

1.1.2 Critère de choix .....20

1.2 Les principaux cycles de la réfrigération magnétique .....21

1.2.1 Cycle d'Ericsson .....21

1.2.2 Cycle de Brayton .....22

1.3 la réfrigération magnétique active à régénération AMR .....23

1.3.1Critères d'efficacité de l'AMRR .....24

**Chapitre 2 : L'effet magnétocalorique et matériaux**

2.1 Introduction .....27

2.2 L'effet magnétocalorique EMC .....27

2.2.1 Historique .....27

2.2.2 Approche thermodynamique de L'EMC.....29

2.3 Les matériaux à effet magnétocalorique .....30

2.3.1 Présentation .....30

2.3.2 Caractérisation des matériaux magnétocalorique .....31

2.3.2.1 Mesure directe ……31

2.3.2.2 Mesure calorimétrique ……32

2.3.2.3 Mesure magnétique ……33

2.3.3 Principaux matériaux magnétique……33

**Chapitre 3 : Les différents moyens de création de champ magnétique**

3.1 Introduction ……37

3.2 Quelque notion de base sur le magnétisme ……37

3.3 Matériau magnétique ……37

3.3.1 Classification des matériaux magnétique ……37

3.4 Les différents systèmes de création du champ magnétique ……38

3.4.1 les électroaimant ……38

3.4.2 Les aimants supraconducteurs ……38

3.4.3 les aimants permanant ……38

3.5 Simulation du circuit magnétique ……39

3.5.1 Structure magnétique simple ……44

3.5.2 Structure magnétique de Halbach ……45

**Chapitre 4 : Résultat et discussion** ……47

4.1 Propriétés magnétiques des matériaux magnéto caloriques……47

Conclusion générale ……58

Bibliographie ……60

# Liste des figures

## Liste des figures

1.1 Comparaison entre la réfrigération magnétique et la réfrigération simple……19

*1.2* Cycle magnétique d'Ericsson ……22

1.3 Cycle magnétique de Brayton ……22

1.4 Aimentation du matériau à partir à partir d'un état initial où tout le système est $T_a$……24

2.1 Schématisation de l'effet magnétocalorique, les flèche dans le matériau symbolisent l'orientation des moment magnétique ……29

2.2 Capacité thermique massique musérée et l'EMC($\Delta$Tad) déduit par l'alliage de gadolinium …..32

2.3 Transition de phase et variation de l'entropie en fonction de type de matériau……34

3.1 *Structure de base en forme de C ……40*

*3.2* Section transevesale d'un aimant permanat construit selon le Principe de Halbach……41

4.1 Simulation numérique de la direction des lignes de champs magnétique dans le circuit ……48

4.2.a l'induction magnétique B le long de la barre de Gd.(entré de magnéto)……49

4.2.b l'induction magnétique B le long de la barre de Gd(sorti de magnéto)……49

4.3 simulation numérique de deux bloc de Gd ……50

4.4 .a l'induction magnétique B le long de deux bloc de Gd.( sorti de magnéto )……50

4.4.b l'induction magnétique B le long de deux bloc de Gd.( entré de magnéto )……51

4.5 Force statique en fonction de déplacement d'un seul bloc Gd……51

4.6 Force statique en fonction de déplacement de deux blocs de Gd ……52

4.7 la variation du travail en fonction de la distance de un seul bloc……53

4.8 la variation du travail en fonction de la distance deux blocs……53

4.9 Capacité calorifique du gadolinium……54

4.10 effet magnétocalorique du Gadolinium……55

4.11 variation d'entropie du Gadolinium……56

# Liste des tableaux

## Liste des tableaux :

2.1 caractérésation de quelque matériaux à EMC géant autour la température ambiante……31

2.2 Propriétés de certains matériaux magnétocaloriques……35

3.1 Classification des matériaux magnétique……37

3.2 proprieties magnétique des aimants……39

*4.1* les différent propriété du gadolinium……47

# Nomenclature

# Nomenclature

| *Symbol* | *Désignation* | *Unité* |
|---|---|---|
| $B$ | Champ magnétique | T |
| $COP$ | Coefficient de performance | - |
| $C_p$ | Chaleur spécifique | $J.Kg^{-1}.K^{-1}$ |
| $h$ | Coefficient d'échange convectif | $W.K^{-1}.m^{-2}$ |
| $S$ | Entropie | $J.Kg^{-1}.K^{-1}$ |
| $S_e$ | Entropie électronique | $J.K^{-1}.mole^{-1}$ |
| $S_M$ | Entropie magnétique | $J.K^{-1}.mole^{-1}$ |
| $T$ | Température de fluide | C ou K |
| $T_c$ | Température de curie | K |
| $t$ | Temps | S |
| $\Delta S$ | Variation isotherme d'entropie | $J.Kg^{-1}.K^{-1}$ |
| $T_D$ | Température de Debye | K |
| $W$ | Travail | J |
| $\boldsymbol{\mu_0}$ | perméabilité magnétique du vide | $H.m^{-1}$ |
| $T_H$ | Température de la source chaude | K |

**Principales abréviations :**

EMC effet magnétocalorique

RM réfrigération magnétique

AMR régénération magnétique active

# 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 médical, 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 palier ce problème en suivant deux voies parallèles: la première, on cherche à maintenir la technologie conventionnelle et à trouver des nouveaux fluides frigorifiques 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 part 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 multiphysique 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 fluidique des systèmes de réfrigération magnétique .

Ce manuscrit se décompose en quatre chapitres : dans le premier chapitre, Nous présenterons le principe de la réfrigération magnétique et les principaux cycles dans la réfrigération magnétique (Ericsson et Brayton ) ,ainsi que le cycle AMRR.

Le chapitre 2 est dédié à l'étude des matériaux magnétocalorique . après une approche thermodynamique de L'EMC .nous représentons ainsi les caractérisation des matériaux magnétocalorique.

Dans le chapitre 3 nous citons les différent types de création du champ magnétique à partir des cycles magnétique à base d'aimant permanant .

Le chapitre 4 sera consacré aux calcules de source du champ, grâce à de simulations éliment finis 2D sur des structure connues .

# Chapitre 1 : La réfrigération magnétique

## *1.1* Généralité sur la réfrigération magnétique

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.

### *1.1.1 Principe de fonctionnement*

Un système de réfrigération magnétique est constitué essentiellement d'un matériau magnétocalorique 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 réfrigération magnétique est basée sur des cycles composés de quatre phases qui peuvent se Chevaucher selon le cycle utilisé :

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

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, la température du réseau diminue et par conséquent le matériau se refroidit.

La figure (1.1) montre que le principe e 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 magnéto calorique) et le fluide caloporteur respectivement dans le cas de réfrigération magnétique.

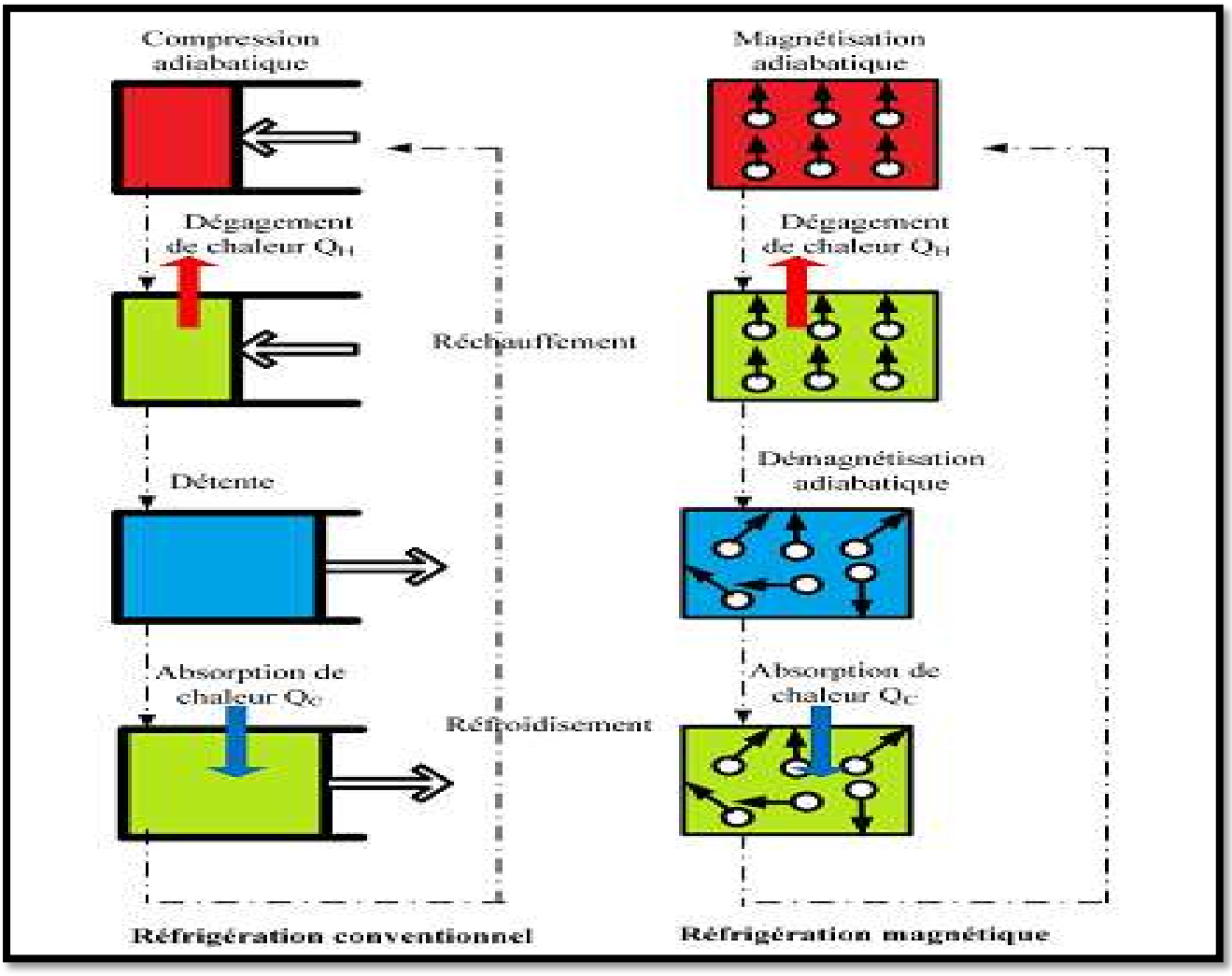



**Figure 1.1:** comparaison entre la réfrigération magnétique et la réfrigération simple .[Chiba 2015].

La figure (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. [ chiba 2015]

### *1.1.2 critère de choix*

Le rendement et l'efficacité d'un système de réfrigération magnétique dépendent du matériau Magnétocalorique, du fluide, de la source de champ et du cycle magnétothermique. Les solutions envisagées doivent être guidées par les Considérations suivantes :

— forte variation d'entropie magnétique ΔSm(μ0H , T) du matériau afin de disposer d'une forte puissance frigorifique .

— fort effet magnétocalorique EMC (écart de température ΔTad) .

— forte capacité thermique massique cP (μ0H, T) pour réduire les oscillations en température lors des alternances des débits du fluide .

— température de Curie TC voisine de la température de la source froide.

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

— faible porosité afin de limiter le volume mort .

— faible rugosité du matériau et faible viscosité du fluide pour réduire les pertes de charge à l'écoulement.

— fort coefficient d'échange thermique h.

Les quatre premiers critères sont propres au matériau et dépendent du champ magnétique. Les autres dépendent du matériau, de sa géométrie, de la nature du fluide et de la rhéologie de l'écoulement. Ils sont incontournables pour optimiser les échanges de la surface d'échange et le volume total du régénérateur (m2/m3) .

D'autres considérations peuvent également guider le choix du matériau ou du fluide, en particulier le coût, les propriétés physico-chimiques (oxydation), la toxicité, etc.

## *1.2 Les principaux cycles de réfrigération magnétique*

Pour produire du froid, il est possible de remplacer les systèmes conventionnels basés sur des cycles de compression-décompression d'un gaz frigorifique par d'autres mettant en Jeu des cycles d'aimantation-désaimantation de matériaux magnétocaloriques.

Plusieurs types de cycles sont applicables à la réfrigération magnétique, il s'agit des cycles de Carnot, de Stirling, d'Ericsson ou de Brayton. 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 . [ Charlotte MAYER,2011].

### *1.2.1 Le cycle magnétique d'Ericsson*

La figure (1.2) représente le schéma de base d'un réfrigérateur magnétique à régénération externe Fonctionnant suivant le cycle d'Ericsson. Il consiste en deux transformations iso thermiques et deux Transformations iso champs. Celles-ci sont dénies comme suit :

1. Aimantation isotherme, le matériau étant à la basse position, où il peut rejeter la quantité de Chaleur QH, à la source chaude de température TH .
2. Refroidissement à champ constant, le contenant du fluide caloporteur se déplace vers le bas en soustrayant de la chaleur du matériau, jusqu'à ce que sa température devienne égale à TC.
3. Désaimantation isotherme, le matériau étant à la haute position, où il peut absorber la quantité de Chaleur TC de la source froide à la température TC .
4. Réchauffement à champ nul, le contenant remonte vers le haut en cédant de la chaleur au matériau, jusqu'à ce que sa température devienne égale à TH.[Chiba 2015].

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

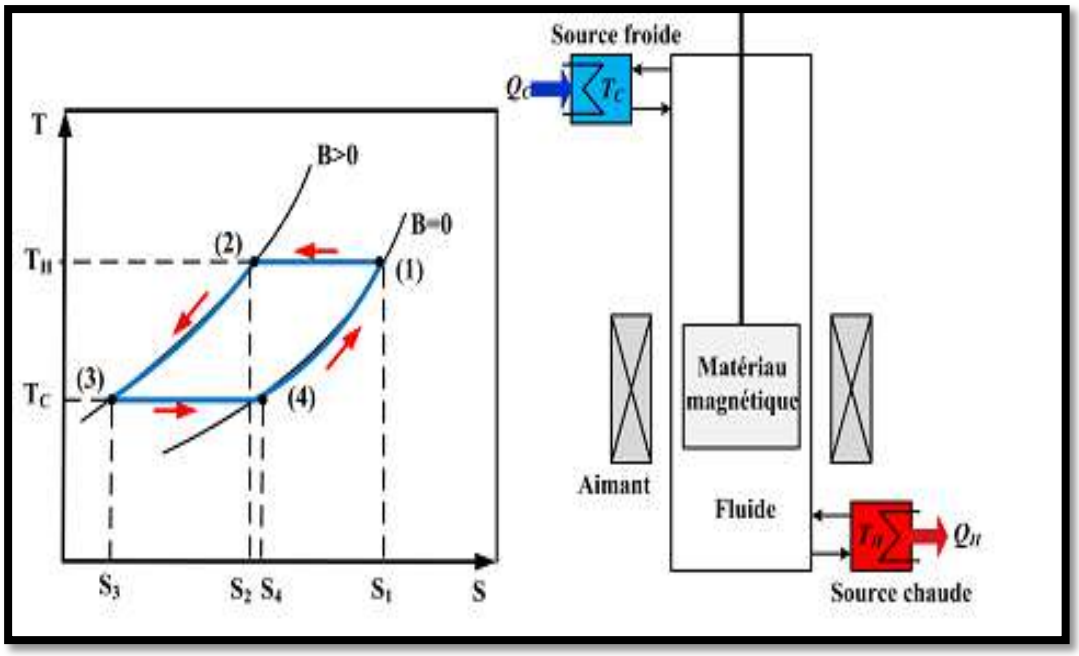



***Figure 1.2***: Cycle magnétique d'Ericsson [Chiba 2015].

### 1.2.2 Le cycle magnétique de Brayton

Le cycle de Brayton est constitué de deux processus adiabatique (BC) et (DA) et Deux processus à champ constant. Comme le la figure(1.3) ci-dessous :

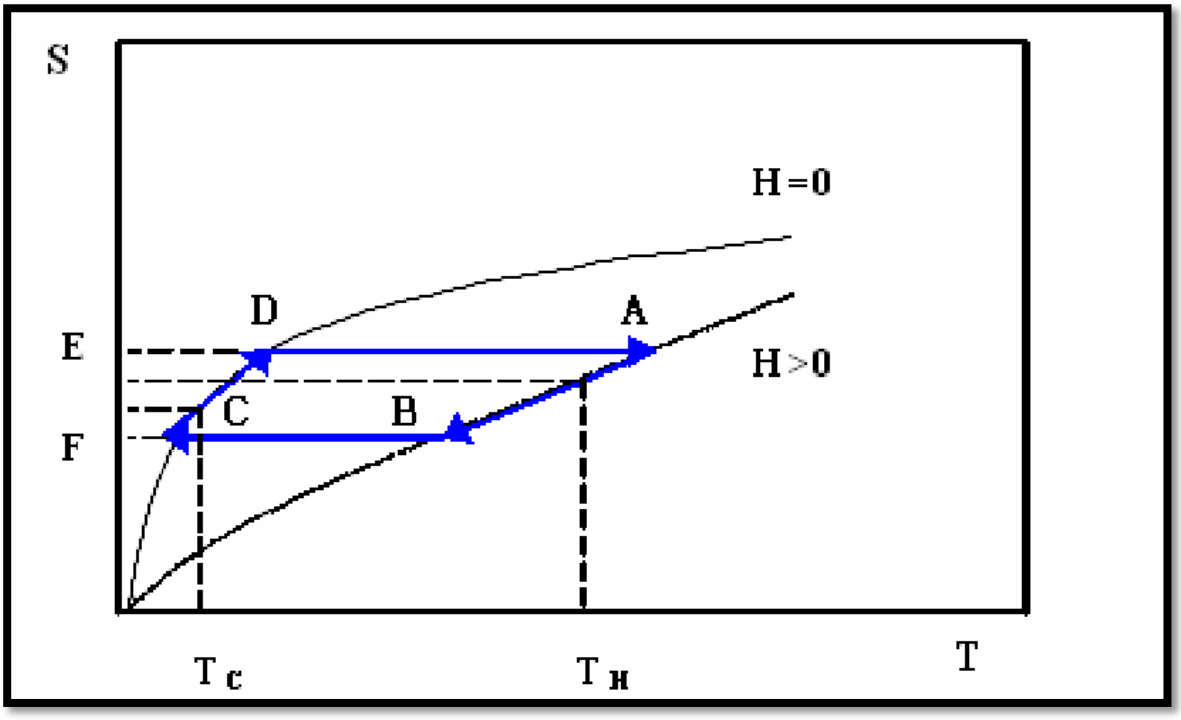



**Figure 1.3:** Cycle magnétique de Brayton [Mohamed Balli 2007].

Le long du processus à champ constant (AB), le matériau magnétocalorique cède une Quantité de chaleur égale à la surface (ABFE), durant le processus (CD), le matériau absorbe une Quantité de chaleur égale à la surface (CDEF).

### 1.3 la réfrigération magnétique active à régénération AMR

L'exploitation directe de l'EMC géant autour de la température ambiante est limitée par le fait quelques matériaux magnétoélectriques existants ne permettent pas d'atteindre des écarts de températures élevés [Lebouc 2005]. Par exemple, un échantillon de gadoliniumautour de la température ambiante produit un EMC d'environ 10 K sous un champmagnétique de 5 T. Sachant que le gadolinium est considéré comme l'un des meilleurs matériaux magnétocalorique disponibles actuellement [Tura2002], cet EMC correspond à la valeur absolue maximale pouvant être atteinte entre le réservoir chaud et le réservoir froide il est certainement difficile d'imaginer l'exploitation de cet EMC dans la plupart des applications de réfrigération [Engelbrecht2005]. Cette barrière technique a été surmontée grâce à l'application de la réfrigération magnétique active à régénération AMRR (Active Magnetic Regenerative Refrigeration) [Engelbrecht 2005] [Lebouc 2005] [Tura 2002]. 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[Yu2003].Donc la capacité utilisée pour le refroidissement de la charge du réseau peut être utilisé efficacement pour augmenter la variation effective de l'entropie et l'écart de température résultant[Yu2003].

Le cycle AMRR est illustré dans la figure 1.4. On considère un lit régénérateur composé de plaques de matériaux magnétocaloriques ayant initialement un profil de Température quasi linéaire entre les deux réservoirs chaud et froid . L'AMRR comporte quatre étapes qui sont [ bouchekara 2008] :

- ✓ Aimantation du matériau. La température augmente alors tout le long du litrégénérateur par effet magnétocalorique. La température du matériau, côté chaud ,devient supérieure à celle du réservoir chaud.
- ✓ Ecoulement du fluide du réservoir froid vers le réservoir chaud .Ce ci conduit La température du lit à baisser au contact du fluide initialement froid (venant du réservoir froid). Quant au fluide ,il va voir sa température augmenter .Durant cette étape ,le lit rejette sa chaleur au fluide et si cette phases suffisamment longue ,le matériau revient à sa température initiale.

- ✓ Désaimantation du matériau entraînant une baisse de sa température.
- ✓ Ecoulement en sens inverse du fluide du réservoir chaud vers le réservoir froid.

Ce fluide , initialement chaud ,va échanger avec le lit ,qui va lui permettre de revenir à sa température initiale.

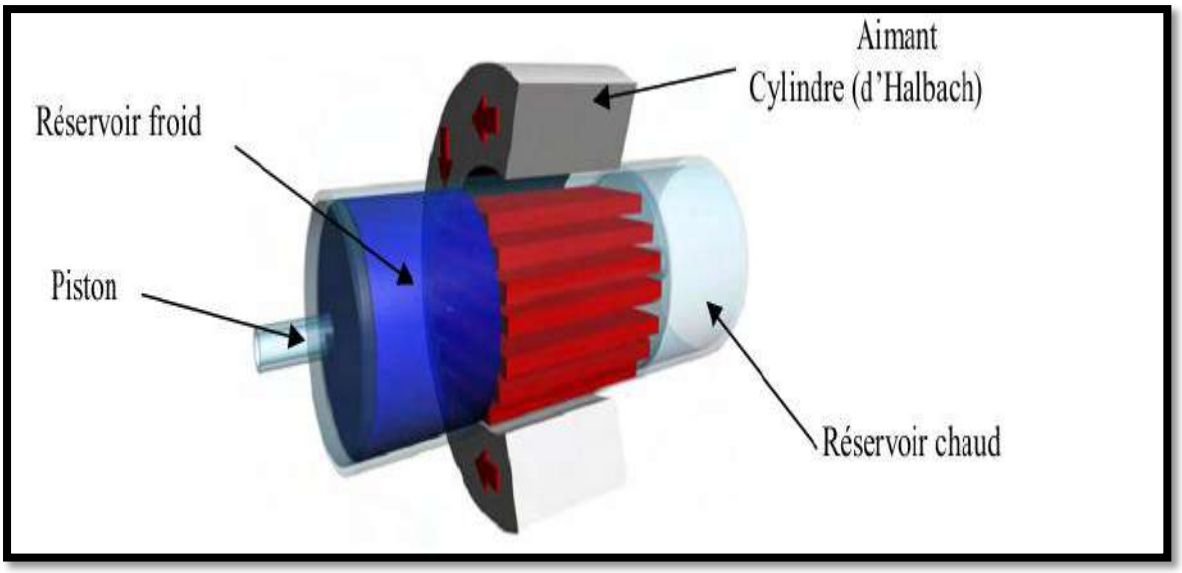



**Figure 1.4 :** Aimentation du matériau à partir à partir d'un état initial où tout le système est température $T_a$ . [Bouchekara 2008]

### 4.1.1Critères d'efficacité de l'AMRR

Le rendement et l'efficacité d'un système opérant avec un cycle AMRR dépendent du matériau, du fluide ,de la source de champ et du cycle magnétothermique[Lebouc2005].

Un système performant doit présenter quelques caractéristiques telles que [Lebouc2005][Yu2005]:

- ✓ Une forte variation d'entropie magnétique du matériau afin de disposer forte puissance frigorifique.
- ✓ Un fort effet magnétocalorique(EMC).
- ✓ Une température de Curie proche de la source froide.
- ✓ Une forte capacité thermique massique pour réduire les oscillations température lors des alternances des débits du fluide.
- ✓ Une conductivité thermique élevée dans les sens des échanges avec le fluide et faible dans les autres directions afin de limiter les pertes par diffusion.
- ✓ Un volume mort nul (faible porosité).

- ✓ Une faible rugosité du matériau et une faible viscosité du fluide pour réduire les pertes de charge de l'écoulement.
- ✓ Un fort coefficient d'échange thermique afin d'avoir le maximum d'échange possible entre le matériau magnétique et le fluide.

# Chapitre 2 : l'effet magnétocalorique et matériaux

## *2.1 introduction*

L'effet magnétocalorique (EMC) se traduit par l'échauffement instantané d'un matériau lors de son aimantation et son refroidissement lors de sa désaimantation. Cet effet, découvert il y a plus d'un siècle, est à l'origine d'une technologie prometteuse encore peu connue pour la production de froid, la réfrigération magnétique (RM). Dans un premier temps, l'utilisation de l'EMC s'était orientée vers le domaine de la cryogénie, cette technique permettant d'atteindre des températures inférieures à 4k .

Plus récemment, cet effet a été exploité pour la production de froid autour de la température ambiante.

De manière similaire aux cycles à compression-détente classiques, la réfrigération magnétique est basée sur des cycles magnétiques, lesquels permettent de tirer partie de l'effet magnétocalorique.

Dans un premier temps, nous définirons cet effet et son exploitation à travers l'histoire. La suite traitera des matériaux à EMC géant et de leur caractérisation. Une approche thermodynamique de la mise en œuvre du phénomène physique permettra dans un troisième temps de comprendre le principe de fonctionnement des réfrigérateurs magnétiques. [Ulrich LEGAIT 2007].

## *2.2 l'effet magnétocalorique*

### *2.1.1Historique*

L'étude de la réfrigération magnétique a débuté avec la découverte de l'effet magnétocalorique(EMC) Ilya de cela 120ans[Yu2003]. Otto Warburg en 1881[Ulrich2007]observa le premier EMC en étudiant la variation de la température dans le fer lors de l'application d'un champ magnétique.

Edison et Tesla, respectivement. en1887 et 1890[Ulrich2007],ont présenté chacun un générateur électrique basé sur l'effet thermomagnétique utilisant des matériaux dont l'aimantation dépend fortement de la température.

La première démonstration expérimentale importante de la réfrigération magnétique a été réalisée par W.F.Giauquequien1933,a pu descendre sous la température de 1K.

P.Langevin,P.Weiss et d'autres ont aussi auparavant étudié l'EMC durant leursrecherches. En 1954 Heer, Barnes et Daunt ont construit un réfrigérateur magnétique qui fonctionne en continue qui

produit 7HW à 0.26K[Yu2003].

En 1966 Van Geuns a proposé un cycle magnétique régénératif analogue au cycle d'Ericsson qui opère entre 4 K et 15 K, les performances théoriques de ce cycle sont supérieures de 60% à 70% cycle de Carnot [Yu2003].

En 1976 Barclay et al. ont construit un réfrigérateur magnétique tournant à régénération, celui ; ci opère entre 4K et 15 K et produit 0.9W [Yu2003].

Dans la même année Brown fut le premier à appliquer la réfrigération magnétiqueautour de la température ambiante au ''Lewis Research Centre of American National Aeronautics and Space Administration'' [Yu2003].En utilisant le gadolinium (Gd) comme matériau de fonctionnement, il a atteint 47 K avec un champ magnétique de7T. En1989, le laboratoire de ''Los Almos DOE'' dépose le brevet de la réfrigération magnétique active [Shanov2004]. Mais ce n'est réellement qu'au cours de cette dernière décennie que l'intérêt pour les applications de la réfrigération magnétique autour de la température ambiante s'est développé.

Des études théoriques et expérimentales menées principalement aux USA par Gschneidner , Zimm et Pecharsky ont démontré la validité et l'efficacité du procédé dans la fabrication du froid et , en1996. ,Zimm et son groupe de recherche ont développé un réfrigérateur basé sur la réfrigération magnétique active produisant entre 500 et 600W depuis séance froide sous un champ de 5T [Zimm98].

L'EMC est une propriété intrinsèque des matériaux magnétiques qui consiste à absorber ou à émettre de la chaleur sous l'action d'un champ magnétique. Cela se traduit par le réchauffement ou le refroidissement (tous deux réversibles) du matériau comme le montre la figure (2.1). Sous l'action d'un 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, alors 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. Cet effet est maximal autour de la température de transition de phase magnétique du matériau (température de Curie pour une transition ferromagnétique à paramagnétique). 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.

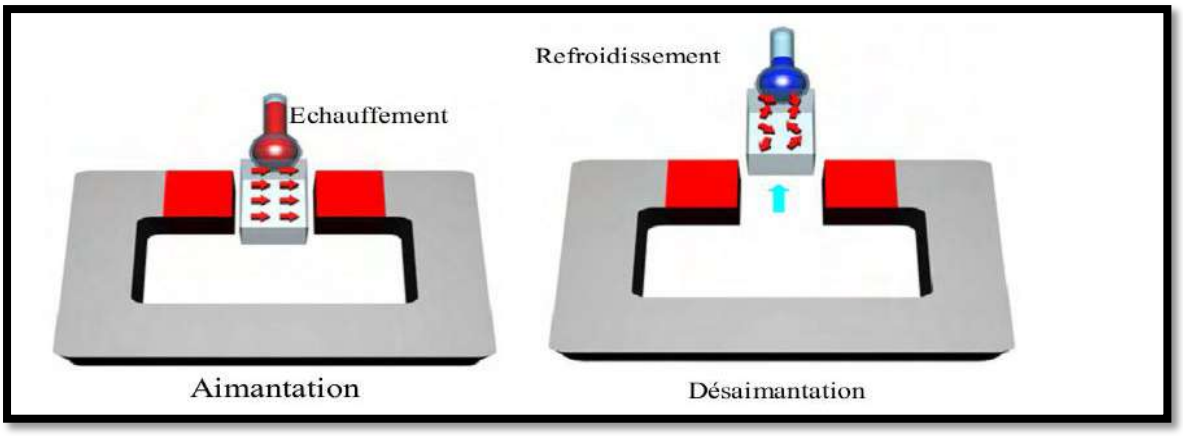



**Figure 2.1 :** schématisation de l'effet magnétocalorique, les flèche dans le matériau symbolisent l'orientation des moment magnétique. [Bouchekara 2008].

### *2.1.2 : Approche thermodynamique :*

$$C_p = \left(\frac{\partial S}{\partial T}\right)_B T \qquad \text{(II.3)}$$

Cela donne :

$$\left(\frac{\partial S}{\partial T}\right)_B = \frac{C_p}{T} \qquad \text{(II.4)}$$

De (2) et (4) on peut écrire :

$$dS(T,B) = \frac{C_p}{T} dT + \left(\frac{\partial S}{\partial B}\right)_T dB \qquad \text{(II.5)}$$

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

$$dT = -\frac{T}{C_p}\left(\frac{\partial S}{\partial B}\right)_T dB \qquad \text{(II.6)}$$

En utilisant la relation de Maxwell donnée par :

$$\left(\frac{\partial S}{\partial B}\right)_T = \left(\frac{\partial M}{\partial T}\right)_B \qquad \text{(II.7)}$$

Où : M est l'aimantation.

## *2.3 les matériau à effet magnétocalorique (MCM)*

### *2.3.1 Présentation*

Pour les applications de la réfrigération magnétique autour de la température ambiante, le matériau doit présenter un EMC géant autour de cette température [Lebouc 2005], 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) [Lebouc 2005]. 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 [YU 2003],[Tura2002]:

- ✓ 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.

Une liste de quelques matériaux à EMC géant autour de la température ambiante Susceptibles d'être utilisés est exposée dans le tableau 2.1.

**Tableau 2.1 :** caractérisation de quelque matériaux à EMC géant autour la température ambiante . [allab 2008 ].

| Matériau magnétocalorique | $T_c$ (k) | ΔH(T) | $\Delta S_m$(J $Kg^{-1}K^{-1}$) | EMC (K) |
|---|---|---|---|---|
| Gd | 294 | 2 | 4.3 | 4.8 |
| | | 0.8 | | 1.5 |
| | | 0.5 | | 0.9 |
| $Gd_{0.83}Dy_{0.13}$ | 278 | 2 | 4 | |
| $MnAs_{1-x}Sb_x$ | | | | |
| X=0 | 318 | 2 | 31 | 4.8 |
| X=0.1 | 283 | 2 | 24 | 5.7 |
| X=0.25 | 230 | 2 | 18 | - |
| $MnFeP_{1-x}As_x$ | | | | |
| X=0.55 | 300 | 2 | 14.5 | 6 |
| *X=0.50* | 282 | 2 | 16.5 | - |
| $Ni_{52.6}Mn_{23.1}Ga_{24.3}$ | 300 | 5 | 18 | - |
| $Gd_5(Ge_{0.5}Si_{0.5})_4$ | 276 | 2 | 14 | 7.4 |
| $Fe_{49}Rh_{51}$ | 313 | 2 | 12 | 8.4 |
| $Fe_{49}Rh_{51}$ | 316 | 2 | 22 | 12.9 |
| $Fe_{1.75}Rh_{0.25}$ | 310 | 2 | 1.4 | 1 |
| $La(Fe_{0.89}Si_{0.11})_{13}H_{1.3}$ | 291 | 2 | 24 | 6.9 |

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.

### *2.3.2 Caractérisation des matériaux magnétocalorique*

#### *2.3.2.1 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 [Weiss,1926].

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 [Kurt, 1985] utilisées essentiellement pour les champs intenses (30 T) et les techniques statiques [Tishin, 1988]. 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 ont été introduits pour compenser l'effet de la variation du champ magnétique sur la réponse des capteurs de température.

#### *2.3.2.2 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 cp(T, B) (figure2.2).

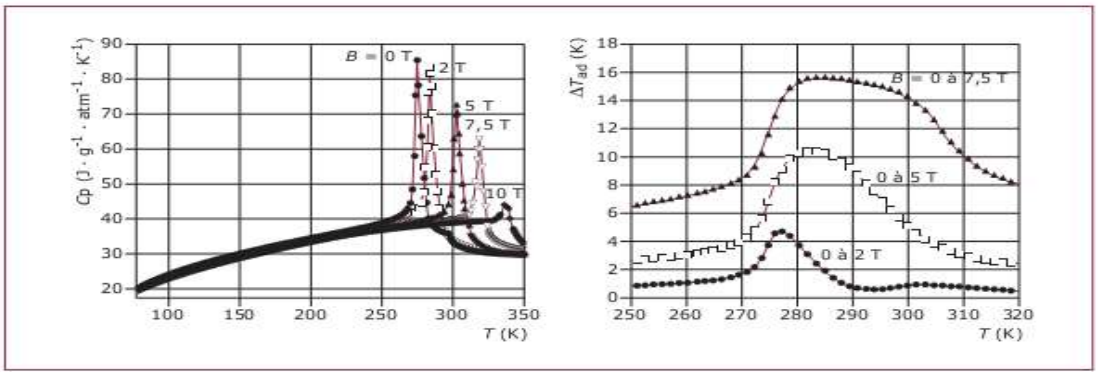



**Figure 2.2** : Capacité thermique massique musérée et l'EMC (ΔTad) déduit par l'alliage de gadolinium Gd2Si2Ge2.[ Pecharsky 1997].

appelées encore mesures calorimétriques, nous Permettent de déduire l'entropie magnétique Sm(T, B) et sa variation ΔSm(T, Δ B) ainsi que l'EMC Exprimé en variation adiabatique de température ΔTad. 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.

#### *2.3.2.3 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.

### *2.3.3 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 [Gschneidner Jr.et al., 2005]. 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 [Tishin et Spichkin,2003] :

– 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( Figure2.3). A l'inverse, les matériaux du second ordre ont des variations d'entropie plus faibles mais sur une large plage de température.

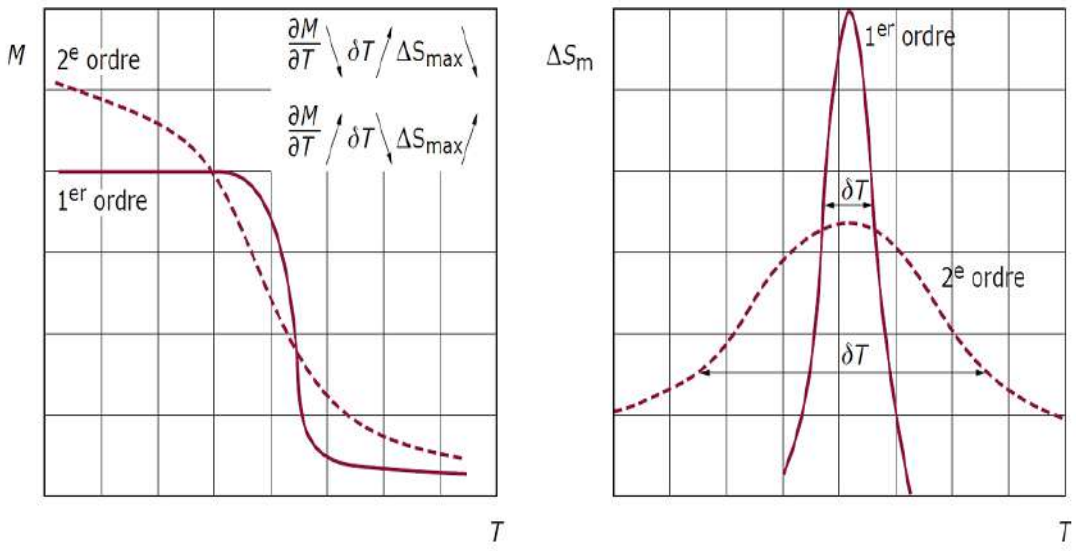



**Figure 2.3** : Transition de phase et variation de l'entropie en fonction de type de matériau. [ Lebouc et al ., 2005 ].

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 magnétocalorique [Pecharsky et Gschneidner Jr.,1997]. Pour être intéressant un matériau magnétocalorique doit posséder plusieurs caractéristiques. Tout d'abord le matériau doit présenter des propriétés magnétocaloriques intéressantes : – une température de Curie TC proche de la température ambiante .

– une grande variation d'entropie massique Δs et de température ΔTad 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 minerai) .

– 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 [Julien roudaut]. Des valeurs recensées par Bruck sont données sur le tableau ( 2.2) :

**Tableau 2.2 :** Propriétés de certains matériaux magnétocaloriques. [Bruck , 2005].

| Matériel | T range K | $\Delta S_{max}(2T)$ $JKg^{-1}K^{-1}$ | $\Delta T(2T)$ K | $T_c$K | Costs €/Kg | Density $10^3 kgm^{-3}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Gd | 270-310 | 5 | 5.8[d] | 393 | 20 | 7.9 |
| $Gd_5Ge_2Si_2$ | 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 |

# Chapitre 3 : les différent moyens de création de champ magnétique

## *3.1 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.

## 3.2 Quelques notions de base sur le magnétisme

Si un champ magnétique d'excitation *H* est appliqué à un matériau magnétique , alors une aimantation *M* va être induite dans celui-ci.L'induction B générée dans le matériau est la résultat des effets du champ et de l'aimantation :

$$B = \mu_0 (H + M) \qquad (3.1)$$

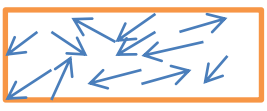
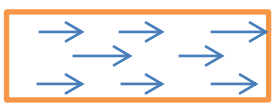
Avec $\mu_0$ la perméabilité magnétique du vide : $\mu_0 = 4\pi.10^{-7}$ H .m$^{-1}$.

## *3.3. Matériaux magnétiques*

### *3.3.1.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 3.1.

**Tableau3.1**: Classification des matériaux magnétique. [bouchekara,2008 ].

| Matériau | Diamagnétique | Paramagnétique | Ferromagnétique |
|---|---|---|---|
| **Perméabilité relative** $\mu_r$ | $\mu_r<1$ | $\mu_r \approx 1$ | $\mu_r >> 1$ |
| **Susceptibilité** $\chi$ | $-10^{-5}$ | $10^{-3}$ | $10^{6}$ |
| **Exemple de matériau** | Eau , cuivre , argent , …… | Aire , platine , aluminium , …… | Fer , platine , nickel , …… |
| **Structure 'un magnétique sous l'effet d'un champ magnétique** | Moment magnétique très faible | Moment désordonnés  | Moment alignés  |

Dans les matériaux ferromagnétiques on peut distinguer deux types:

– 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.

## *3.4 Les différents systèmes de création du champ magnétique*

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

### *3.4.1 Les électroaimant*

L'électro-aimant sont généralement utilises pour l'application nécessitant des inductions inferieurs a 0.3T. Au-delà, les puissances électriques mises en jeu deviennent très importantes ainsi que les quantités de chaleur à évacuer .pour ces raisons cette solution est exclue dans la réfrigération magnétique.

### *3.4.2 Les aimants supraconducteurs*

Les aimants supraconducteurs sont formés d'un système de bobines supraconductrices permettent de créer 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.

### *3.4.3 Les aimants permanents*

Les aimants sont des matériaux magnétiques durs souvent utilises pour leur capacité à créer eux-mêmes un champ magnétique sans consommation d'énergie électrique ni perte d'intensité, sous certaines condition d'utilisation appropriées. La valeur de l'induction dépend de la polarisation rémanente des aimants utilisés ainsi que du circuit magnétique dans lequel ils sont placés. Il existe une très grande variété d'aimants, le tableau (3.2) représente les nuances d'aimant les plus usuelles. Ils se différencient essentiellement par la valeur de leur aimantation rémanente $B_r$ et par leur champ coercitif $H_c$ .

**Tableau3.2:** proprieties magnétique des aimants, [Farid Alabb 2008].

| Type d'aimant | $B_r$(T) | $H_c$(KA/m) | $T_c$(k) | Remarque |
|---|---|---|---|---|
| Ferrites durs<br>**-Ferrites isotropes**<br>**-Ferrites anisotropes**<br>**Haute rémanence I**<br>**Haute coercitivité II** | <br>0.22<br><br>0.42<br>0.38 | <br>135<br><br>260<br>285 | <br>450<br><br><br> | -trés bon marché .<br>-Fragile<br>-Bonne résistance à la corrosion et à l'oxydation |
| Samarium cobalt<br>**-Ferrites $S_mC_{o3}$**<br>**-Ferrites $S_{m2}C_{o17}$**<br>**-Aimants liés** | <br>0.95<br>1.1<br>0.65 | <br>700<br>500<br>400 | <br>720<br><br> | -Chers à cause du cobalt et du samarium .<br>-Puissant et stables .<br>-Trés fort coericitivité<br>-Moyenne résistance à l'oxydation<br>-Temperature d'utilisation elevée |
| Alnico (Al,Ni,Co,Cu,Fe)<br>**-Isotrope type**<br>**-Anistrope orienté type I**<br>**-Anistrope orienté type II** | <br>0.7<br>1.2<br>0.8 | <br>50<br>55<br>130 | <br>750<br><br> | -Relativement chers , de moins au moins compititifs .<br>-Trés bonne stabilité en temperature<br>-Faible coercitivité et risque de désaimentation par son propre champ démagnétisant .<br>-Bonne réstistance à la corrosion et moyenne résistance à l'oxydation .<br>-Température d'utilisation élevé . |
| Néodyme - Fer – bore<br>**-Isotrope lié**<br>**-Anisotrope lié**<br>**-Feritté haute rémanence**<br>**-Feritté haute coercitivité** | <br>0.41 à 0.57<br>0.83 à 0.86<br>1.210 à 1.30<br>0.96 à 1.02 | <br>290 à 342<br>540 à 600<br>900 à 920<br>750 | <br><br><br>310 | -Relativement chers , de plus en plus compétitifs (fin de brevets ).<br>-Trés sensibles à la temperature<br>-Trés forte coercitivité .<br>-Mauvaise résistance à la corrosion et l'oxydation .<br>-Température d'utilisation faible. |

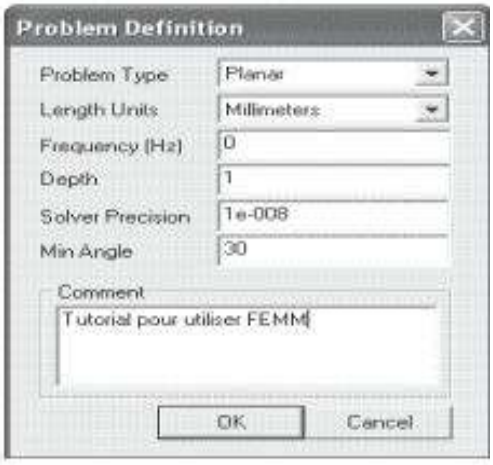
### *3.5 Simulation du circuit magnétique*

On a pu concevoir un dispositif à aimant permanent grâce au logiciel *FEMM 4.2* permet de résoudre des problèmes de magnétostatique *et d'électromagnétisme ,Pour illustrer l'utilisation du logiciel* comme les étapes suivantes :

- Lancer le programme FEMM via l'icône :



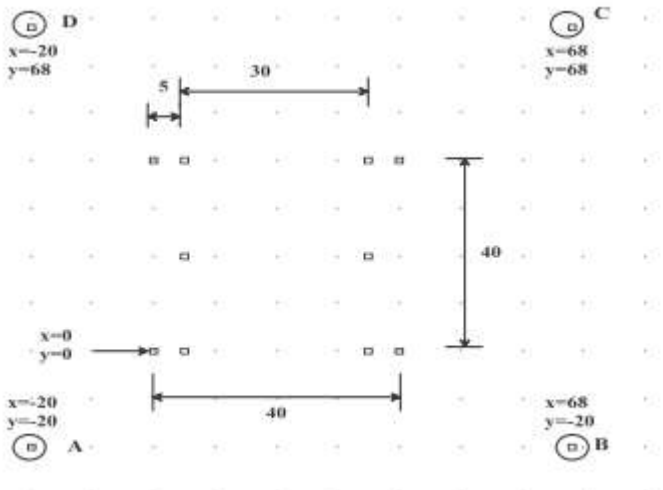
- Choix de l'unité : sélectionner Problème puis millimètre.




- Choix d'une taille de grille : Pour définir une taille de grille sélectionner Grid puis Set Grid .

- Réalisation du schéma de simulation : Afin de placer un nœud aux coordonnées X et Y sélectionner l'icône Nœuds, On peut utiliser le bouton gauche de la souris, ou bien en utilisant la touche Tab . Pour supprimer un nœud sélectionner celui-ci avec le bouton droit de la souris, puis actionner Supp ou Del (selon le clavier).

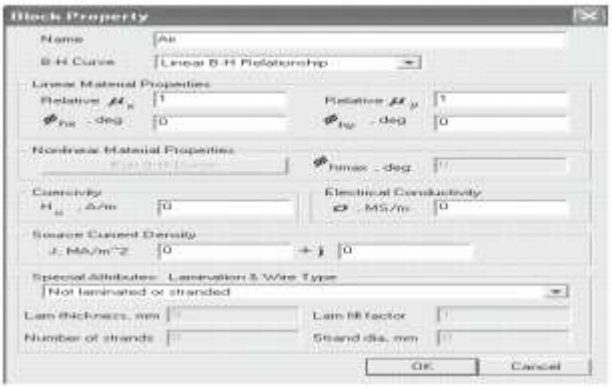
Pour relier les déférents nœuds, sélectionner l'icône Segments puis avec la souris activer le nœud de départ et celui d'arrivée, un segment apparait alors. Le schéma doit ressembler .



- Définition des matériaux et milieux : sélectionner le menu Properties puis Materials Library, repérer dans l'arborescence de gauche le milieu nommé Air par exemple, puis faite un glisser déposer dans L'arborescence de droite .



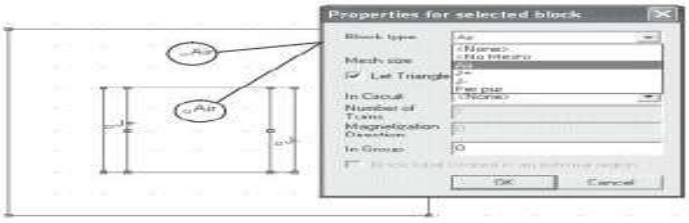

effectuer un double click sur l'icône du milieu afin d'éditer ses paramètres magnétiques.



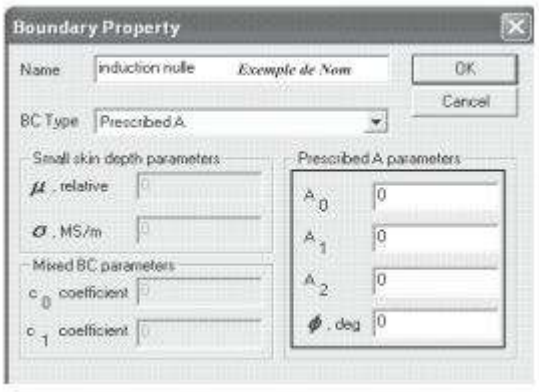

répéter l'opération avec tous les matériau .

- Choix des déférentes régions : Apres avoir dessine dans un repère 2D la structure magnétique, il reste a caractérisé les déférentes régions.

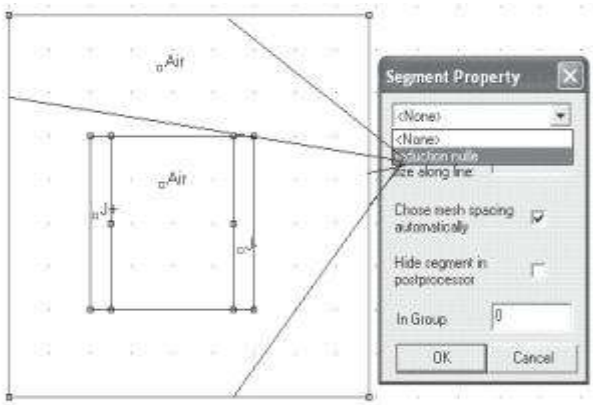
sélectionner l'icône Matériaux et placer un nœud, avec le bouton gauche de la souris `a l'intérieur d'une région afin de caractériser son milieu ,sélectionner le nœud avec le bouton droit de la souris puis actionner la touche d'Espace, choisir le nom du matériau dans le menu déroulant.



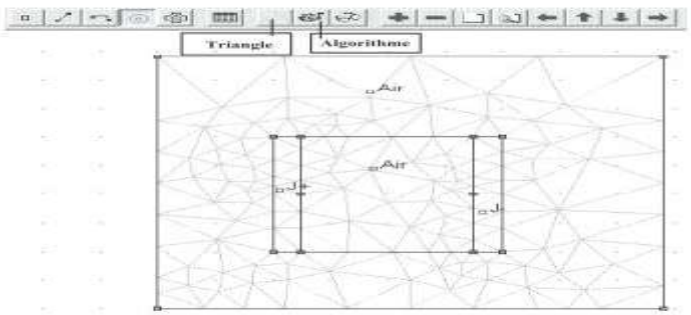
- Conditions aux limites : Une étape importante pour le calcul, consiste à définir pour le contour A,B,C,D une condition aux limites par exemple un champs nul. sélectionner le menu Propréties puis Boundary et Add Properties.




Dans le schéma de simulation activer l'icône Segments puis avec le bouton droit de la souris sélectionner les segments AB,BC,CD et DA. Activer la touche espace et sélectionner la condition aux limites pré définie .



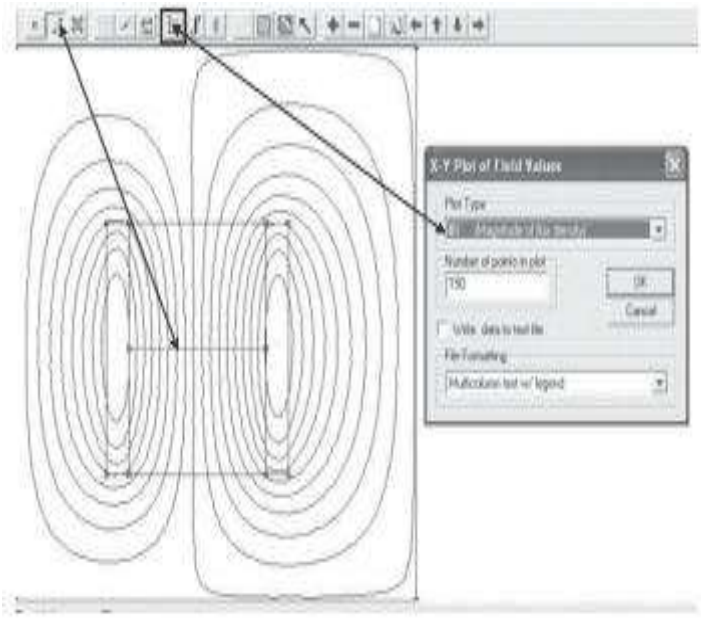

- générateur de triangle : Actionner l'icône Générateur de triangle; Le programme résout les équations magnétiques en un certain nombre de point(´éléments finis ). Or plus le nombre de triangle est important plus les résultats sont précis, mais le temps de calcul est alors plus élevé.



-Visualisation des lignes de champs : Pour visualiser les lignes de champs activer l'icône Algorithme puis l'icône Visualisation.

- Définir la taille des triangles Pour augmenter la précision du tracer on peut choisir la taille des triangles des déférentes régions. s´sélectionner l'icône Matériaux, puis choisir le nœud de la région avec le bouton droit de la souris et enfin activer la touche d'Espace.

- Tracé de l'induction magnétique : Le programme de visualisation autorise de nombreux traitements mathématique, comme par exemple la répartition de l'induction le long d'un segment.



Pour améliorer l'induction des aimants permanant Gd ont été choisis plusieurs géométrie du circuit magnétique ont été étudiées.

### 3.5.1 circuit magnétique simple :

La géométrie du système étudiée présenté en 2D, On a introduit une géométrie en forme de C en prenant comme modèle celui utilisé dans la littérature [Julien ROUDAUT]. Comme le montre la figure(3..1) ci-dessous.

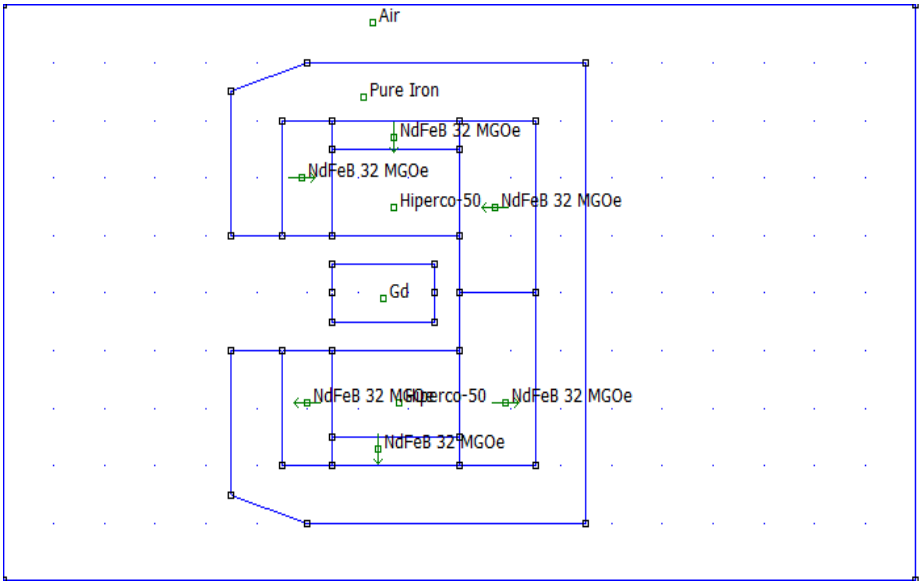



Figure 3.1: *Structure de base en forme de C.*

### 3.4.2 circuit magnétique de Halbach :

La structure ci-dessous est celle d'un cylindre d'Halbach (Figure 3.2). Elle est constituée d'un certain nombre de pavés, judicieusement aimantés de manière à avoir un champ magnétique uniforme à l'intérieur du cylindre, Cette structure peut être utilisée dans un système de réfrigération magnétique à régénération. [ Bouchekara 2008].

Halbach démontre que le champ magnétique sera maximum dans la zone centrale si la direction de magnétisation est perpendiculaire à la longueur de l'aimant et si elle varie graduellement de 0 à 360 degrés .

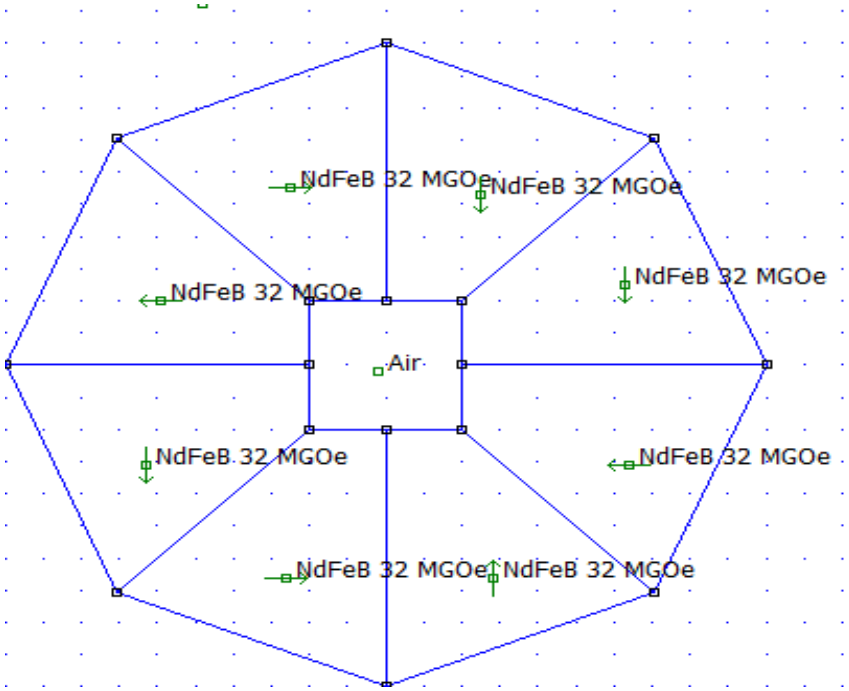



**Figure 3.2:** Section transversal d'un aimant permanent construit selon le Principe de Halbach .

la structure classique du cylinder de Halbach pour concevoir leur source de champ [Lee et al., 2002]. 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 . Ensuite, ils désiraient concevoir un système de refrigeration 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.

# Chapitre 4 : résultat et discussion

Dans ce chapitre, on présente les résultats des études numériques et expérimentales ayant porté d'une part sur l'analyse thermique du réfrigérateur magnétique active (AMR) opérant autour de la température ambiante. les grandeurs thermomagnétiques obtenues à l'aide de la théorie du champ moléculaire et comparées avec les mesures expérimentales sont présentées à savoir, les courbes d'évolutions de l'effet magnéto calorique, d'aimantation, et de la chaleur spécifique ont été étudiées en fonction de la température et du champ magnétique appliqué. Puis la validation du modèle numérique proposé a été présenté.

## 4.1 Propriétés magnétiques des matériaux magnéto caloriques

La théorie du champ moléculaire présente une grande importance pour connaître l'influence des différents paramètres intervenant dans un système de réfrigération magnétique. dans ce chapitre Nous présentons les résultats du modèle de Weiss-Debye-Sommerfeld appliqué au gadolinium. Le tableau 4.1 donne les différents paramètres utilisés dans le modèle pour calculer les propriétés magnétocaloriques.

*Tableau 4.1 :* la différente propriété du gadolinium

| $T_C$(K) | $T_D$(K) | $g_j$[-] | $J_1$[-] | MM(kg/mol) | $K_B$(j/k) | $T_0$(K) | $T_F$(k) | B(T) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 293 | 184 | 2 | 3.5 | 0.157 | $1.38.10^{-23}$ | 10 | 100 | 1.5 |

Dans la partie 1 en utilisant logiciel FEMM , Ce logiciel permet d'avoir pour une géométrie bien définie les valeurs de champ magnétique appliqué et de l'induction générée sur un matériau donné. Pour tracer la courbe de force (F) et le travail magnétique (w) en fonction de la température. Et dans La partie 2 on a utilisé le Fortran pour obtenir les courbe d'évolutions de l'effet magnétocalorique, la chaleur spécifique, l'entropie total , en fonction de la température avec (B=2T).

**partie 1 :**

La figure 4.1 une simulation numérique appliqué au Gd . Il comporte d'un seul blocs d'aimants pour la création du champ, une culasse en matériau doux pour la canalisation du flux.

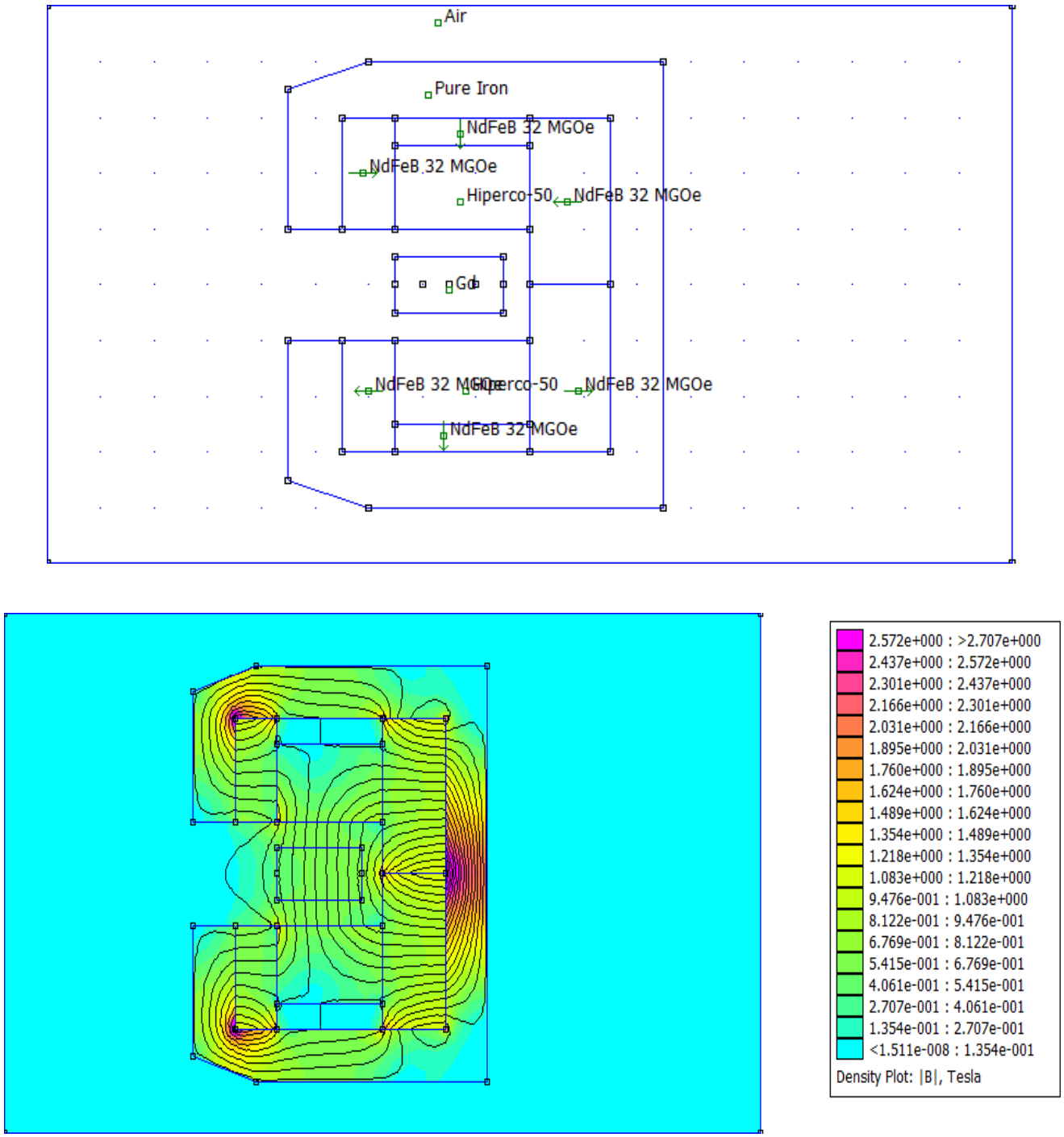



**Figure 4.1 :** simulation numérique de la direction des lignes de champs magnétique dans le circuit .

La figure (4.2) représente l'induction (B) du matériau en fonction du déplacement. Ces courbe schématisent les phases d'aimantation et de désaimantation réalisées par cette structure.

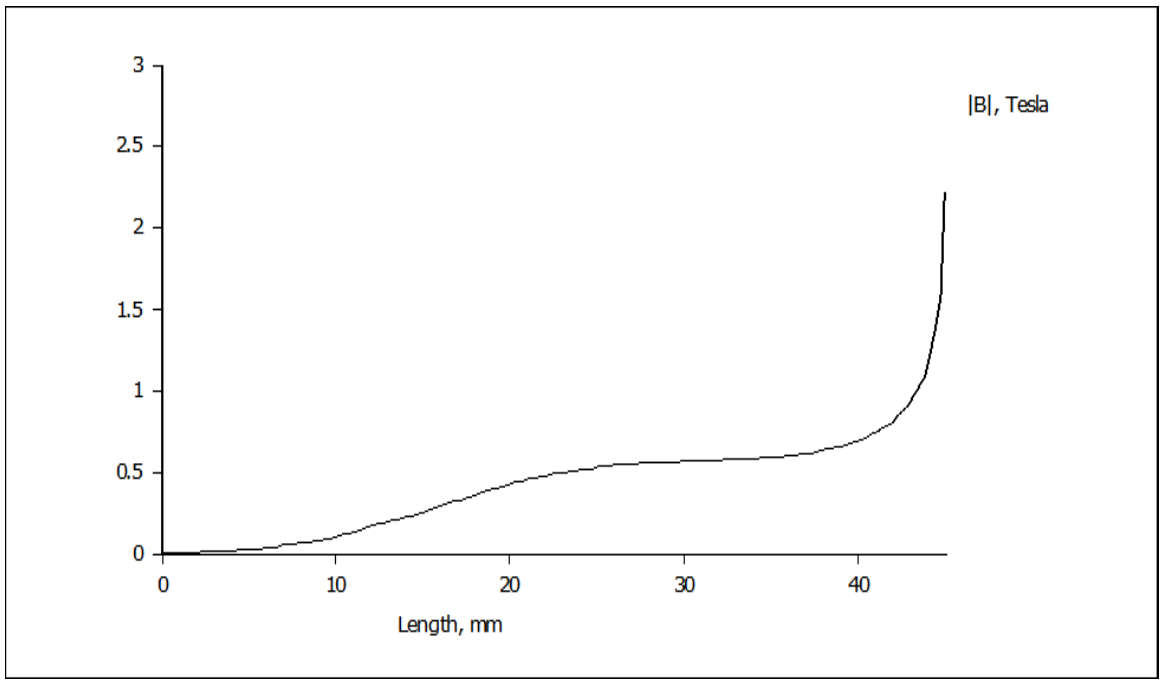



**Figure 4.2.a :** l'induction magnétique B le long de la barre de Gd.(entré de magnéto).

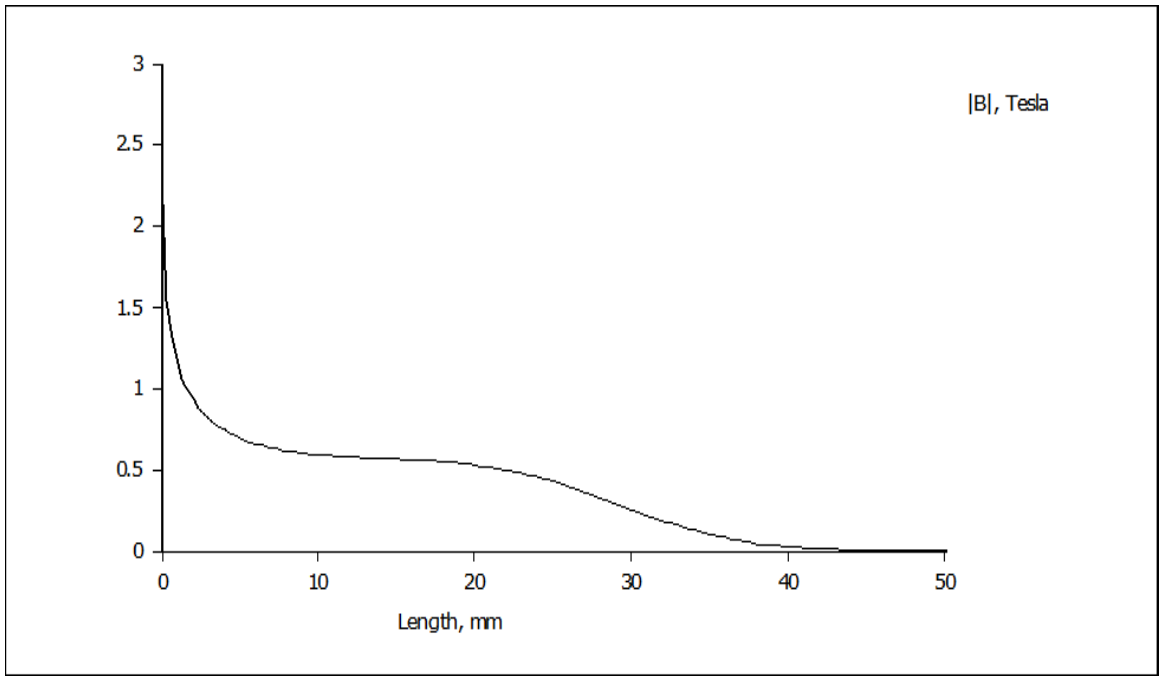



**Figure 4.2.b :** l'induction magnétique B le long de la barre de Gd.(sorti de magnéto).

la figure 4.3 représente une simulation d'une culasse au Gd., Il comporte deux blocs d'aimants pour la création du champ, une culasse en matériau doux pour la canalisation du flux.

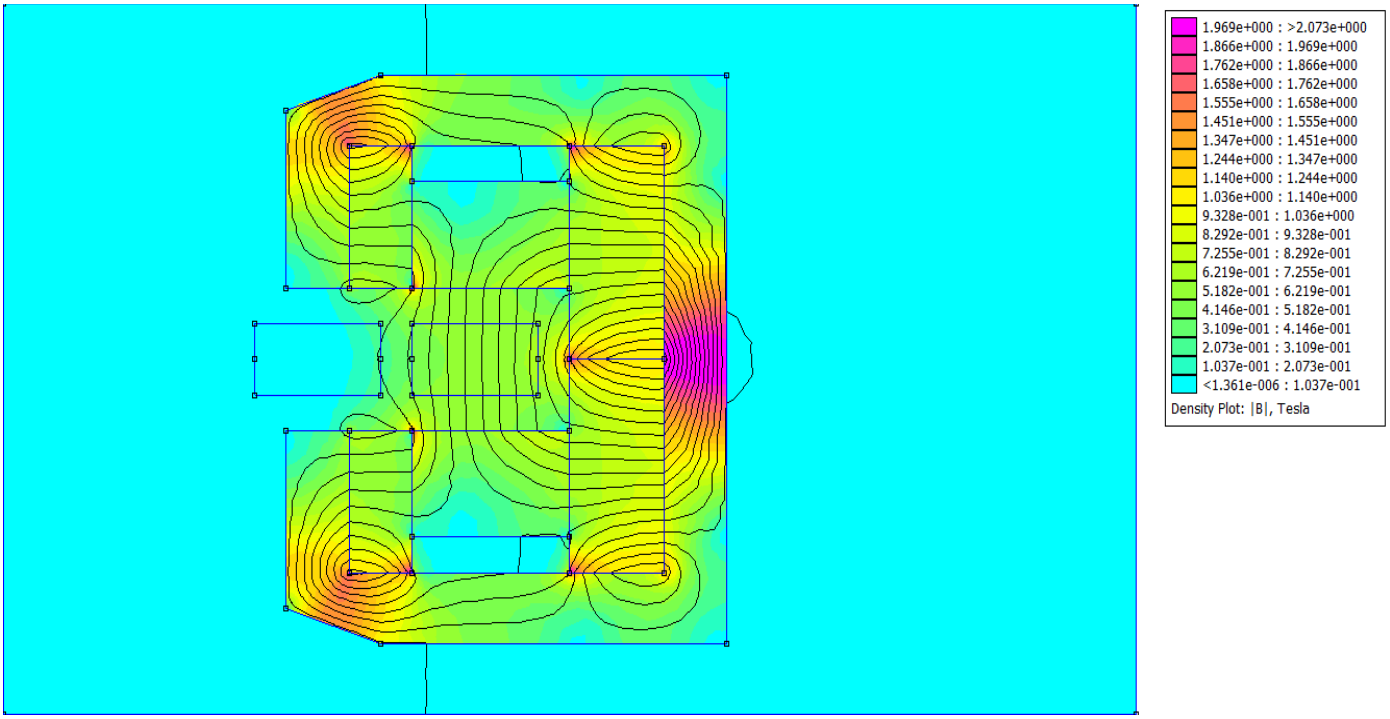



**Figure 4.3 :** simulation numérique de deux blocs de Gd .

Les figures 4.4(a) et 4.4(b) représentent l'induction magnétique de deux blocs , les courbe sont opposées à l'entré et la sortie du matériau magnétocalorique , on remarque une augmentation d'induction à l'entré dans l'entrefer et une diminution sur le sens inverse .

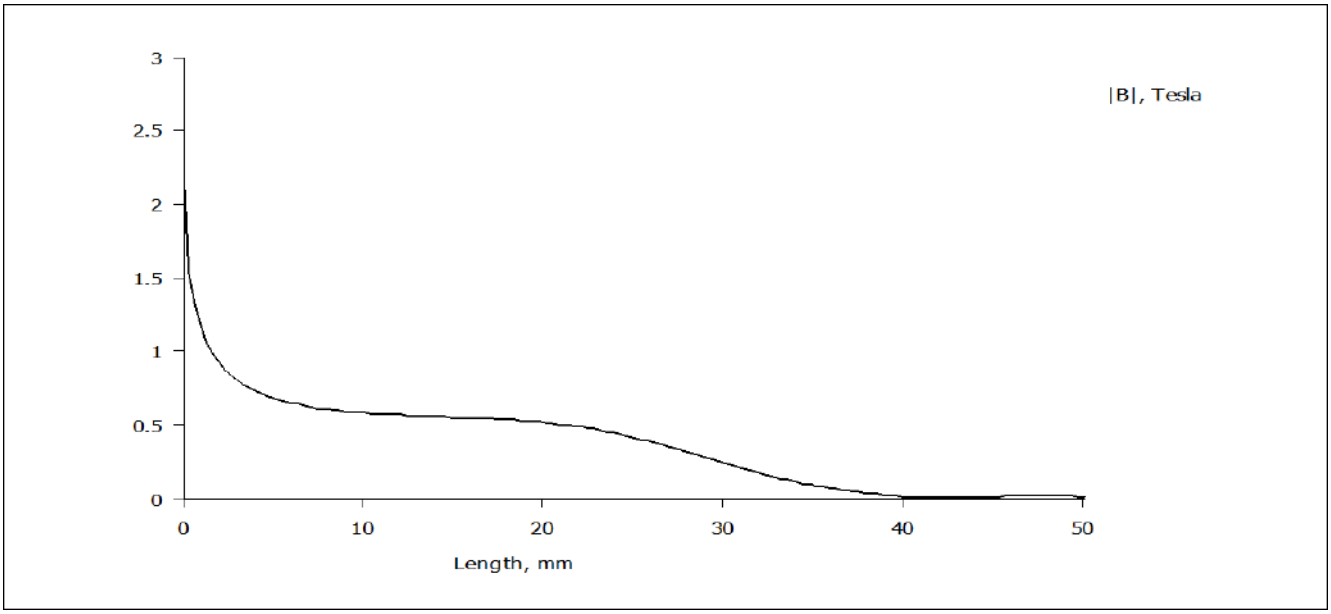



**Figure 4.4 .a :** l'induction magnétique B le long de deux bloc de Gd.( sorti de magnéto ).

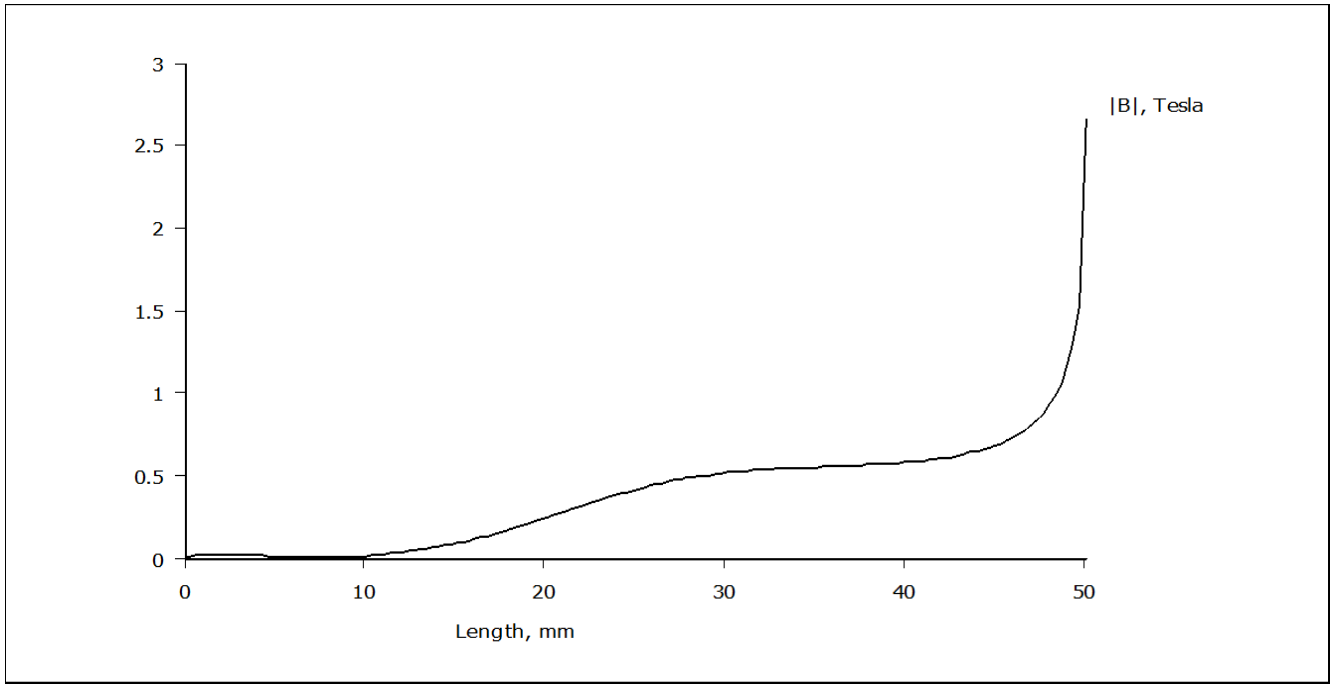



**Figure 4.4.b :** l'induction magnétique B le long de deux bloc de Gd.( entré de magnéto ).

Les figures 4.5 et 4.6 représentent les forces exercées sur le bloc de matériau en fonction du déplacement. ces forces sont très grandes et peuvent causer des problèmes mécaniques pour la réalisation pratique.

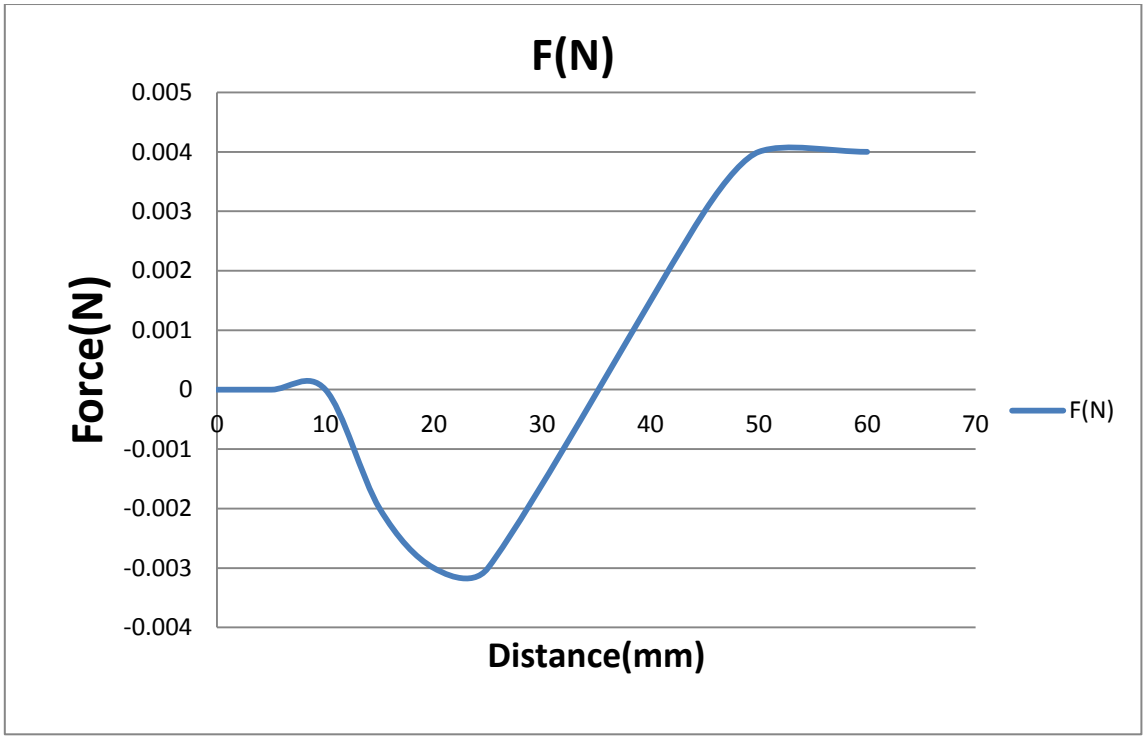



**Figure 4.5** : Force statique en fonction de déplacement de Gd.

Le maximum de la force est obtenue lorsque le matériau se trouve à mi-parcours dans l'entrefer ,ces figures montrent clairement une dissymétrie des courbes correspondant aux phases aimantation et désaimantations qui s'explique naturellement par la variation de la perméabilité du matériau engendré par l'EMC.

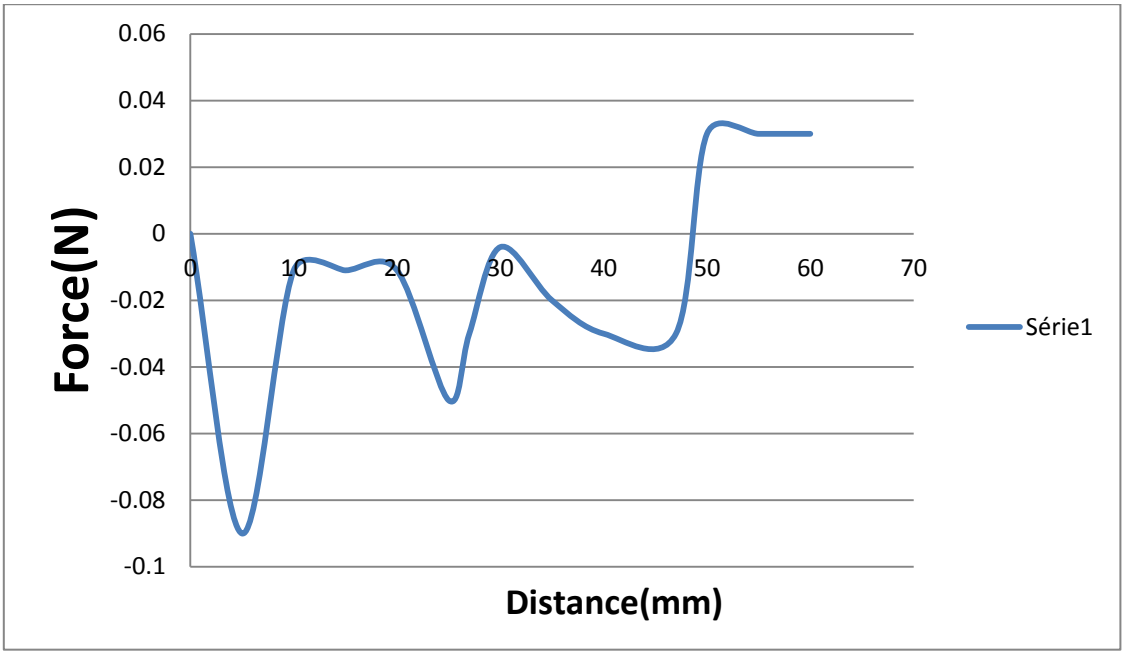



**Figure 4.6:** force statique en fonction de déplacement de deux blocs de Gd .

Les figures 4.7 et 4.8 représente le travail (w) en fonction du déplacement fourni par le système qui donne par la relation suivante : $W = \int F dX$ .

Le travail assez important pour la modalisation complète d'un système de réfrigération mmagnétique.

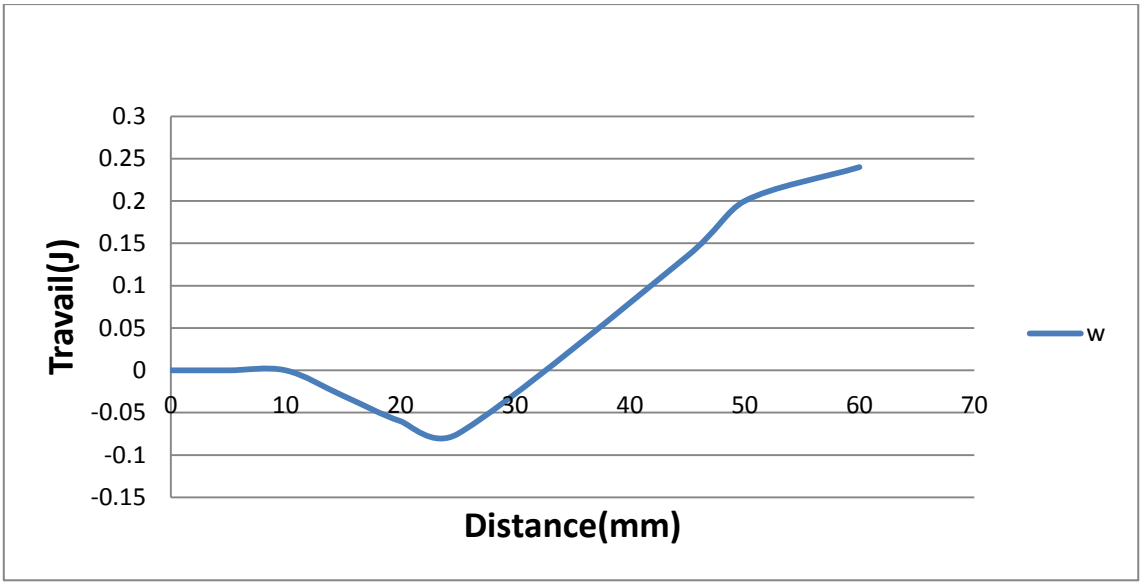



**Figure 4.7 :** la variation du travail en fonction de la distance de un seul bloc **.**

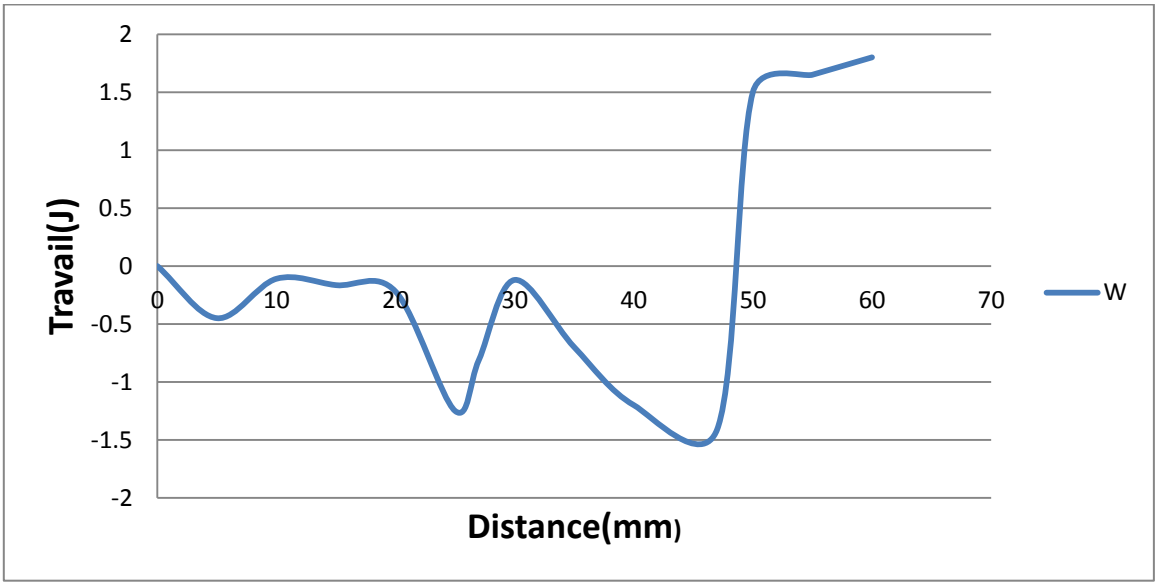



**Figure 4.8** : la variation du travail en fonction de la distance de deux blocs **.**

**Partie 2 :**

La figure (4.8) montre l'évolution de la chaleur spécifique prédite à l'aide de la théorie du champ

Moléculaire (MFT) pour le matériau magnéto calorique Gd en fonction de la température, obtenue

à différents champs magnétiques .

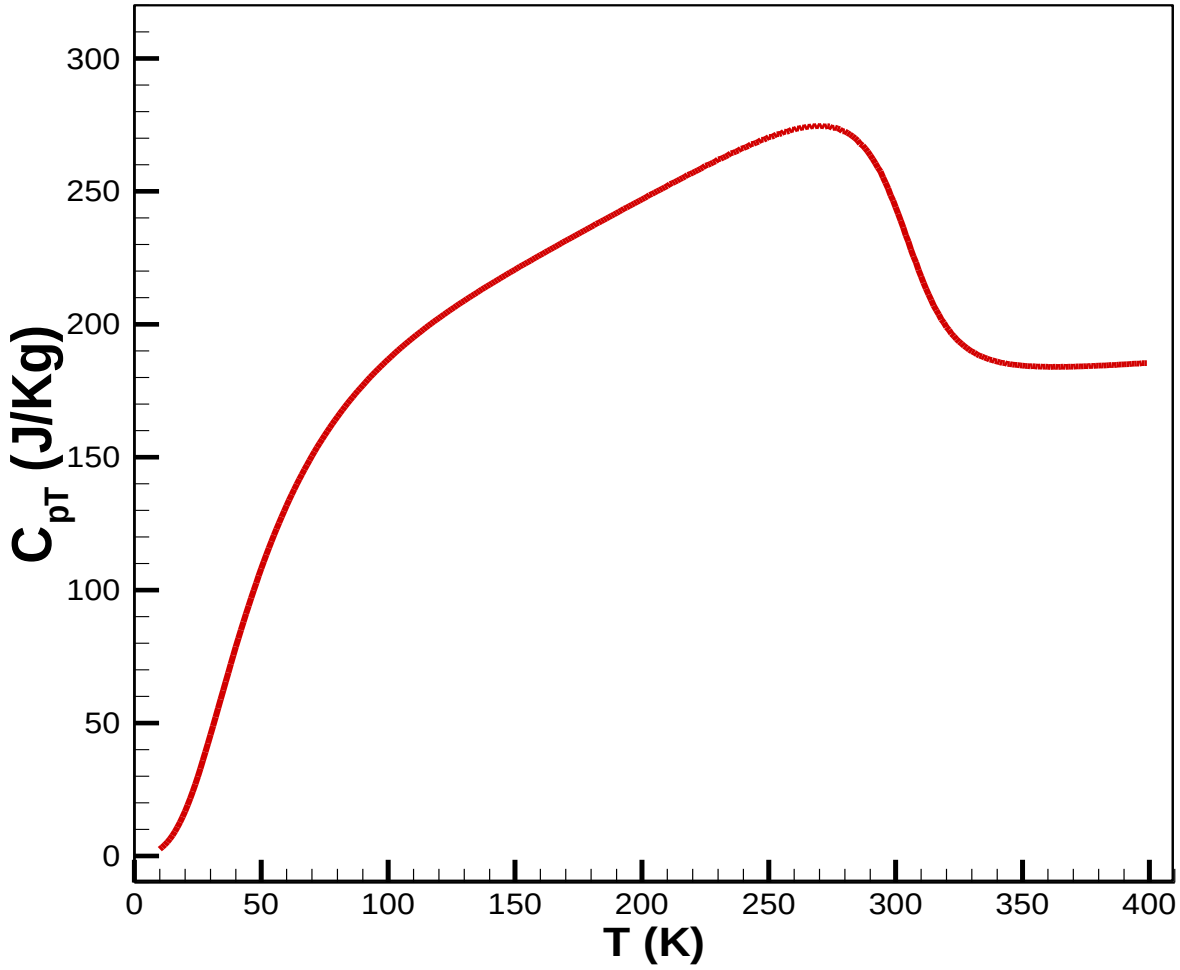



**Figure4.9**: capacité calorifique du gadolinium

Aussi, ce graphes illustre clairement la transition de phase de l'état ferromagnétique vers l'état paramagnétique au voisinage du point de Curie TC= 294K, avec une évolution proportionnelle suivant l'accroissement du champ magnétique appliqué. La figure (4.9) montre l'évolution de l'effet

magnétocalorique prédites à l'aide de la théorie du champ moléculaire (MFT) .

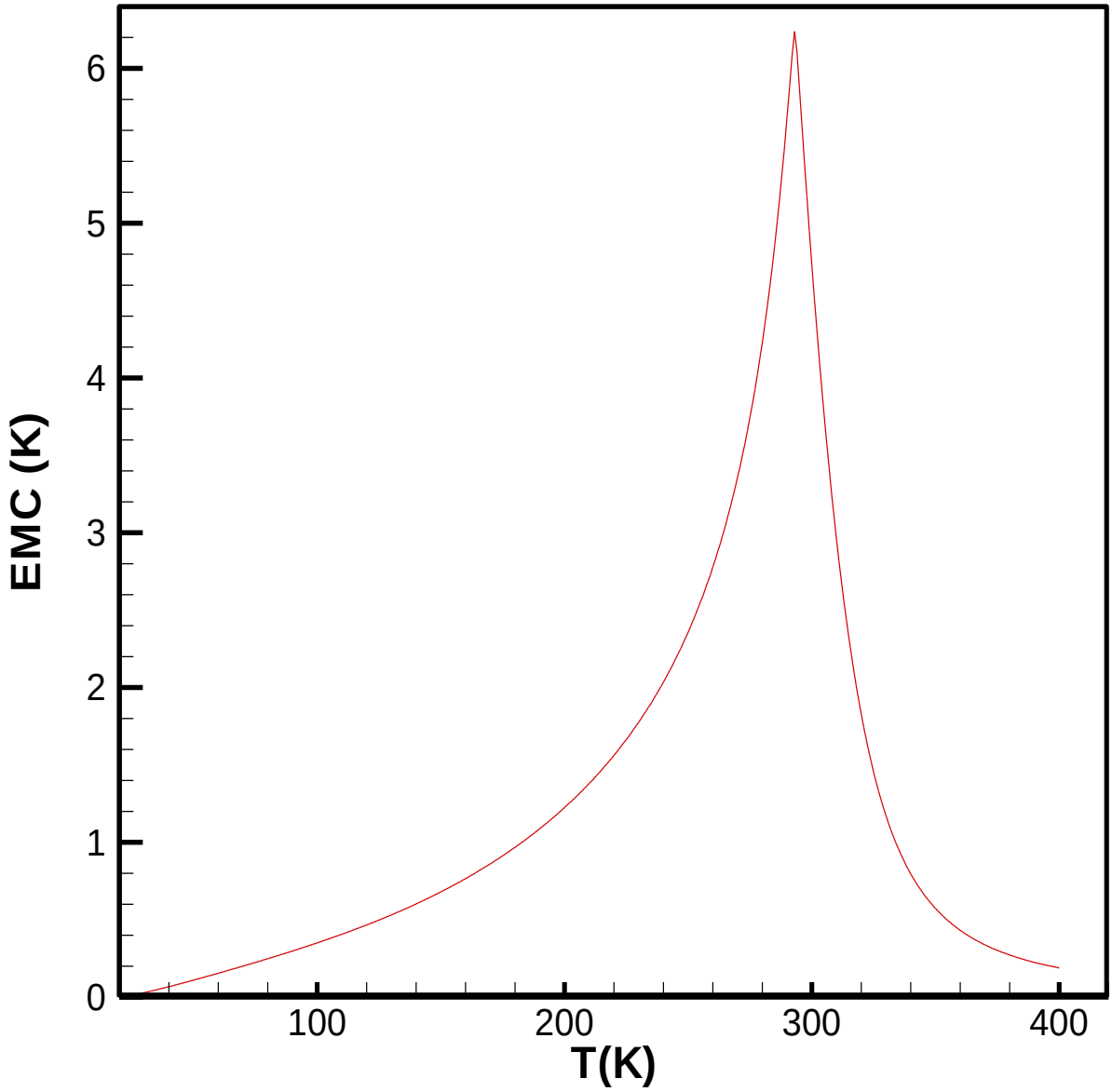



**Figure 4.10** : effet magnétocalorique du Gadolinium

Ce graphes présente une transition de phase de l'état ferromagnétique vers l'état paramagnétique au voisinage du point de Curie TC = 293K, au voisinage du point de Curie TC = 294K, avec une évolution proportionnelle suivant l'accroissement du champ magnétique appliqué.

La figure (4.10) montre la variation d'entropie magnétique en fonction de température ,on peut remarquer la température de transition dépend linéairement de la concentration de Gd et la pente caractérise la nuance du substitué .

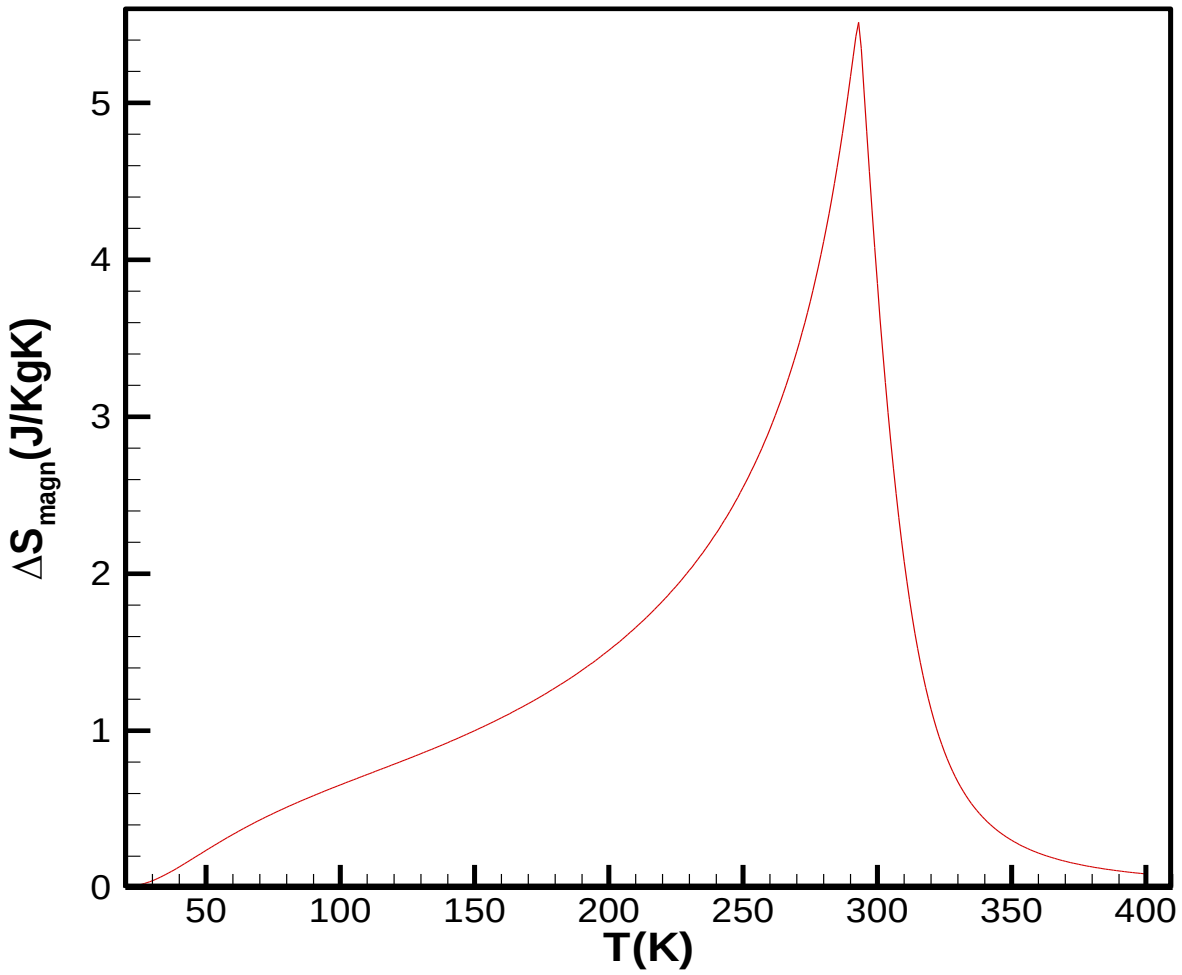



**Figure4.11 :** variation d'entropie du Gadolinium .

# Conclusion générale

## Conclusion générale :

La réfrigération magnétique est une technologie émergente et prometteuse qui pourrait constituer une alternative pour produire du froid avec une efficacité énergétique élevée et sans impact sur l'environnement . De plus en plus de prototypes ont été construits à travers le monde au cours de ces dix dernières années. Ils mettent en évidence la faisabilité de la technologie mais révèlent également des problèmes scientifiques et techniques qu'il est nécessaire de maîtriser pour aboutir à un système réel performant. Ces travaux de thèse constituent une contribution à l'étude de cette thématique. Ils ont été menés en s'appuyant sur deux démarches complémentaires qui sont l'expérimentation et la modélisation .

Pour l'étude des matériaux à EMC et des régénérateurs, deux perspectives sont envisageables .La première concerne la comparaison des méthodes de caractérisation des propriétés magnétocaloriques. Il serait intéressant d'effectuer des mesures calorimétrique et magnétiques sur un plus grand nombre d'échantillons, afin d'une part de disposer de valeurs précises de Sm(H,T), Tad (H,T) et du cp(T) et d'autre part, pour lever la controverse qui existe aujourd'hui sur la pertinence des deux méthodes dans le cas des matériaux du 1er ordre.
Le deuxième aspect de notre travail a porté sur le développement d'un modèle numérique 2D. La modélisation concernait particulièrement le cycle thermique à régénération mis en œuvre dans la réfrigération magnétique pour amplifier les écarts de température T entre la source chaude et la source froide. En effet l' "EMC géant" des matériaux actuellement disponibles reste modeste et ne peut pas être exploité directement pour atteindre des niveaux de T opérationnels dans un système réel.

# Bibiographie

# Bibliographie:

**[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.

**[Bouchekara 2008]:** ‘‘RECHERCHE SUR LES SYSTEMES DE REFRIGERATION MAGNETIQUE. MODELISATION NUMERIQUE, CONCEPTION ET OPTIMISATION‘‘, Thèse de Doctorat, INSTITUT POLYTECHNIQUE DE GRENOBLE ,2008.

**[Bruck, 2005] :** ’’Développements in magnétocalorique réfrigération’’. J. Phys. D : Appl. Phys., 38(23):R381–R391.

**[Charlotte MAYER, 2011] :** ‘‘Nouveaux matériaux magnétocaloriques pour la réfrigération Magnétique ’’, Thèse de Doctorat, Université Bordeaux 1,2011.

**[Chiba ,2015] :** ‘‘ Contribution á l'étude d'un réfrigérateur á régénération Magnétique active opérant près de la température ambiante : considérations thermo fluides’’, Thèse de Doctorat, Laboratoire de Genie Mécanique et Development, École Nationale Polytechnique, 2015.

**[Julien Roudaut] :** ‘‘ Modélisation et conception de systèmes de réfrigération magnétique autour de la température ambiante’’, Thèse de Doctorat, UNIVERSITÉ DE GRENOBLE,2012.

**[Lebouc 2005]:** A. Lebouc, F. Allab, J.M. Fournier, J.P Yonnet, ‘‘Réfrigération Magnétique’’, [RE 28], Techniques de l’Ingénieurs, 2005.

**[Mohamed Balli ,2007] :** ‘‘Etude structurale et magnétique en vue de la mise en œuvre de Nouveaux matériaux à effet magnétocalorique géant’’, Thèse de Doctorat, UNIVERSITE JOSEPH FOURIER – GRENOBLE 1,2007 .

**[Pecharsky et Gschneidner Jr.,1997] :** ‘‘Tunable magnetic regenerator alloys with a géant Magnetocaloric effect for magnetic refrigeration from 20 to 290 k’’. Appl. Phys. Lett.,70(24):3299–3301.

**[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 .

# Bibliographie:

**[Tura 2002]:** A. Tura, ‘‘Active Magnetic Regenerator Experimental Optimization ’’,

Master of Applied Science, Université de Victoria, 2005.

**[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.a

**[Dan’Kov et al 1998 ] :** S. Dan'kov, A. Tishin, V. Pecharsky, and K.A. Gschneidner Jr. Magnetic phase transitions and the magnetothermal prop erties of gadolinium. Phys. Rev. B.(Condensed Matter), 57(6) :34783490, 1998.

**[Kim et al 2011]** : Y. Kim and S. Jeong. Numerical simulation and its verication for an active magnetic regenerator .International Journal of Refrigeration, 34(1) :204 215, 2011.