REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
Université YAHIA FARES de MEDEA
Faculté des sciences et de l'ingénieur
Département de science de la matière
Filière: génie mécanique
Spécialité : énergétique et thermique des systèmes

# PROJET DE FIN D'ETUDE

**En vue de l'obtention d'un diplôme de master**

*Thème*

# Simulation numérique de cycle de réfrigération magnétique de Brayton

***Préparé par :***

- ***BOUKHEDIMI Hayat***
- ***TRABELSSI Imane***

***Encadré par :***
***Dr.CHIBA Younes***

*Année Universitaire 2015-2016*

**ملخص**

في هذه المذكرة قمنا بإجراء دراسة الديناميكا الحرارية لدورة التبريدية المغناطيسية لبرايتون . ولحساب الخصائص المغناطو- الحرارية للمواد المغناطيسية الصلبة (الجادولينيوم،الإربيوم، التيربيوم، و الدسبروزيوم) استعملنا نظرية الحقول الجزيئية .ولنمذجة الدورة التبريدية المغناطسية لبرايتون قمنا بتطوير برنامج عددي باستعمال الفورتران .وفي الاخير ’قمنا بعرض نتائج المحاكاة العددية الممثلة في كمية الحرارة المتبادلة ’وفعالية دورة برايتون لمختلف المواد المغناطو-الحرارية المقترحة .

**كلمات المفتاح :** التبريد المغناطيسي ’ دورة برايتون ’المواد المغناطو- الحراري ’المحاكاة العددية

## Résumé

Ce mémoire présente une étude thermodynamique du cycle de réfrigération magnétique de Brayton. Les propriétés thermomagnétiques du réfrigérant solide (Gadolinium, Terbium, L’erbium, et Dysprosium) ont été déterminées par, la théorie des champs moléculaire. Un code numérique développé en FORTRAN a été utilisés pour modéliser le cycle thermomagnétique de Brayton, Les principaux résultats obtenus incluant les différentes quantités de chaleur échangées et la performance énergétique de cycle de Brayton pour les matériaux magnétocaloriques proposées sont étudiés et analysées.

**Mots clés :** Réfrigération magnétique, cycle de Brayton, matériaux magnétocaloriques, Simulation numérique

## Abstract

This memory presents a thermodynamic study of magnetic Brayton refrigeration cycle. The magnetocaloric properties of solid magnetic refrigerants (Gadolinium, Terbium, Erbium, and Dysprosium) are determined using Molecular Field Theory. A numerical code was developed FORTRON and used to model the thermomagnetic Brayton cycle. The results of numerical simulation including different amounts of heat exchanged and the Brayton cycle energy performance for magnetocaloric materials proposed are studied and analyzed.

**Keywords:** Magnetic refrigeration, numerical simulation, Brayton cycle, magnetocaloric materials

# Dédicaces

*Je remercie avant tout ALLAH le tout puissant qui m'a donné les capacités physiques et intellectuelles nécessaires à la réalisation de ce projet de fin d'études.*

*Je dédie ce travaille à :*

*A mon père*

*Je souhaite que nous se réunions au Paradies inshaallah.*

*A ma chère mère*

*En lui exprimant mon amour, mon respect et vive gratitude pour sa patience, son amour et ces prières qui sont toujours m'encouragent à la réussite tout les long de mes études que dieu la protège.*

*A mes frère et A mes sœurs*

*Je leur souhaite la belle vie avec mes sincères gratitudes.*

*Tous mes chers amis, tous ceux que j'aime et me sont très chers.*

*A toute ma grande famille.*

*IMANE*

# Dédicaces

*Je dédie ce mémoire, fruit d'un long travail, et ce en guise de reconnaissance et d'estime*

***A mes très chers parents***

*En témoignage de ma reconnaissance infinie pour l'amour dont ils m'ont entouré tout au long de mes études par les nombreux sacrifices qu'ils n'ont cessé de consentir, qu'ils veuillent bien trouver en ce travail l'expression de mon profond attachement.*

***A mes frères***

*Qu'ils puissent trouver dans ce modeste mémoire l'expression de mon attachement et de ma profonde reconnaissance.*

*A toute ma famille et à tous mes amis qui m'ont toujours soutenue.*

*A tous ceux qui m'aiment et que je n'ai pas cités.*

SAYAT

# Remerciements

*Tout d'abord, nous remercions le* ***Dieu****, notre créateur de nos avoir donné l'opportunité de mener à bien ce travail.*

*Nous tenons à exprimer nos remerciements les plus sincères envers DR.CHIBA Younes, notre enseignant, pour son encadrement, son disponibilité, son compréhension et son aide précieuse.*

*Nous adressons aussi notre reconnaissance à tous ceux qui nous ont apporté leur aide précieuse.*

*Nous remercions le président et membres du jury pour bien vouloir évaluer notre travail.*

IMANE ET HAYAT

# Liste des figures

# Liste des figures


| Figures | Titre | Page |
|---|---|---|
| I.1 | Moteur magnétothermique de Tesla | 4 |
| I.2 | Extrait d'un article rédigé par Giauque et McDougall relatant de leurs expérimentations (Giauque and McDougall, 1933). | 5 |
| I.3 | l'effet magnétocalorique | 7 |
| I.4 | Schéma du principe de l'équivalence de la réfrigération magnétique avec la réfrigération classique | 8 |
| I.5 | Schémas du prototype de Brown | 9 |
| I.6 | Schémas du prototype de Steyert . | 10 |
| I.7 | Schémas du prototype de Kirol et Dacus . | 11 |
| I.8 | Schéma du prototype de Green *et al.* . | 11 |
| I.9 | Schéma du premier prototype de Zimm *et al.* | 12 |
| I.10 | Schéma du prototype de Hirano *et al.* (*T*hot = 295 K). | 13 |
| I.11 | Schéma du prototype de Rowe *et al.* | 14 |
| I.12 | Photo et schéma du prototype d'Okamura *et al.* | 15 |
| I.13 | Photo et schéma du 3ème prototype de Zimm *et al.* | 16 |
| I.14 | Schéma et performances du prototype de Balli *et al.* | 16 |
| I.15 | Transition de phase et variation de l'entropie en fonction du type de matériau | 21 |
| II.1 | La représentation du cycle magnétique de Carnot | 24 |
| II.2 | La représentation du cycle magnétique d'Ericsson | 26 |
| II.3 | Géométries envisageables pour un régénérateur fonctionnant sous un cycle AMRR | 27 |
| II.4 | La représentation du cycle magnétique d'AMRR | 28 |
| II.5 | Le comportement d'un régénérateur magnétique actif Fonctionnant d'après un cycle d'AMRR | 29 |
| II.6 | La représentation du cycle magnétique de Brayton | 31 |
| II.7 | Un système de régénération basé sur le cycle de Brayton. | 38 |
| III.1 | Evolution de la chaleur spécifique électronique | 42 |
| III.2 | Evolution de la chaleur spécifique magnétique | 43 |
| III.3 | Evolution de la chaleur spécifique du réseau**.** | 43 |
| III.4 | Evolution de la chaleur spécifique totale | 44 |

| | | |
|---|---|---|
| III.5 | Evolution d'effet magnétocalorique. | 45 |
| III.6 | Evolution de l'entropie électronique. | 45 |
| III.7 | Evolution de l'entropie magnétique | 46 |
| III.8 | Evolution de l'entropie du réseau | 47 |
| III.9 | La variation de l'entropie magnétique | 47 |
| III.10 | Evolution de l'entropie totale | 48 |
| III.11 | Evolution de la chaleur spécifique magnétique et l'entropie magnétique | 49 |
| III.12 | Evolution de la chaleur spécifique totale et l'entropie totale | 50 |
| III.13 | Evolution de la chaleur spécifique total (Gd-Er-Dy-Tb) | 51 |
| III.14 | Variation de l'effet magnétocalorique (Gd-Er-Dy-Tb) | 52 |
| III.15 | La variation de l'entropie magnétique (Gd-Er-Dy-Tb) | 53 |
| III.16 | température de curie TC en fonction de la concentration x pour différents alliages | 56 |
| III.17 | Evolution de la chaleur spécifique totale en fonction de la température pour différentes compositions | 56 |
| III.18 | Evolution de la Variation de l'effet magnétocalorique en fonction de la température pour différentes compositions | 57 |
| III.19 | La variation de l'entropie magnétique en fonction de la température pour différentes compositions | 58 |
| III.20 | Variation de la quantité de chaleur dégagée au niveau de sources chaude et froide en fonction de température. | 59 |
| III.21 | Evolution de coefficient de performance en fonction de la température. | 60 |
| III.22 | Variation de la quantité de chaleur dégagée au niveau de sources chaude et froide en fonction de température. | 61 |
| III.23 | Evolution de coefficient de performance en fonction de la température. | 62 |
| III.24 | Variation de la quantité de chaleur dégagée au niveau de sources chaude et froide en fonction de température. | 63 |
| III.25 | Evolution de coefficient de performance en fonction de la température. | 64 |

# Liste des tableaux

# Liste des tableaux


| Tableau | Titre | Page |
|---|---|---|
| III.1 | Les propriétés magnétiques des matériaux magnétiques | 41 |
| III.2 | Paramètres caractéristiques des alliages métalliques | 45 |

# Nomenclature

## Nomenclatures et Symboles :

### Abréviations :

| Abréviations | Signification |
|---|---|
| *AMMR* | La Réfrigération Magnétique Active à Régénération |
| *EMC* | L'effet magnétocalorique |
| *MMC* | Matériaux magnétocaloriques |
| *COP* | Coefficient de Performance |
| *MFT* | Théorie du champ moléculaire |
| *Dy* | Dysprosium |
| *Er* | Erbium |
| *Tb* | Terbium |
| *Gd* | Gadolinium |

### Symbols:

| Symbols | Grandeur | Unité |
|---|---|---|
| $Cp$ | Capacité Calorifique | [J/Kg.K] |
| $\Delta S$ | Variation de l'entropie | [J/Kg.K] |
| $\Delta T$ | Variation de température | [K] |
| $B$ | Champ magnétique | [T] |
| $L$ | Longueur | [m] |
| $T_C$ | Température de Curie | [K] |
| $T_D$ | Température de Debye | [K] |
| $p$ | Pression | [Pa] |
| $P$ | Puissance | [W] |
| $g_J$ | Facteur de Landé | [-] |
| $\rho$ | La masse Volumique | [$Kg/m^3$] |
| $T_{froid}$ | La température de la source froide | [K] |
| $T_{chaud}$ | La température de la source chaude | [K] |
| $S$ | L'entropie | [J/Kg.K] |
| $f$ | La fréquence | [Hz] |
| $V$ | volume | [$m^3$] |

| | | |
|---|---|---|
| $U$ | Energie interne | [J] |
| $M$ | Aimantation | [A/m] |
| $G$ | L'enthalpie libre | [J] |
| $\chi$ | susceptibilité magnétique | [-] |
| $\alpha$ | diffusivité thermique | [$m^2$/s] |
| $\mu$ | perméabilité magnétique | [H/m] |
| $cp$ | Chaleur spécifique | [J/Kg.K] |
| $S_e$ | Entropie électronique | J/K.mole |
| $S_l$ | Entropie du réseau | J/K.mole |
| $S_M$ | Entropie magnétique | J/K.mole |
| $h$ | Coefficient de convection | W/K.$m^2$ |
| $J$ | Nombre quantique du moment angulaire total | [-] |
| $R$ | Constante universelle des gaz | [J.K/mole] |
| $Q_c$ | Quantité de chaleur de la source chaude | [J] |
| $Q_f$ | Quantité de chaleur de la source froide | [J] |
| $\alpha$ | Diffusivité thermique | [$m^2$/s] |
| $\gamma$ | Coefficient de capacité calorifique électronique | [J/K.mole] |
| $\chi$ | Susceptibilité magnétique | [-] |
| $\eta$ | Efficacité | [-] |
| $T_H$, $T_L$ | Les températures des hautes et basse de réservoir | [K] |
| $Tm$ | Température moyenne | [K] |

## Constantes physiques :

| Symbole | Grandeur | Valeur | Unité |
|---|---|---|---|
| $K_B$ | constante de Boltzmann | $1{,}381.\ 10^{-23}$ | [J/ K] |
| $\mu_0$ | perméabilité du vide | $4\pi.10^{-7}$ | [H/m] |
| $\mu_B$ | magnéton de Bohr | $9{,}274.10^{-24}$ | [A/m] |

# Table des matières

# *Table des matières*

Dédicaces…….. i
Remerciements ……....iii
Liste des figures……... v
Liste des tableaux……viii
Nomenclature ……..x
Table des matières…….....xiii
Introduction générale ……...1

## Chapitre I : Généralités sur le froid magnétique.

I.1. Introduction ……4
I.2. Analyse bibliographique ……....4
I.3. L'effet Magnétocalorique ……....6
I.3.1.Définition ……6
I.4. La réfrigération magnétique …… …….....7
I.4.1.Définition ……7
I.4.2. Principe de la réfrigération magnétique ……7
I.5. Les prototypes de réfrigération magnétique …….....8
I.5.1. Prototype de Brown (1976-1978) ……..8
I.5.2. Prototype de Barclay et Steyert (1978-1983) …….....9
I.5.3. Prototype de Kirol et Dacus (1988)……10
I.5.4. Prototype de Green *et al.* (1990) ……11
I.5.5. Prototype de Zimm *et al* (1998) ……12
I.5.6. Prototype de Hirano *et al* (2002)……12
I.5.7. Prototype de Rowe *et al* (2002-2006)……...13
I.5.8. Prototype d'Okamura *et al.* (2006-2007) ……..14
I.5.9. Prototype de Zimm *et al.* (2007-2010) ……..15
I.5.10. Prototype de Balli *et al.* (2010) ……16
I.6. Approche thermodynamique ……17
I.7. Théorie du champ moléculaire ……19
I.8. Matériaux magnétocaloriques……....20

## Chapitre II : Modélisation du cycle de Brayton

II.1.Introduction ……23
II.2. les Cycles de réfrigération magnétique ……..23
II.2.1 : le cycle de Carnot ……...23
II.2.2. Le cycle d'Ericsson ……..25
II.2.2. Le cycle réfrigération magnétique active(AMRR) ……..27
II.3. Étude du cycle de brayton ……30
II.3. 1. Définition ……...30
II.3. 2. Description du cycle de Brayton ……30
II.3. 3. Le coefficient de performance du cycle de Brayton ……..31
II.4.l'analyse exégétique de la réfrigération magnétique ……...35
II.5. Un cycle de réfrigération magnétique de Brayton avec régénération…….37

## Chapitre III : Résultats et interprétation

III.1.Introduction ……..40
III.2. les définitions des matériaux magnétocaloriques ……40
III.2. 1. Le gadolinium(Gd) ……...40
III.2. 2. L'erbium(Er) ……40
III.2. 3. Le dysprosium(Dy) ……..40
III.2. 4. Le terbium (Tb) ……40
III.3. Les propriétés magnétiques des matériaux magnétiques ……...41
III.4. les alliages terres rares ……54
III.5.Etude du cycle réfrigération magnétique de brayton ……..59
Conclusion Générale ……66
Bibliographiques
Annexe

# Introduction générale

# Introduction générale

Aujourd'hui le froid devient l'énergie la plus utilisé dans notre vie quotidienne. On la retrouve dans des applications très diverses telles que la climatisation de bâtiments et de véhicules, la conservation d'aliments, de médicaments et de produits chimiques, la liquéfaction de gaz (hydrogène, azote, hélium) ou encore le refroidissement d'appareils électroniques, etc. Sa production s'appuie aujourd'hui essentiellement sur des techniques classiques de compression et de détente de gaz comme les chlorofluorocarbones (CFC), les hydrofluorocarbones (HFC) et les hydrochlorofluorocarbones (HCFC). Ces derniers, sont malheureusement, des gaz à effet de serre, qui contribuent au réchauffement climatique. [1]

La production de froid est un procédé indispensable à bien des applications développées par l'homme. Ce besoin est en constante évolution et représente aujourd'hui une part très importante de la consommation d'électricité mondiale. Par exemple, l'énergie utilisée pour l'air conditionné et la conservation des aliments s'élève à plus de 25 % de la consommation électrique moyenne d'un ménage américain. Ceci s'explique en partie, par la faible efficacité des techniques de réfrigération conventionnelles basées sur la compression et la détente d'un gaz. [1]

Des travaux sont menés aujourd'hui pour palier ce problème en suivant deux voies parallèles. Dans 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. [2]

La réfrigération magnétique, basée sur les matériaux magnétocaloriques semble être l'une des alternatives sérieuses pour répondre à ces attentes et remplacer les systèmes de réfrigération classiques, plus coûteux du point de vue énergétique et plus nuisibles à l'environnement .[3]

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. [2]

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.

Ce travail s'est intéressé plus particulièrement au cycle réfrigération magnétique de Brayton Energies du futur, regroupant plusieurs organismes et laboratoires, dont l'université de Médéa, où les travaux de projet ont été effectués.

Dans le premier chapitre nous avons présenté le principe de la réfrigération magnétique, ainsi que l'effet magnétocalorique, et les déférents prototypes de la réfrigération magnétique.

Dans le deuxième chapitre on présente les déférents cycles de la réfrigération magnétique ainsi que l'étude du cycle de brayton et ces caractéristiques.

En fin, dans le troisième chapitre les résultats et l'interprétation sont été présentés et discutés.

# Chapitre I : Généralités sur le froid magnétique

## I.1.Introduction

La réfrigération magnétique est basée sur l'effet magnétocalorique (EMC) [1] qui se traduit par le réchauffement d'un matériau lors de son aimantation et son refroidissement lors de sa désaimantation. [4]

La première partie de ce chapitre traite de la physique de l'effet magnétocalorique. La seconde partie, des différents aspects de son application à la réfrigération magnétique et la troisième des matériaux à effet magnétocalorique pour les applications à température ambiante.

## I.2. Analyse bibliographique

Il y a 130 ans, E. Warburg fait une découverte fondamentale : l'effet magnétocalorique dans le fer. Six ans plus tard, deux physiciens, T. Edison et N. Tesla, présentent deux concepts utilisant l'EMC : le générateur magnétothermique et le moteur magnétothermique (Figure I.1), qui restent au stade de l'idée. [5]

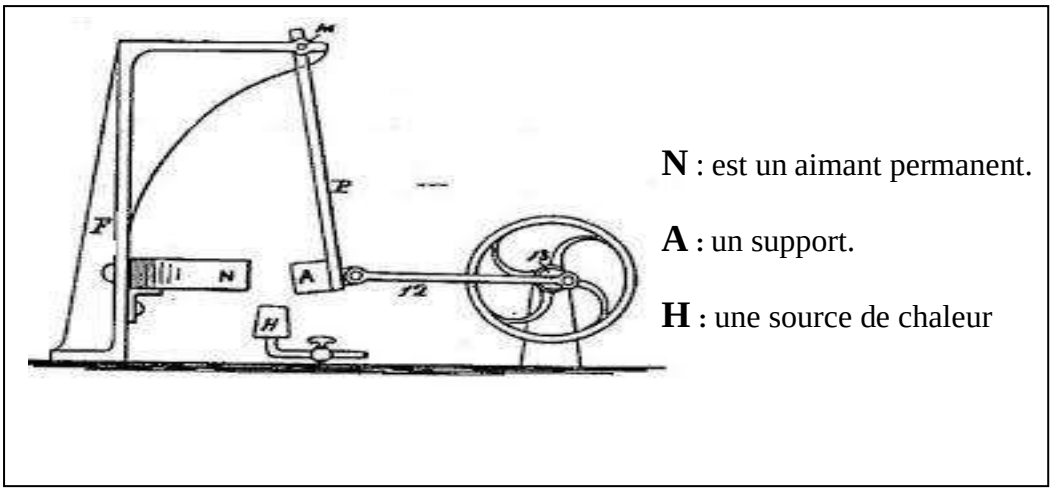


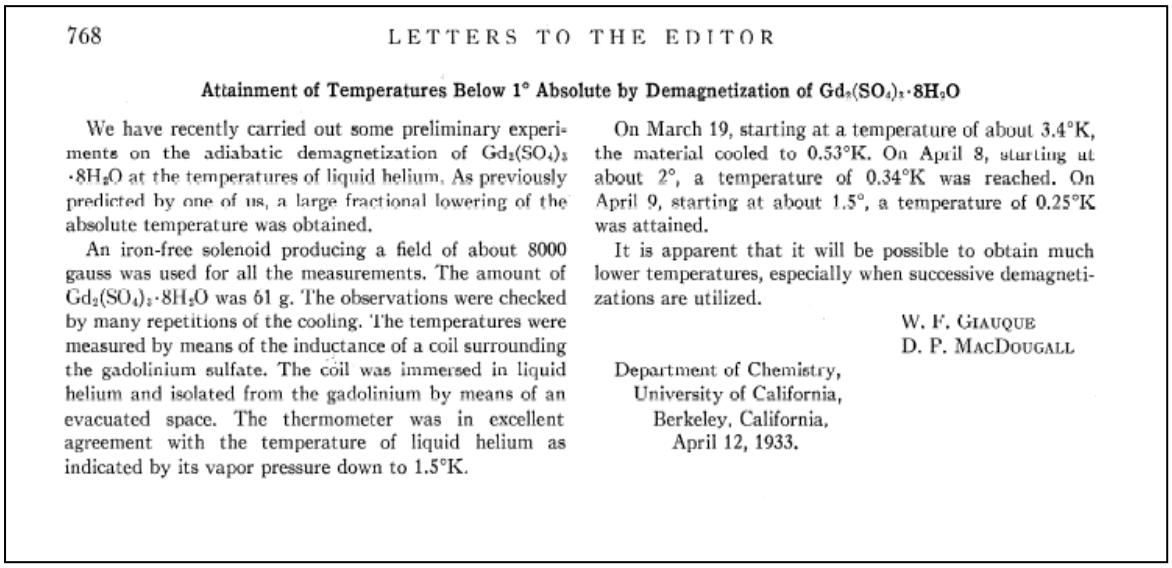

Fig. I.1 : Moteur magnétothermique de Tesla. [1]

**Le principe de moteur magnétothermique de Tesla :** le principe est d'utiliser la chaleur en provenance de H pour modifier l'aimantation de A. Lorsque la chaleur de A augmente, celui-ci s'aimante, et, par opposition magnétique à N, fait un mouvement linéaire sur la droite, ce qui entraîne la roue. En se refroidissement, le processus est inversé. L'enchaînement de ce cycle permet de ce fait d'obtenir de l'énergie mécanique (roue en mouvement) à partir d'énergie thermique. [5]

Il faudra attendre 1905 pour que P. Langevin démontre, dans le cadre de ses travaux sur la cinétique du magnétisme, que la variation de l'aimantation d'une substance magnétique a pour effet un changement réversible de sa température. [5]

En 1918, A. Piccard et P. Weiss portent leurs études sur l'observation expérimentale du processus décrit par Langevin. Ils observent sur un l'échantillon de nickel une variation de température en fonction de son aimantation et de sa désaimantation. [6]

En 1926, P. Debye démontre théoriquement la possibilité de faire diminuer la température d'un échantillon sous un kelvin en utilisant ce procédé. La démonstration est faite en 1933 par W.F Giauque et P.D McDougall, lors d'une démonstration expérimentale qui leur a permis de passer sous le seuil des 1 K (Figure I.2).



768 LETTERS TO THE EDITOR

**Attainment of Temperatures Below 1° Absolute by Demagnetization of $Gd_2(SO_4)_3 \cdot 8H_2O$**

We have recently carried out some preliminary experiments on the adiabatic demagnetization of $Gd_2(SO_4)_3 \cdot 8H_2O$ at the temperatures of liquid helium. As previously predicted by one of us, a large fractional lowering of the absolute temperature was obtained.

An iron-free solenoid producing a field of about 8000 gauss was used for all the measurements. The amount of $Gd_2(SO_4)_3 \cdot 8H_2O$ was 61 g. The observations were checked by many repetitions of the cooling. The temperatures were measured by means of the inductance of a coil surrounding the gadolinium sulfate. The coil was immersed in liquid helium and isolated from the gadolinium by means of an evacuated space. The thermometer was in excellent agreement with the temperature of liquid helium as indicated by its vapor pressure down to 1.5°K.

On March 19, starting at a temperature of about 3.4°K, the material cooled to 0.53°K. On April 8, starting at about 2°, a temperature of 0.34°K was reached. On April 9, starting at about 1.5°, a temperature of 0.25°K was attained.

It is apparent that it will be possible to obtain much lower temperatures, especially when successive demagnetizations are utilized.

W. F. GIAUQUE
D. P. MACDOUGALL

Department of Chemistry,
University of California,
Berkeley, California,
April 12, 1933.

Fig. I.2 : Extrait d'un article rédigé par Giauque et McDougall relatant de leurs expérimentations. [5]

Il faudra attendre trente ans pour qu'un premier cycle magnétique régénératif soit proposé par J.R Van Geuns. Théoriquement, le dispositif devait fonctionner sur une plage de température allant de 4 à 15 K. En 1976, J.A Barclay fabrique le premier dispositif de réfrigération magnétique fonctionnant sur cette plage de température et qui produit environ 1 W. La même année, G.V Brown construisit avec succès le premier réfrigérateur magnétique autour de la température ambiante. Ce premier dispositif innovateur entraîna la construction de nombreux prototypes. Certains sont

restés orientés vers des applications basses températures telles la liquéfaction d'hydrogène, d'autres se sont orientés vers la réfrigération classique. Ce n'est que depuis une décennie que les chercheurs ont cherché à développer des réfrigérateurs magnétiques opérant autour de la température ambiante qui, dans un premier temps, utilisaient comme source de champ des aimants supraconducteurs. Nous pourrons citer par exemple le dispositif réalisé par K. Zimm produisant une puissance froide de 600 W pour un champ de 5 Tesla. En même temps, les problèmes environnementaux ont incité à la conception de systèmes réfrigérants innovants, non polluants, accessibles à tous. Ceci a naturellement imposé l'utilisation d'aimants permanents pour les réfrigérateurs magnétiques, qui, de ce fait, sont aujourd'hui étudiés pour un fonctionnement à température ambiante. Une vingtaine de dispositifs sont actuellement utilisés dans le monde, dont le premier, réalisé en 2001 à l'Astronautics corporation. [5]

## I.3. L'effet Magnétocalorique

Dans cette section, le principe de l'effet magnétocalorique sera d'abord expliqué.

### I.3.1. Définition

L'effet magnétocalorique est une propriété intrinsèque que possèdent tous les matériaux magnétiques qui se traduit par l'échauffement du matériau durant la phase d'aimantation (lorsqu'il est soumis à un champ magnétique) et un refroidissement durant la phase de désaimantation (lorsqu'il est soustrait au champ magnétique). [7]

L'effet magnétocalorique EMC est la conséquence directe du couplage magnétothermique entre les différentes contributions à l'entropie totale S qui sont l'entropie du réseau $S_r$, l'entropie électronique $S_e$ et l'entropie magnétique $S_m$ : [5]

$$S(T, B) = S_r(T) + S_e(T) + S_m(T, B) \quad \text{……..……(I.1)}$$

Ce processus est comparable à un cycle frigorifique classique où l'on cède de la chaleur dans le condenseur et où l'on absorbe de la chaleur dans l'évaporateur. L'effet magnétocalorique est maximal vers la température de Curie Tc du matériau magnétocalorique.

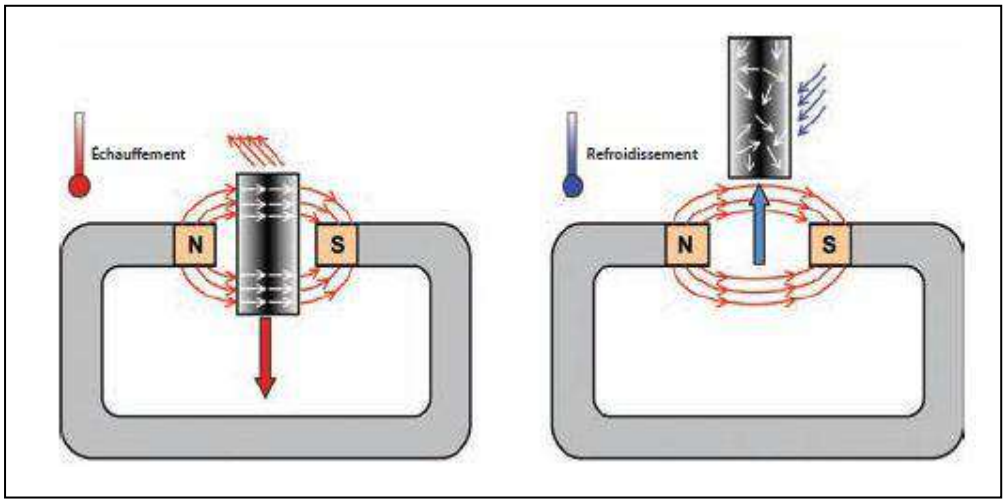



Fig. I.3 : l'effet magnétocalorique. [2]

## I.4. La réfrigération magnétique

### I.4.1.Définition

La réfrigération magnétique autour de la température ambiante est une nouvelle technologie prometteuse de fabrication du froid car elle permet de réaliser des systèmes de réfrigération ou de climatisation à haute efficacité énergétique et n'utilisant pas de gaz à effet de serre ou destructeurs de la couche d'ozone. Elle s'appuie sur les matériaux à effet magnétocalorique (EMC) géant. [8]

### I.4.2. Principe de la réfrigération magnétique

Tout d'abord, il faut souligner que l'objectif de la réfrigération magnétique est différent de la célèbre désaimantation adiabatique. En effet, le fonctionnement de cette dernière n'a pas le caractère cyclique permettant de maintenir l'écart de température créé par la désaimantation. Par contre, le réfrigérateur magnétique (RM) transfert de manière cyclique de la chaleur d'un point à un autre, le but étant -par des échanges judicieux entre certains points du cycle- de créer et maintenir un écart de température entre une source froide et une chaude, l'objet à refroidir étant placé au contact de la source froide. Le principe de cette RM est donc très proche de celui de la réfrigération classique à compression/détente. Ici ce sont les variations du champ magnétique qui engendrent des variations de température, contrairement au réfrigérateur traditionnel où ce rôle est principalement joué par la pression. Il existe

d'ailleurs de grandes analogies de fonctionnement entre réfrigérateurs classiques et magnétiques. [8]

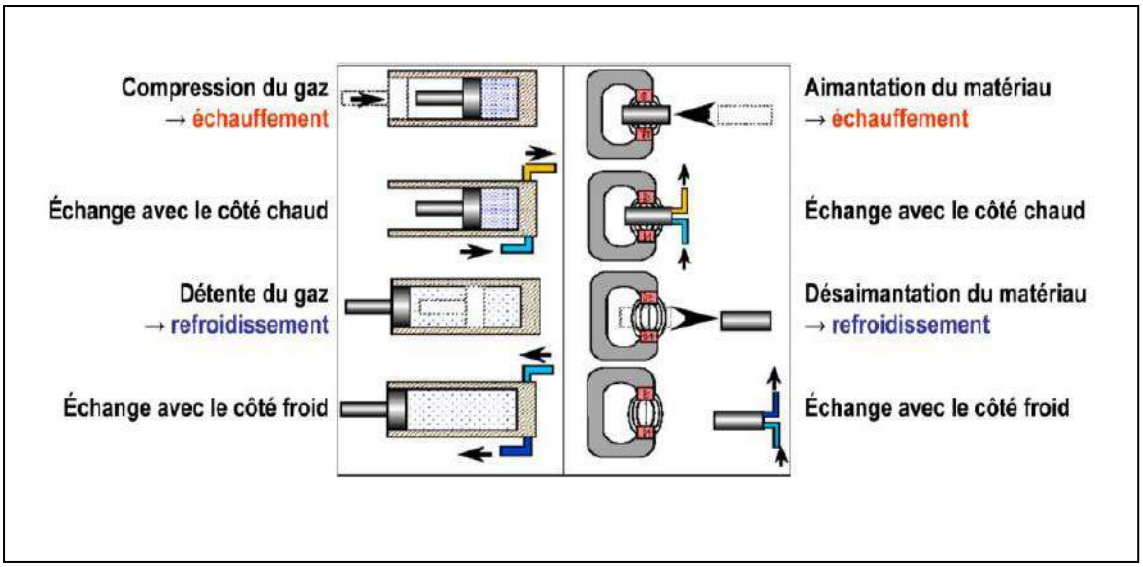



Fig.I.4 : Schéma du principe de l'équivalence de la réfrigération magnétique avec la réfrigération classique. [7]

## I.5. Les prototypes de réfrigération magnétique

Suite au premier prototype de réfrigération magnétique construit par Brown en 1976, de nombreux chercheurs de part le monde ont commencé à attacher de l'importance à la réfrigération magnétique autour de la température ambiante et ont développé consécutivement quelques prototype intéressants. [2]

### I.5.1 Prototype de Brown (1976-1978)

Brown (du Lewis Research Center) a conçu et réalisé le premier prototype de réfrigération magnétique à température ambiante, utilisant un régénérateur passif et permettant d'obtenir des écarts de température bien plus élevés que l'EMC. Il s'agit d'un prototype linéaire au sein duquel un bloc de gadolinium - percé pour permettre le passage du fluide. [9]

- est déplacé à travers une colonne de fluide, qui fait office de régénérateur thermique. Des échangeurs se trouvent à chaque extrémité de la colonne pour échanger de la chaleur avec les sources chaude et froide. La source de champ magnétique est une bobine supraconductrice qui génère un champ de 7T. Lors des premiers essais, Brown réussit à obtenir un écart de température de 47K (Tcold = 272K et Thot = 319K), puis

par la suite il obtient 80K avec le même dispositif en utilisant un cycle magnétique régénératif de Stirling. [9]

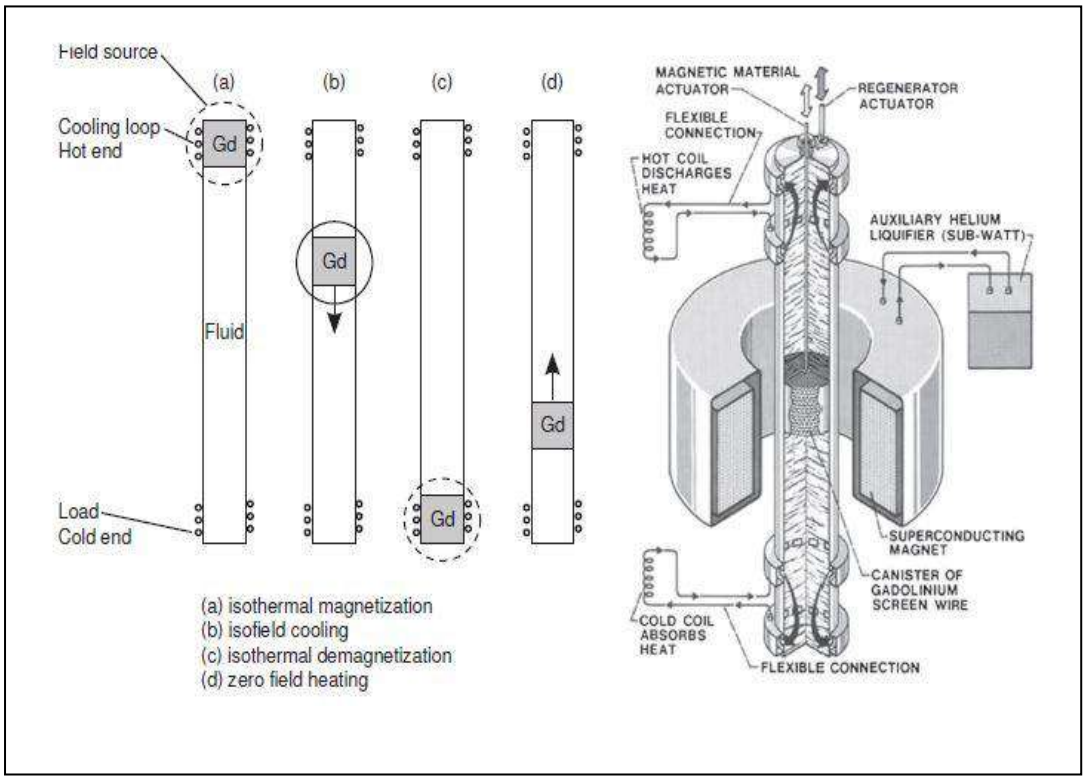



Fig. I.5: Schémas du prototype de Brown. [9]

## I.5.2 Prototype de Barclay et Steyert (1978-1983)

Steyert (du Los Alamos Scientific Laboratory) est à l'origine du concept de régénération active. Il a conçu un prototype de réfrigération magnétique où c'est le matériau magnétocalorique lui même qui joue le rôle de régénérateur. Il s'agit d'un prototype rotatif constitué d'un disque poreux de gadolinium qui passe alternativement d'une zone où le champ magnétique est élevé à une zone où il est faible. Un fluide caloporteur traverse le disque pour absorber de la chaleur du régénérateur et la céder à la source chaude (respectivement pour la prélever à la source froide et la céder au régénérateur).Plusieurs systèmes basés sur ce principe sont brevetés par la suite par Steyert et Barclay (travaillant lui aussi au Los Alamos Scientific Laboratory). [9]

Les principaux inconvénients des systèmes rotatifs tels que celui représenté sur la (Figure I.6) sont les pertes thermiques dues au fluide entraîné par le disque, les fuites

du fluide caloporteur, et l'écart de température limité par la circonférence du disque. [9]

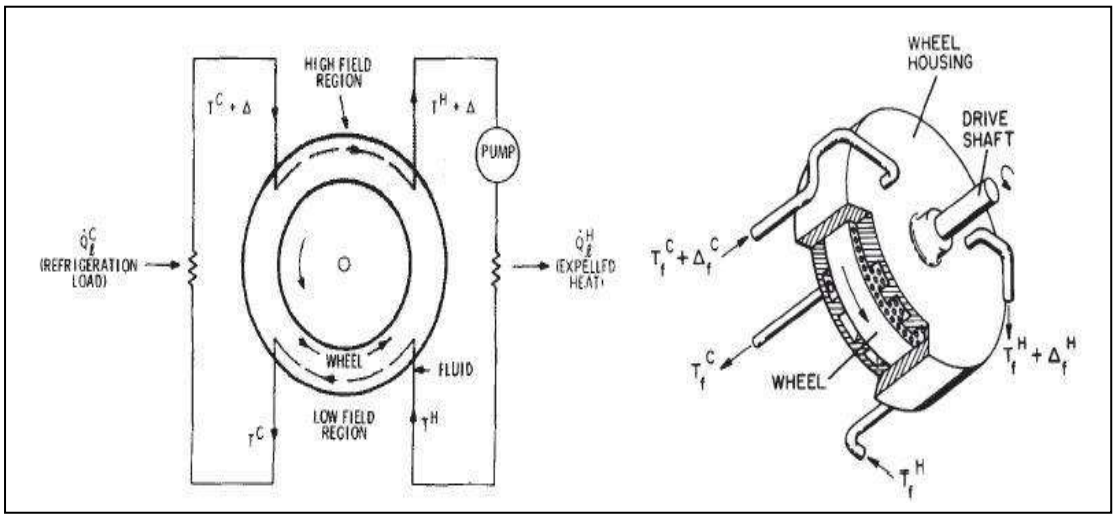



Fig. I.6 : Schémas du prototype de Steyert. [9]

## I.5.3 Prototype de Kirol et Dacus (1988)

Kirol et Dacus (travaillant tous deux à l'Idaho National Engineering Laboratory) ont conçu et réalisé un système de réfrigération magnétique rotatif à récupération. Contrairement aux régénérateurs, le matériau magnétocalorique ne stocke pas de la chaleur, il génère l'EMC et fonctionne comme un échangeur contre-courant. Le prototype est constitué d'un rotor formé par un empilement de disques de gadolinium et de quatre entrefers. Le principe de fonctionnement est similaire à celui du prototype de Barclay et Steyert mais le prototype suit un cycle d'Ericsson magnétique. [9]

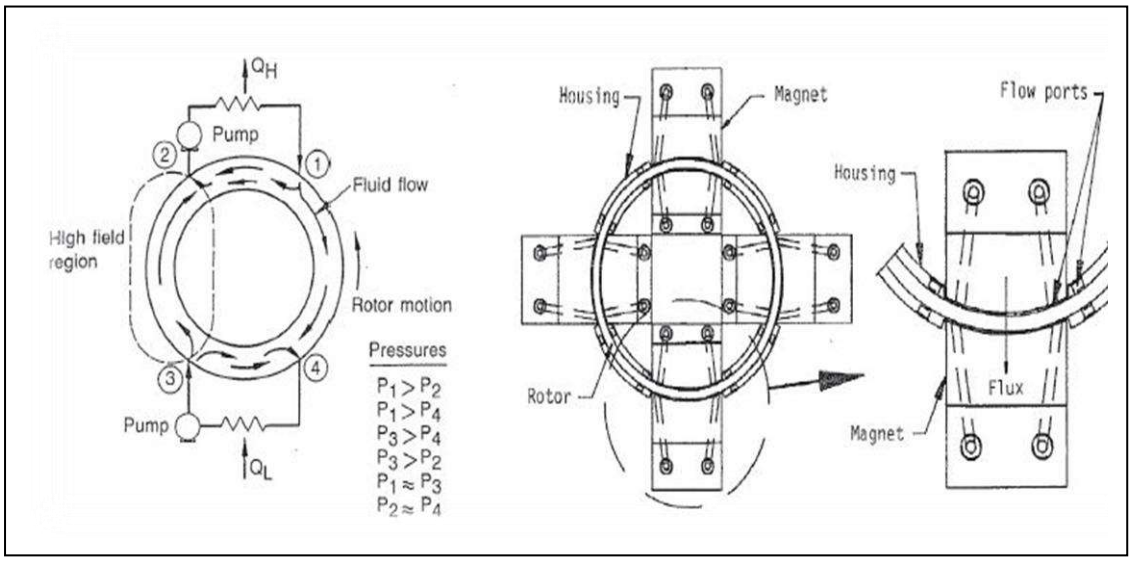



Fig. I.7 : Schémas du prototype de Kirol et Dacus [9].

## I.5.4 Prototype de Green et al. (1990)

Le potentiel de la réfrigération magnétique a intéressé la marine américaine et le David Taylor Research Center a commencé des recherches sur le sujet dans les années 1990. Green et al. Ont conçu et réalisé un prototype utilisant un régénérateur multicouche. La première couche contient du Tb dont la température de Curie est TC = 235K, la seconde couche un alliage GdTb (TC = 264 K) et la dernière du Gd (TC = 293 K). La source de champ magnétique est une bobine supraconductrice qui génère un champ de 7 T. Le régénérateur est constitué de plaques en spirales. En plus du régénérateur magnétique actif, le système comprend un régénérateur passif en cuivre côté source froide. [9]

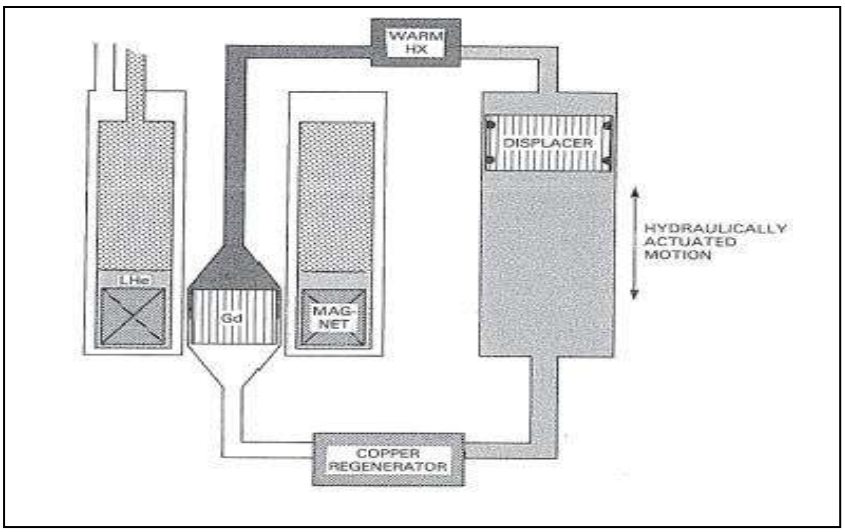



Fig. I.8 : Schéma du prototype de Green *et al.* [9].

## I.5.5 Prototype de Zimm et al (1998)

Une étape importante a été franchie en 1998 lorsque l'entreprise Astraunotics s'est associée au Ames Laboratory pour réaliser un prototype de réfrigération magnétique destiné à démontrer la faisabilité et la compétitivité de la réfrigération magnétique à température ambiante. C'est le premier dispositif qui a fourni une puissance suffisante pour des applications industrielles, grâce à l'utilisation d'une grande quantité de matériau magnétocalorique (3 kg de Gd) et à un champ magnétique élevé (5 T). Par ailleurs, le COP du dispositif varie entre 2 et 8, sans tenir compte de la puissance consommée pour refroidir la bobine supraconductrice, ce qui est une très bonne performance. Enfin, ce prototype a fonctionné pendant plus de 5000 h sur une période

de 18 mois sans rencontrer de problème majeur, ce qui a conforté l'idée d'utiliser cette technologie pour des applications industrielles. [9]

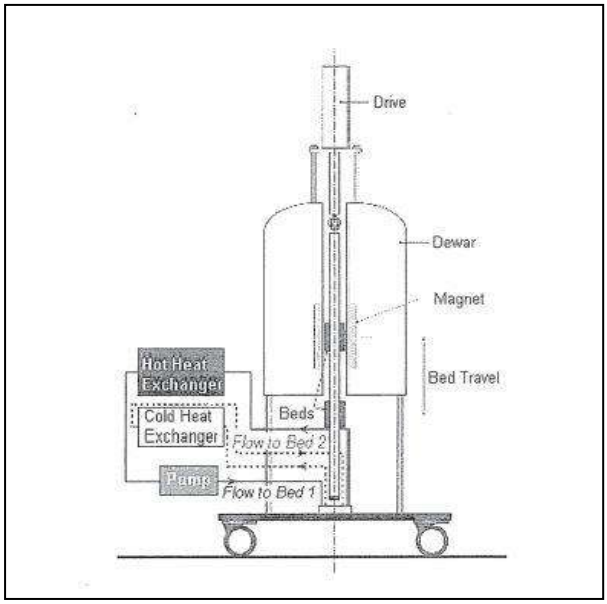



Fig. I.9 : Schéma du premier prototype de Zimm *et al.* [9].

## I.5.6 Prototype de Hirano et al (2002)

L'entreprise Chubu Electric en partenariat avec Toshiba a réalisé en 2002 un prototype de réfrigération magnétique linéaire. La source de champ est une bobine supraconductrice qui génère un champ de 4 T. Le dispositif a de bonnes performances puisque son *COP* est de 5,6 sans tenir compte de la puissance consommée pour refroidir la bobine supraconductrice et pour alimenter la pompe. Un des points faibles de ce prototype est que le régénérateur est soumis à des forces considérables lorsqu'il est déplacé dans le champ magnétique (jusqu'à 1600N!).[9]

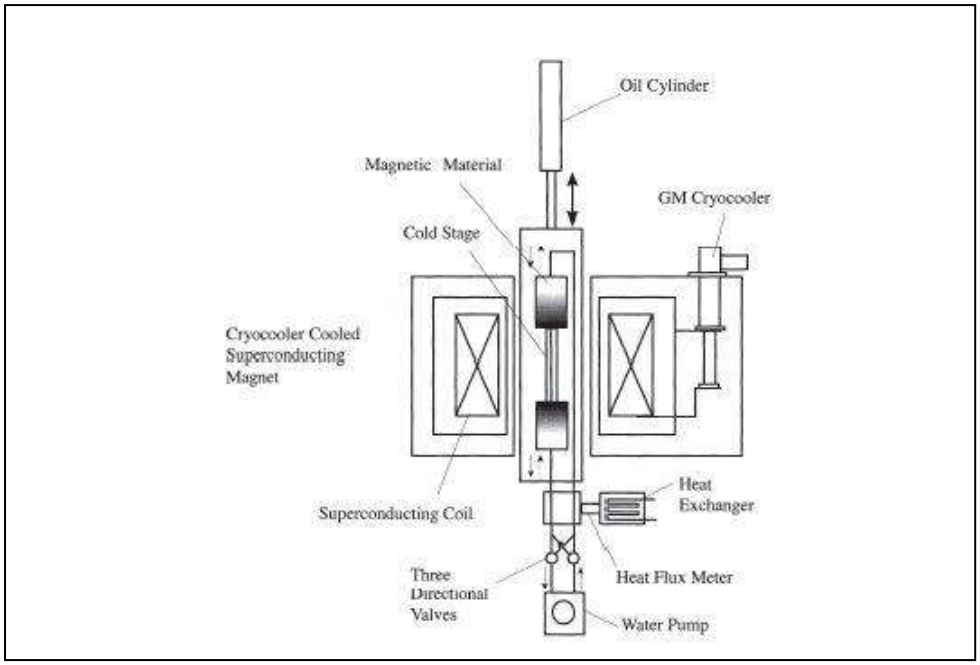



Fig. I.10: Schéma du prototype de Hirano *et al.* (*T*hot = 295 K). [9]

## I.5.7 Prototype de Rowe *et al* (2002-2006)

Rowe (University of Victoria) et Barclay (Cryofuel Systems) ont conçu et réalisé un prototype de réfrigération magnétique en 2002. Par la suite, Richard (Université du Québec à Trois Rivières) *et al.* y ont apporté des améliorations et testé différents matériaux. Seule la configuration la plus récente est décrite ici. La particularité de ce prototype est son mode d'entraînement. Le prototype est entraîné par un moteur rotatif, relié à un système bielle manivelle pour convertir la rotation du moteur en un mouvement linéaire du régénérateur. Le fluide caloporteur - de l'hélium gazeux - est soumis à un mouvement oscillant dans le régénérateur pour réaliser un cycle AMR. Le prototype utilise un régénérateur multicouche composé de trois matériaux : Gd (*T*C = 294 K), $Gd_{0.74}Tb_{0.26}$ (TC = 278 K) et $Gd_{0.85}Er_{0.15}$ (TC = 265 K). Cela lui permet d'atteindre un écart de température important (50K avec un champ de 2 T). [9]

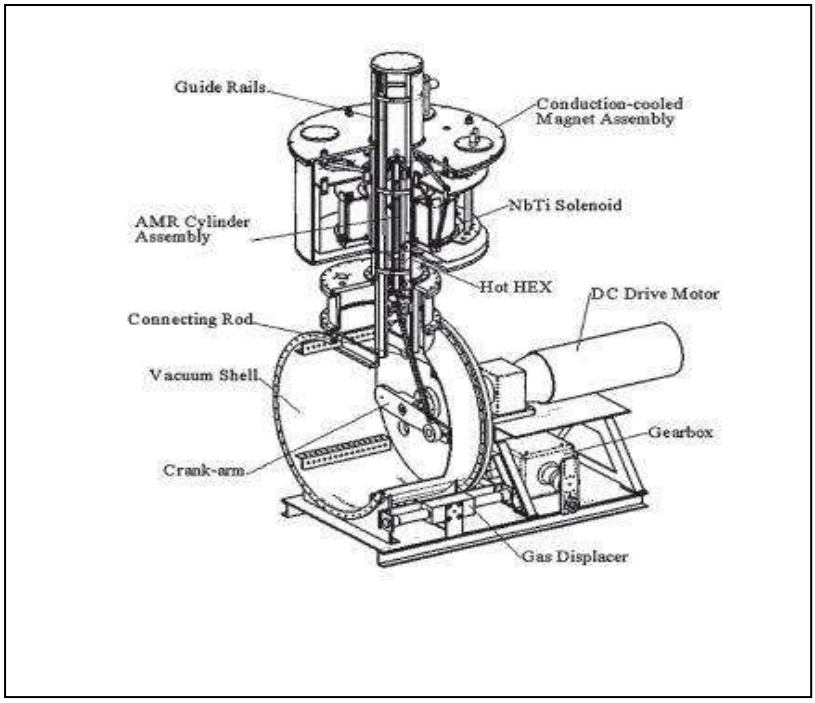



Fig. I.11 : Schéma du prototype de Rowe *et al.* [9].

## I.5.8 Prototype d'Okamura et al. (2006-2007)

L'entreprise Chubu Electric a réalisé un second prototype de réfrigération magnétique en partenariat avec le Tokyo Institute of Technology en 2006. Okamura et al. y ont apporté des améliorations significatives l'année suivante. Le circuit magnétique amélioré permet de créer un champ de 1,1T grâce à des aimants permanents et des concentrateurs de flux (contre 0,77T précédemment). La culasse est feuilletée pour réduire les pertes par courants induits et le circuit hydraulique est modifié pour réduire les pertes de charge. Ces améliorations permettent de faire passer la puissance maximale produite par le prototype de 60W à 540 W. Le principal défaut de ce dispositif est la rotation discontinue du rotor, défavorable à la conservation de l'énergie. Le COP de ce prototype est de 1,8 et peut sembler faible en comparaison aux autres prototypes, mais pour son calcul Okamura et al. Tiennent compte de la puissance réellement consommée par le moteur et la pompe. [9]

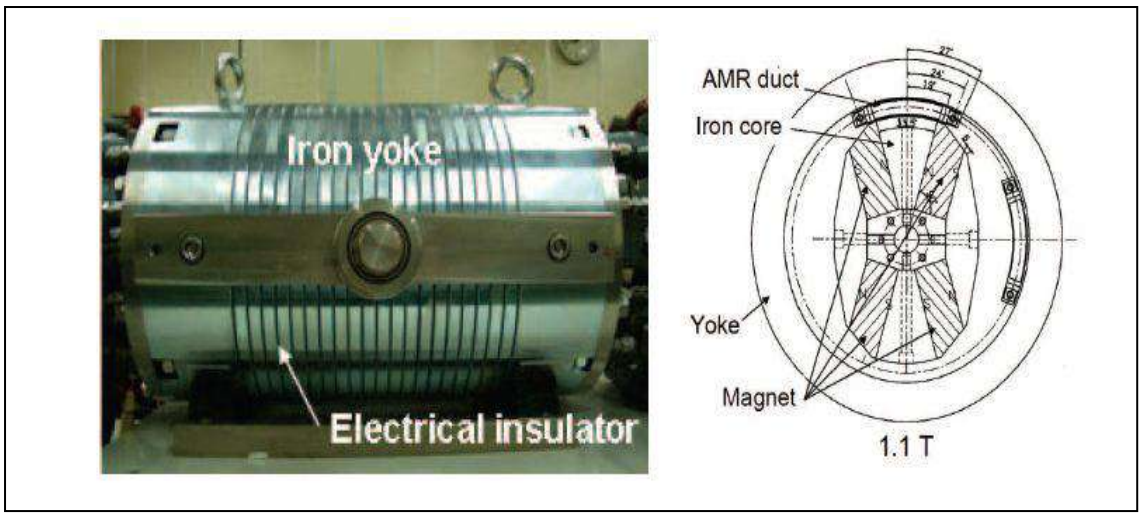



Fig. I.12 : Photo et schéma du prototype d'Okamura *et al.* [9].

## I.5.9 Prototype de Zimm et al. (2007-2010)

Astraunotics a réalisé un troisième prototype de réfrigération magnétique en 2007. Le prototype rotatif contient deux sources de champ, constituées d'aimants permanents associés à des pièces polaires à concentration de flux, et qui génèrent chacune un champ de 1,4 T. Le rotor est un disque composé de 12 segments de matériaux magnétocaloriques. Suite aux résultats décevants lors des premiers essais, Russek *et al.* ont modifié les régénérateurs et remplacé les plaques parallèles de gadolinium par des empilements de sphères de gadolinium ou de LaFeSiH. Les résultats obtenus avec le gadolinium sont meilleurs qu'avec le LaFeSiH. Ce prototype atteint des fréquences de fonctionnement élevées et produit des puissances et des écarts de température importants. Il confirme la faisabilité technique de la réfrigération magnétique à température ambiante pour des applications industrielles.[9]

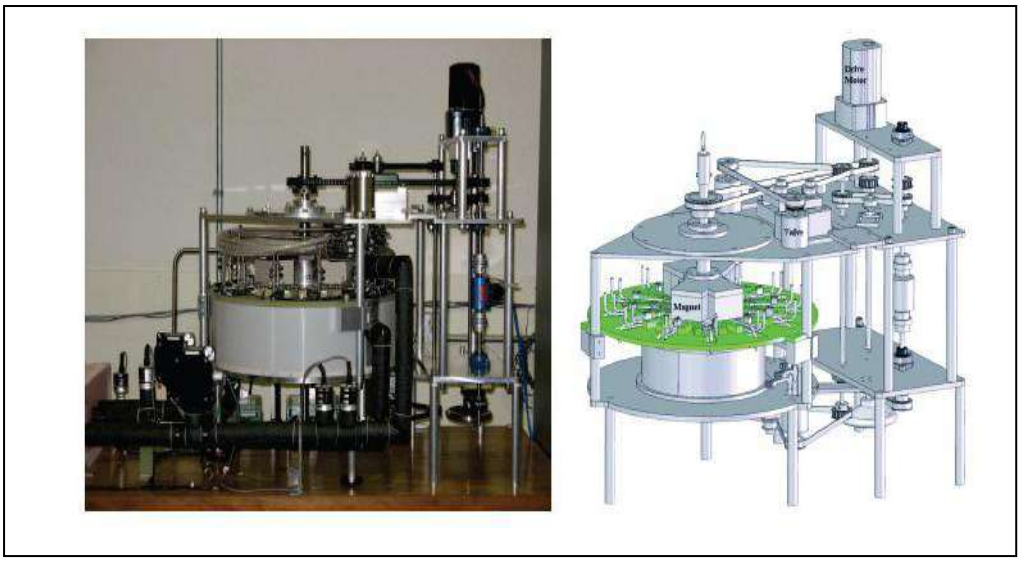


Fig. I.13 : Photo et schéma du 3ème prototype de Zimm *et al.* [9]

## I.5.10 Prototype de Balli et al. (2010)

Le prototype réalisé par Balli *et al.* (University of Applied Sciences of Western Swit-zerland) est un système linéaire composé de deux cylindres de Halbach. Chaque cylindre de Halbach est associé à deux régénérateurs qui passent successivement dans l'entrefer. Cela permet une compensation partielle des forces subies par les régénérateurs lorsqu'ils se déplacent dans la zone à fort gradient de champ magnétique. [9]

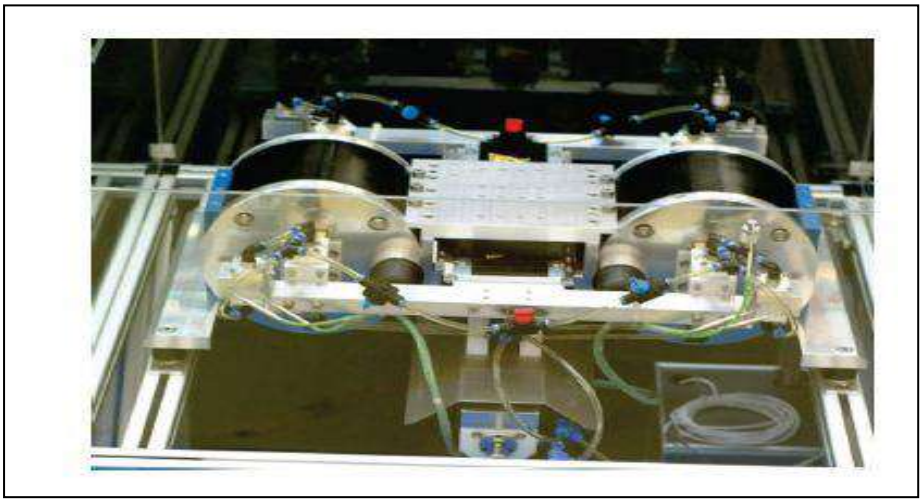


Fig. I.14 : Schéma et performances du prototype de Balli *et al.* [9].

## I.6. Approche thermodynamique

Dans les matériaux à effet magnétocalorique, un changement significatif de l'entropie peut être effectué par l'application ou la suppression d'un champ d'induction magnétique B. L'EMC alors, ne dépend que de la température initiale du matériau T et du champ d'induction magnétique B. L'EMC peut être interprété comme étant le changement isotherme de l'entropie ou le changement adiabatique de la température. [2]

Un matériau magnétique plongé dans un champ magnétique est décrit, thermodynamiquement parlant, par l'enthalpie libre G : [10]

$$G(P, B, T) = U + P \cdot V - \boldsymbol{\mu_0} M \cdot B - T \cdot S \qquad (I.2)$$

Avec :

**U :** représentent l'énergie interne.

$\boldsymbol{\mu_0}$ : représentent la perméabilité magnétique du vide.

- **les variables intensives :**

**P :** représente la pression.

**B :** représente le champ magnétique.

**T :** représente la température.

- **les variables extensives :**

**V :** représente le volume.

**M :** représente l'aimantation.

**S :** représente l'entropie.

La différentielle totale de G a pour expression :

$$dG(P, B, T) = dU + P\,dV - \mu_0 B\,dM - TdS + V\,dP - \mu_0 M\,dB - SdT \qquad (I.3)$$

Si l'on considère P, H et T comme variables d'état, l'équation (I.3) se réduit à :

$$dG(P, B, T) = \left(\frac{\partial G}{\partial P}\right)_{B,T} dP + \left(\frac{\partial G}{\partial B}\right)_{P,T} dB + \left(\frac{\partial G}{\partial T}\right)_{P,B} dT \qquad (I.4)$$

- En identifiant les équations (I.3) et (I.4), on retrouve d'une part la variation d'énergie interne donnée par le premier principe de la thermodynamique :

$$dU = T\,dS + \mu_0 B\,dM - PdV \qquad (I.5)$$

-Et d'autre part, dG qui se réduit à :

$$dG(P, B, T) = V\,dP - \mu_0 M\,dB - SdT \qquad (I.6)$$

-En identifiant maintenant l'expression I.6 à l'expression I.4, on obtient les équations d'état suivantes :

$$V = \left(\frac{\partial G}{\partial P}\right)_{B,T} \qquad (I.7)$$

$$\mu_0 M = -\left(\frac{\partial G}{\partial B}\right)_{P,T} \qquad (I.8)$$

$$S = -\left(\frac{\partial G}{\partial T}\right)_{P,B} \qquad (I.9)$$

-En dérivant ces expressions on en déduit les relations dites de Maxwell. Par exemple, avec les équations I.8 et I.9 :

$$\mu_0\left(\frac{\partial M}{\partial T}\right)_{P,B} = -\left(\frac{\partial}{\partial T}\left(\frac{\partial G}{\partial B}\right)_{P,T}\right)_{P,B} = -\left(\frac{\partial}{\partial B}\left(\frac{\partial G}{\partial T}\right)_{P,B}\right)_{P,T} = \left(\frac{\partial S}{\partial B}\right)_{P,T}$$

$$\mu_0\left(\frac{\partial M}{\partial T}\right)_{P,B} = \left(\frac{\partial S}{\partial B}\right)_{P,T} \qquad (I.10)$$

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

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

$$dS = \left(\frac{\partial S}{\partial P}\right)_{B,T} dP + \left(\frac{\partial S}{\partial B}\right)_{P,T} d\,B + \left(\frac{\partial S}{\partial T}\right)_{P,B} d\,T \qquad (I.11)$$

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

$$C_{P.T} = T\left(\frac{\partial S}{\partial T}\right)_{P,B} \qquad (I.13)$$

En utilisant la relation de Maxwell (éq. I.10) et la capacité calorifique ainsi définie et, en considérant le système à pression constante, on peut réécrire l'équation I.11 de la différentielle de l'entropie :

$$dS = \mu_0 \left(\frac{\partial M}{\partial T}\right)_{P,H} dB + \frac{C_{P,T}}{T} dT \qquad (I.13)$$

La dérivée totale de température donne :

$$dT = -\frac{T}{C_{P,T}} \mu_0 \left(\frac{\partial M}{\partial T}\right)_{P,H} dB \qquad (I.14)$$

## I.7. Théorie du champ moléculaire

Le calcul théorique de l'EMC est basé sur le modèle de Weiss (MFT : Molecular Field Theory) et les relations thermodynamiques. Afin d'interpréter quantitativement le ferromagnétisme, Weiss proposa un modèle phénoménologique dans lequel l'action du champ magnétique appliqué B se trouvait augmentée de celle d'un champ magnétique supplémentaire proportionnel à l'aimantation volumique Bv tel que : [2]

$$B_V = \lambda \mu_0 M \qquad (I.15)$$

L'énergie d'un moment magnétique s'écrit :

$$E_i = -\mu_i \, (B + B_V) \qquad (I.16)$$

Les moments magnétiques vont avoir tendance à s'orienter dans la direction de ce nouveau champ. Le calcul est alors identique à celui du paramagnétisme en remplaçant partout B par $B + B_w$ . Dans cette approximation M est donné par :

$$M(x) = n \, g_J \mu_B \, B_J(x) \qquad (I.17)$$

Où :

$$X = \frac{g_J J \mu_B}{K_B T} + \frac{3 T_C J B_J(X)}{T(J+1)} \quad \text{(I.18)}$$

Et :

$$B_J(X) = \frac{2J+1}{2J} \coth\left(\frac{2J+1}{2J} X\right) - \frac{1}{2J} \coth\left(\frac{1}{2J} X\right) \quad \text{(I.19)}$$

L'entropie magnétique est donnée par la relation de suivante :

$$S_m(B,T) = R\left(\ln\left(\frac{\sinh\left(\frac{2J+1}{2J}X\right)}{\sinh\left(\frac{1}{2J}X\right)}\right) - X B_J(X)\right) \quad \text{(I.20)}$$

L'entropie du réseau est donnée par la relation suivante :

$$S_r(T) = R\,(-3\ln\left(1 - e^{\frac{-T_D}{T}}\right) + 12\left(\frac{T}{T_D}\right)^3 \int_0^{\frac{T_D}{T}} \frac{y^3}{e^y - 1}\,dy \quad \text{(I.21)}$$

L'entropie électronique est donnée par la relation suivante :

$$S_e(T) = \gamma T \quad \text{(I.22)}$$

## I.8. Matériaux magnétocaloriques

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, comme illustré sur la Figure (1.15) A l'inverse, les matériaux du second ordre ont des variations d'entropie plus faibles mais sur une large plage de température. [9]

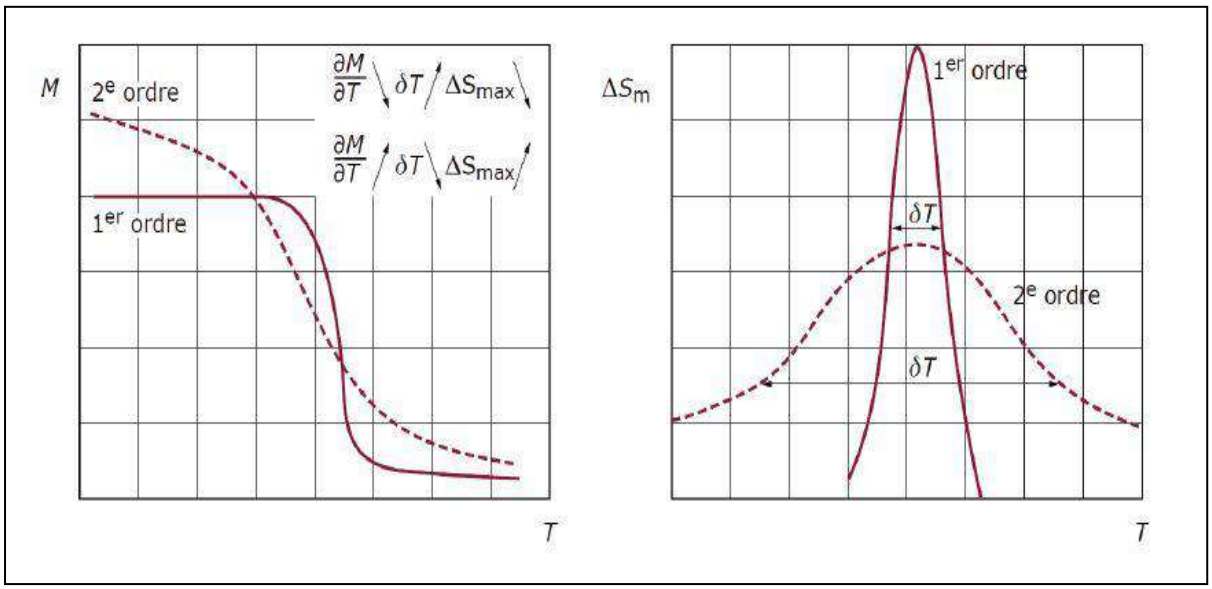



Fig. I.15 : Transition de phase et variation de l'entropie en fonction du type de matériau [9]

# Chapitre II : Modélisation du cycle de Brayton

## II.1.Introduction

Le 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 d'Ericsson, le cycle magnétique de Brayton et le cycle de réfrigération magnétique active(AMRR). [2] Et dans ce chapitre on va insister sur le cycle de Brayton magnétique.

## II.2. les Cycles de réfrigération magnétique

Afin de produire de la puissance en continu, il est nécessaire de faire fonctionner les Systèmes selon un cycle magnétique de réfrigération. Il existe plusieurs cycles magnétiques de réfrigération ayant leur équivalent en thermodynamique conventionnelle. Les plus courants sont présentés ci-dessous.

## II.2.1 : le cycle de Carnot

Le cycle de Carnot permet de travailler sur un domaine de température allant de $T_{froid}$ à $T_{chaud}$. Ce cycle est composé de deux isothermes et de deux adiabatiques représentées par le rectangle (1-2-3-4). [11]

La Figure **(**II.1) représente le cycle de Carnot magnétique. Celui-ci est un cycle idéal composé de quatre étapes :

- 1→2: Aimantation isentropique, elle est due à l'application adiabatique du $T_c$champ, par conséquent la température augmente jusqu'à$T_c$.

- 2→3: Dégagement de chaleur au niveau de la source chaude à la température dénoté par $Q_c$, en magnétisant le réfrigérant d'une façon isotherme à la température $T_c$

- 3→4:Désaimantation isentropique, elle est due à l'enlèvement adiabatique du champ, par conséquent la température diminue jusqu'à$T_f$.

- 4→1: Absorption de chaleur au niveau de la source froide à la température $T_f$ dénoté par $Q_f$, en démagnétisant le réfrigérant d'une façon isotherme à la température $T_f$. [2]

Le rendement du cycle de Carnot est donné par l'expression suivante :

$$q_c = T_f(s_1 - s_4) \quad \text{(II.1)}$$

$$w = (T_c - T_f)(s_1 - s_4) \quad \text{(II.2)}$$

$$COP_{Carnot} = \frac{q_c}{w} \quad \text{(II.3)}$$

$$COP_{Carnot} = \frac{T_f}{T_c - T_f} \quad \text{(II.4)}$$

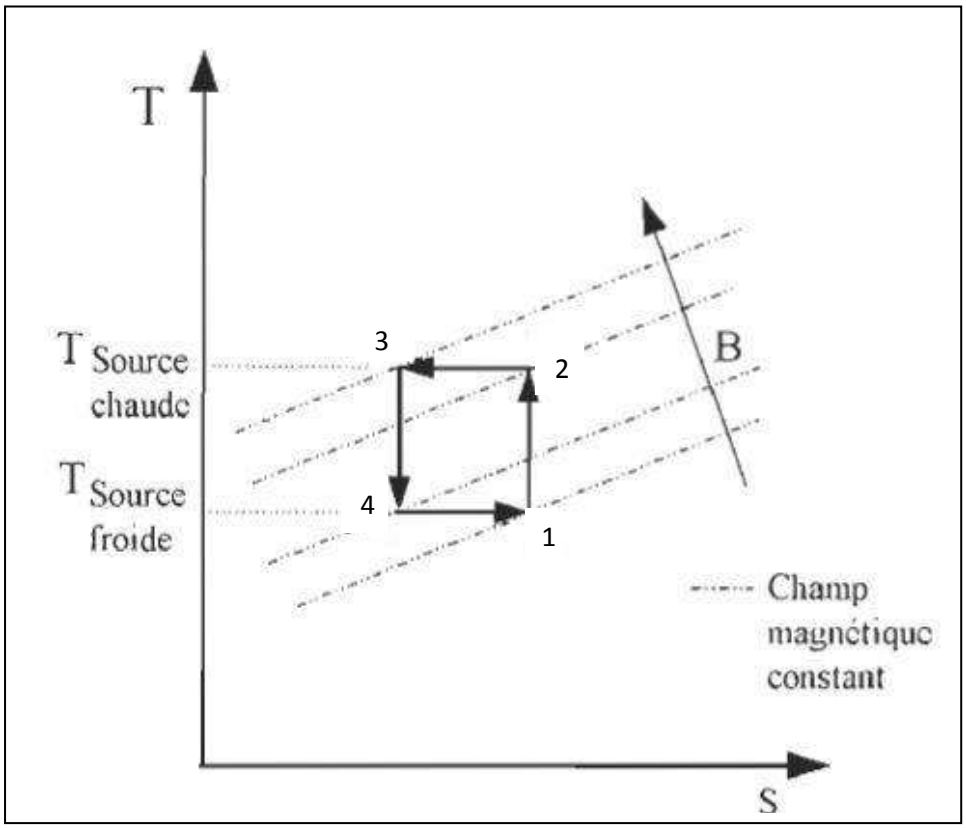



Fig. II.1 : La représentation du cycle magnétique de Carnot. [11]

## II.2.2. Le cycle d'Ericsson

Dans la pratique il est intéressant d'avoir un écart de température entre les sources qui est indépendant de la différence adiabatique de température. [12]

Le cycle d'Ericsson est constitué de deux processus isotherme (température Constante) alternés avec deux processus isochamps (champ magnétique constant). Il s'accompagne d'un mouvement d'oscillation de la position du fluide vis-à-vis du matériau magnétocalorique et de l'aimant, ce qui permet l'instauration d'un gradient de température. [1]

La Figure **(**II.2) représente le cycle d'Ericsson magnétique. Ce cycle est composé de quatre étapes principales :

- ✓ **Aimantation isotherme :** le matériau s'échauffe puis échange sa chaleur d'aimantation avec la source chaude de température $T_c$.

$$Q_C = T_C \Delta S (T_C, \Delta B) = T_C \Delta S_m (T_C, \Delta B) \quad \text{(II.5)}$$

- ✓ **Refroidissement isochamp :** le matériau est à $T=T_C$, le fluide caloporteur à $T=T_F$, circule de la source froide à la source chaude en absorbant la chaleur du matériau jusqu'à ce que sa température soit égale à $T_F$.

- ✓ **Désaimantation isotherme :** le matériau se refroidit et absorbe une quantité de chaleur $Q_F$ de la source froide à $T=T_F$.

$$Q_F = T_F \Delta S (T_F, \Delta B) = T_F \Delta S_m (T_F, \Delta B) \quad \text{(II.6)}$$

- ✓ **Réchauffement isochamp :** le matériau est à $T=T_F$, le fluide caloporteur à $T=T_C$, circule de la source chaude à la source froide en cédant de la chaleur au matériau jusqu'à ce que sa température deviennent égale à $T_C$. [6]

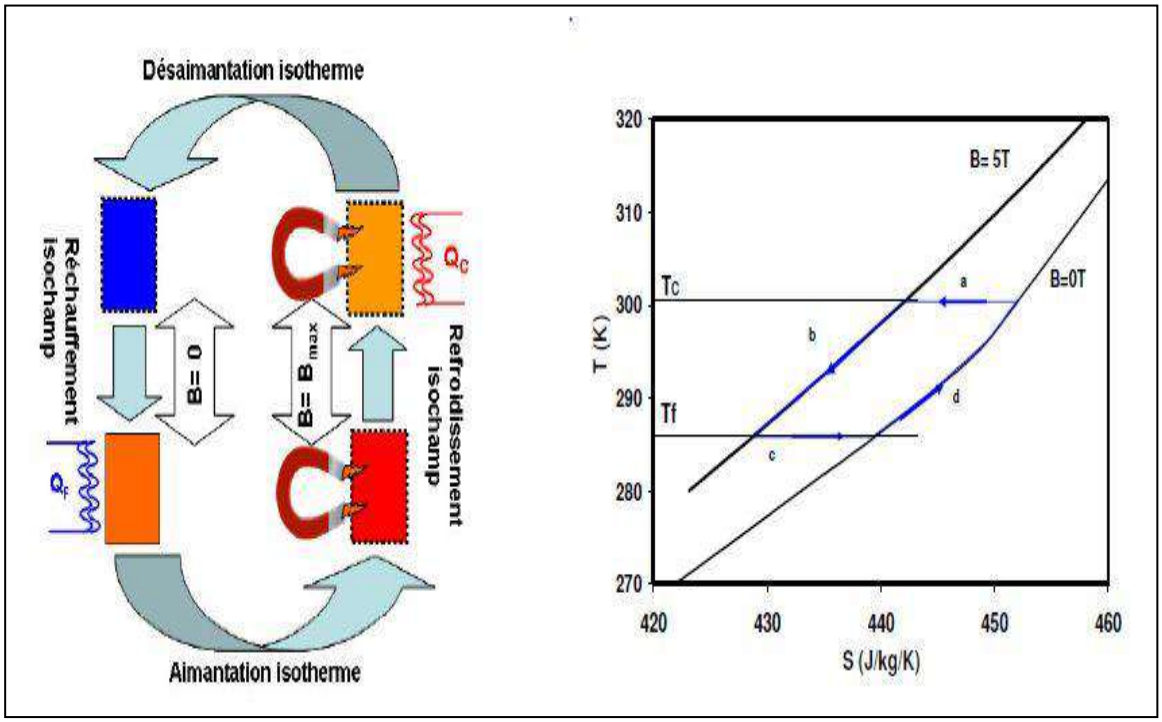



Fig. II.2 : La représentation du cycle magnétique d'Ericsson. [1]

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

$$COP_{\text{Ericsson}} = \frac{q_c}{w} \tag{II.7}$$

$$COP_{\text{Ericsson}} = \frac{T_1(s_1 - s_4)}{T_2(s_3 - s_2) - T_1(s_1 - s_4)} \tag{II.8}$$

L'étude de la limite suivante :

$$\lim_{T_2 \to T_1} COP_{\text{Ericsson}} = \frac{T_1}{T_2 - T_1} = COP_{\text{carnot}} \tag{II.9}$$

## II.2.2. Le cycle réfrigération magnétique active(AMRR)

L'écueil du réchauffement du réseau cristallin peut être contourné grâce à l'application de la réfrigération magnétique active à régénération AMRR (active magnetic régénérative réfrigération) dont le principe a été suggéré pour la première fois par Van Geuns en 1968. [4]

Dans un système de réfrigération magnétique, la régénération 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. Ainsi l'énergie utilisée pour le refroidissement de la charge du réseau peut être réemployée efficacement pour augmenter la variation effective de l'entropie et l'écart de température résultant [3].

Un réfrigérateur AMRR classique inclut : un aimant, un lit régénérateur contenant le matériau magnétique frigorigène, deux échangeurs thermiques froid et chaud, et un système permettant au fluide d'effectuer des allers-retours à travers le lit régénérateur.

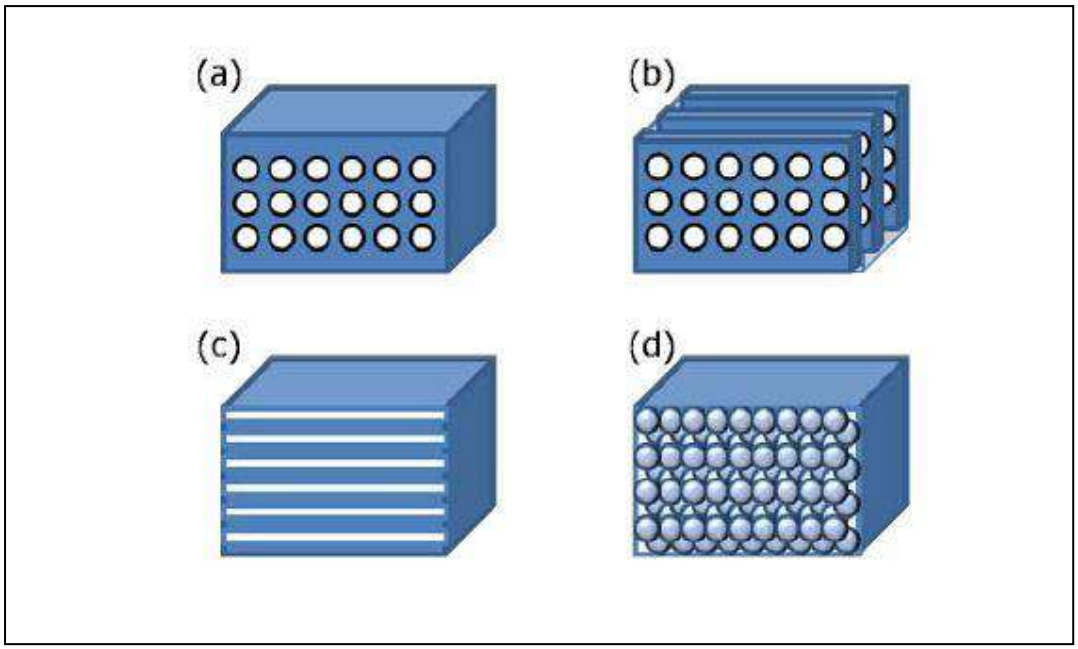



Fig. II.3 : Géométries envisageables pour un régénérateur fonctionnant sous un cycle AMRR.[4]

- (a) : structure en canaux dans un bloc solide.
- (b) : empilement de plaques perforées arrangées perpendiculairement à la direction d'écoulement du fluide réfrigérant.

- (c) : empilement de plaques arrangées parallèlement à la direction d'écoulement du fluide réfrigérant.
- (d) : empilement compact de particules sphériques.

L'efficacité des différents lits régénérant en fonction de leurs géométries présentées sur la figure **(**II.3) a été calculée par Barclay et Sarangi [1]. Les résultats montrent que pour une fréquence de 1 Hz, la géométrie entraînant le moins de perte de chaleur est l'empilement de plaques perforées (b).

La Figure **(**II.4) représente le cycle d'AMRR magnétique. Ce cycle est composé de quatre étapes principales :

- ✓ **Aimantation adiabatique (A→B) :** Le matériau est aimanté et sa température augmente.
- ✓ **Refroidissement isochamp (B→C) :** Chaque tranche de matériau se refroidit isochamp en rejetant de la chaleur au fluide caloporteur.
- ✓ **Désaimantation adiabatique (C→D) :** Le champ appliqué au matériau diminue et la température du matériau magnétocalorique diminue aussi.
- ✓ **Réchauffement isochamp (D→A) :** Chaque tranche de matériau se réchauffe isochamp par le fluide provenant des tranches adjacentes à un niveau de température supérieur. [12]

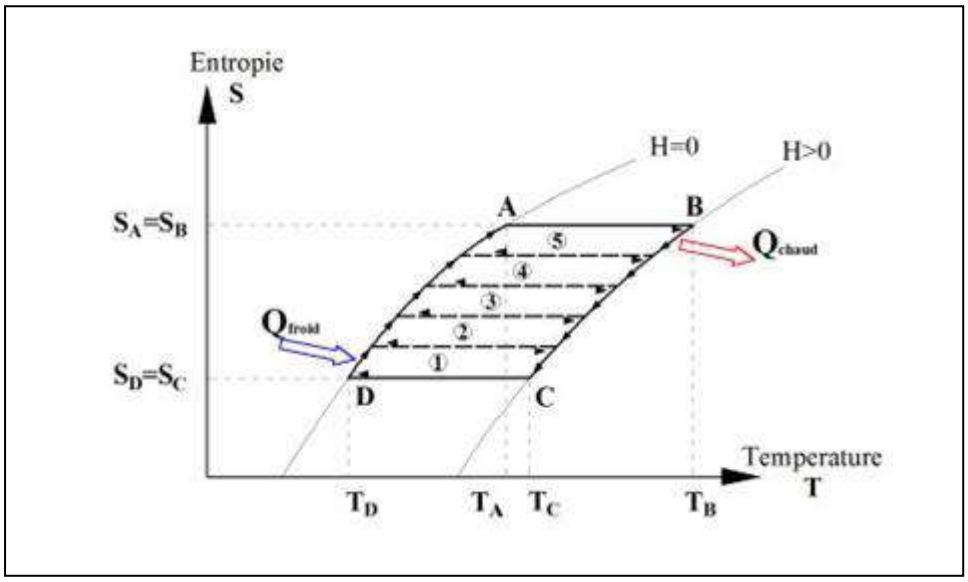



Fig. II.4 : La représentation du cycle magnétique d'AMRR. [12]

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

$$Q_{froide} = \int_D^A T \cdot dS \tag{II.10}$$

Le COP conserve sa forme générale:

$$COP = \frac{Q_{froide}}{W} \tag{II.11}$$

Le comportement d'un régénérateur qui fonctionne d'après un cycle d'AMRR est représenté dans la Figure (II.5). On voit le comportement du régénérateur à gauche et la distribution de la température à droite de la figure.

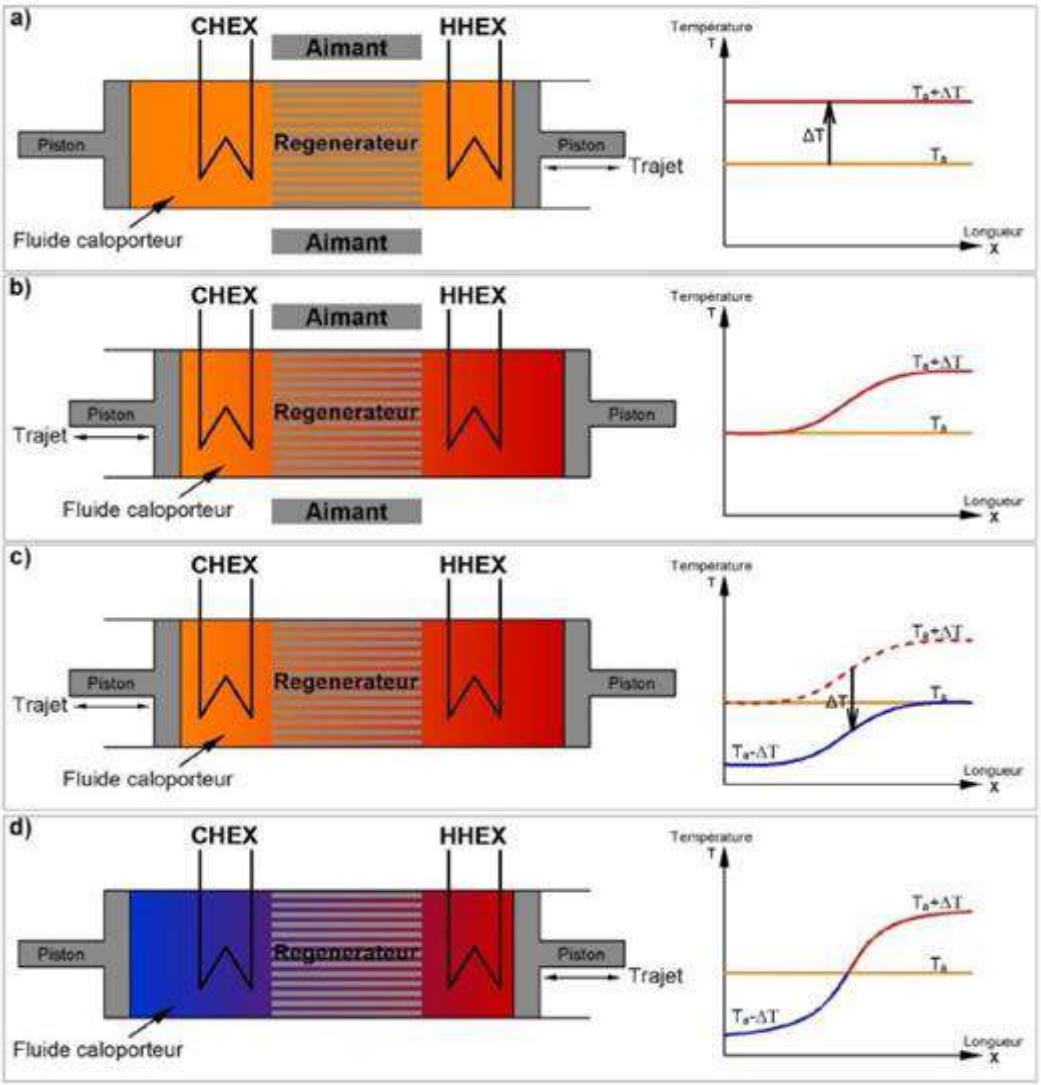



Fig. II.5: Le comportement d'un régénérateur magnétique actif fonctionnant d'après un cycle d'AMRR. [12]

Dans la première partie (a) nous pouvons observer l'aimantation adiabatique du matériau solide (B =$B_{max}$) à partir d'un état initial où tout le système est à température initiale ambiante Ta. Chaque point du régénérateur voit sa température augmenter de ΔT suite à l'application du champ magnétique.

La deuxième étape (b) voit l'écoulement du fluide de la source froide vers la source chaude. Dans cette étape la chaleur de l'aimantation est transportée par le fluide circulant de la source froide à la source chaude et un gradient thermique est créé le long du régénérateur.

Dans la troisième étape (c) le champ magnétique est enlevé (B=0). Chaque point du régénérateur voit sa température baisser de ΔT suite à la désaimantation.

Dans la dernière étape du cycle (d) l'écoulement du fluide a lieu de la source chaude vers la source froide. Le fluide circulant de la source chaude à la source froide cède sa chaleur au régénérateur et sort à température $T_a$-ΔT inférieure à première étape. Le gradient est déjà formé dans le régénérateur et le prochain cycle va amplifier de nouveau le gradient de température. [12]

## II.3. Étude du cycle de brayton

### II.3. 1. Définition

Le cycle théorique de Brayton, encore appelé cycle de Joule, est le cycle de base des installations comportant des Turbines à Combustion (TAC), Il tient son nom de l'ingénieur américain George Brayton (1830–1892) qui l'a développé. [14]

### II.3. 2. Description du cycle de Brayton

Le cycle de Brayton magnétique, qui est le cycle de réfrigération magnétique le plus simple. La Figure **(**II.6) représente le cycle de Brayton magnétique. Ce cycle est composé de quatre étapes principales

- ✓ **Aimantation adiabatique (1→2) :** Le matériau est aimanté et sa température augmente.

- ✓ **Refroidissement isochamp (2→3) :** Le matériau cède de la chaleur à la source chaude (via la circulation d'un fluide caloporteur) et sa température diminue.
- ✓ **Désaimantation adiabatique (3→4).** Le matériau est désaimanté et sa température diminue.
- ✓ **Réchauffement isochamp (4→1).** Le matériau absorbe de la chaleur de la source froide (via la circulation d'un fluide caloporteur) et sa température augmente. [8]

C'est lors de cette phase que la réfrigération proprement dite a lieu. La puissance absorbéedurant cette phase est appelée puissance froide.

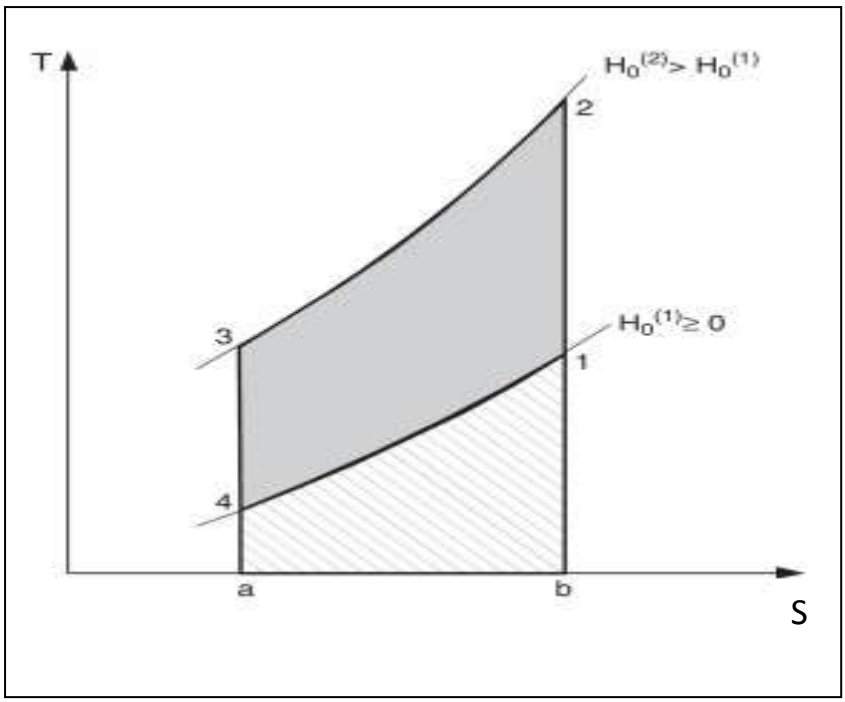



Fig. II.6: La représentation du cycle magnétique de Brayton. [15]

## II.3. 3. Le coefficient de performance du cycle de Brayton

Le travail cyclique du cycle de Brayton est décrit par l'application suivant :

$$\int dw_1 = \mu_0 \int M dH_0 \qquad \int dw_1{}^{(ext)} = \int dw_1{}^{tech} \tag{II.12}$$

$$w_1 = \int dw_1 = \mu_0 \int M dH_0 \tag{II.13}$$

$$w_1 = \mu_0 \int_1^2 MdH_0 + \mu_0 \int_3^4 MdH_0 \quad \text{(II.14)}$$

$$dh_1(s.H_0) = \mu_0 MdH_0 \quad \text{(II.15)}$$

Éq (II.14) suit, du fait que les intégrales analogues des deux processus isochamps (2-3) et (4-1) disparaissent. On remarque que les limites intégrales sont réellement définis par leur états physique, par exemple : $H_0^{(1)}$ et $H_0^{(2)}$, et non simplement par les numéros correspondants entiers 1 et 2, qui ont ici été introduit sous forme d'abréviations .Le processus de magnétisation ou démagnétisation adiabatique a été examiné à la section 9. Dans le cas adiabatique ($d_s$= 0) il résulte de l'équation. (II.15) ce qui suit:

$$\int dh_1 = \mu_0 \int MdH_0 \quad \text{(II.16)}$$

On compare cette équation avec l'équation (II.12), on conclut que le travail est égal à la différence d'enthalpie:

$$\int dw_1 = \int dh_1 \quad \text{(II.17)}$$

Une modification du champ magnétique se produit uniquement dans le processus (1-2) et (3-4). En appliquant Eq (II.18) et (II.14) il suit :

$$(\frac{\partial s}{\partial T})_{H_0}\, dT = -\left(\frac{\partial s}{\partial H_0}\right) dH_0 \quad \text{(II.18)}$$

$$w_1 = \int_1^2 dh_1 + \int_3^4 dh_1 = \left[{h_1}^{(2)} - {h_1}^{(1)}\right] + \left[{h_1}^{(4)} - {h_1}^{(3)}\right] \quad \text{(II.19)}$$

$$\int dw_1 = -\int Tds \quad \text{(II.20)}$$

Dans une autre approche, suivant l'équation (II.20), on obtient:

$$w_1 = -\int_2^3 Tds - \int_4^1 Tds \quad \text{(II.21)}$$

$$ds\ (T, H_0) = (\frac{\partial s}{\partial T})_{H_0} dT + (\frac{\partial s}{\partial H_0}) dH_0 \quad \text{(II.22)}$$

Parce que maintenant l'autre paire d'intégrales, à savoir ceux du processus (1-2) et (3-4) sont égaux à zéro. Les processus (2-3) et (4-1) sont des processus de champ isomagnétique ($d_{H0}$= 0). Le dérivé de l'entropie spécifique Èq (II.22) est:

$$ds = (\frac{\partial s}{\partial T})_{H_0}\ dT \quad \text{(II.23)}$$

$$c_{H_0} = T(\frac{\partial s}{\partial T})_{H_0} \quad \text{(II.24)}$$

On remplace (II.24) et ((II.23)) dans ((II.21)) on obtient:

$$w_1 = -\int_2^3 c_{H_0}\, dT - \int_4^1 c_{H_0}\, dT \quad \text{(II.20)}$$

$$c_{H_0} = T(\frac{\partial s}{\partial T})_{H_0} = (\frac{\partial h_1}{\partial T})_{H_0} \quad \text{(II.21)}$$

Éq (II.21) montre que le travail cyclique peut être aussi décrit par l'enthalpie spécifique:

$$w_1 = -\int_2^3 (\frac{\partial h_1}{\partial T})_{H_0}\, dT - \int_4^1 (\frac{\partial h_1}{\partial T})_{H_0} dT \quad \text{(II.22)}$$

Car la différence d'enthalpie dans un champ isomagnétique est seulement dépendante de la température, il en résulte que:

$$w_1 = \left[{h_1}^{(2)} - {h_1}^{(3)}\right] - [{h_1}^{(1)} - {h_1}^{(4)}]$$

$$= [\ {h_1}^{(2)} - {h_1}^{(1)}] + [{h_1}^{(4)} - {h_1}^{(3)}\ ] \quad \text{(II.23)}$$

En accord avec (II.19).Un critère important pour évaluer les systèmes techniques est le coefficient de performance (COP), qui est dans une application de réfrigération représente le rapport entre $q_c$ de l'énergie de refroidissement à la $w_1$ de travail qui doit être réalisée :

$$\text{COP} = \frac{q_c}{w_1} \tag{II.24}$$

On applique ça à cycle de Brayton, il résulte que:

$$q_c = \int_4^1 Tds \tag{II.25}$$

$$q_r = \int_2^3 Tds \tag{II.26}$$

$$w_1 = -q_r - q_c \tag{II.27}$$

Où (II.27) est une conséquence des Eqs (II.21), (II.25) et (II.26) .Ici $q_r$ décrit la chaleur rejetée par le système ($q_r < 0$).L'application des résultats partiels des Eqs. (II.21)- (II.23), on obtient ces résultats finals:

$$COP_{Brayton} = \frac{[{h_1}^{(1)} - {h_1}^{(4)}]}{\left[{h_1}^{(2)} - {h_1}^{(1)}\right] + [{h_1}^{(4)} - {h_1}^{(3)}]} \tag{II.28}$$

La thermodynamique veut que le meilleur rendement de réfrigération soit obtenu lorsque l'échange de chaleur ne se fait qu'avec deux sources extérieures selon des transformations isothermes, conditions qui sont celles du cycle de Carnot. Le cycle de Brayton, qui ne répond pas à cette règle à un rendement inférieur au rendement du cycle de Carnot. Toutefois, il peut être utilisé comme partie d'un cycle principal sans préjudice pour le rendement global. En effet, sans déroger à la règle thermodynamique, on peut. [16]

## II.4.l'analyse exégétique de la réfrigération magnétique

Le cycle de Brayton magnétique est considéré comme il est décrit précédemment. Pendant le processus de refroidissement isochamp (2-3) ( champ magnétique constant de ( $H_0{}^2 > H_0{}^1$), le réfrigérant magnétique expulse $\mathbf{Q_C}$ de chaleur égale à la surface de 23ab sur la Figure (II.6). Pendant le processus de réchauffement isochamp (4-1) (magnétique constant champ$H_0{}^1 \geq 0$), le réfrigérant magnétique absorbe de la chaleur, $\mathbf{Q_F}$ égale à la surface de 14ab. Non chaleur flux dans et hors de la réfrigérante magnétique la chaleur pendant le processus d'aimantation adiabatique (1-2) et la démagnétisation adiabatique (3-4) processus. Pour développer l'analyse exergétique de ce cycle, il est nécessaire d'évaluer ces domaines, mais la fonction S = S (T; H) doivent être connus.

- la quantité de chaleur dégagée au niveau de sources froide :

$$\mathrm{Q_F} = -\int_4^1 \mathrm{Tds} = \mathrm{aire(14ab)} \qquad \text{(II.29)}$$

- la quantité de chaleur dégagée au niveau de sources chaude :

$$\mathrm{Q_C} = \int_3^2 \mathrm{Tds} = \mathrm{aire(23ab)} \qquad \text{(II.30)}$$

- Ces intégrales peuvent être obtenues en évaluant de façon géométrique les deux domaines suivants :

$$\mathrm{Q_F} = \mathrm{aire(14ab)} = \frac{\mathrm{T_1}+\mathrm{T_4}}{2}(\mathrm{S_1} - \mathrm{S_4}) \qquad \text{(II.31)}$$

$$\mathrm{Q_C} = \mathrm{aire(23ab)} = \frac{\mathrm{T_2}+\mathrm{T_3}}{2}(\mathrm{S_2} - \mathrm{S_3}) \qquad \text{(II.32)}$$

Avec :

$\mathrm{T_{1m}}$ : est la valeur moyenne de la température entre $T_2$ et $T_3$

$\mathrm{T_{0m}}$ : est la valeur moyenne de la température entre $T_1$ et $T_4$.

$(S_2 - S_3) = (S_1 - S_4) = \Delta S$

Donc :

$$Q_F = T_{0m}\Delta S \quad \text{(II.33)}$$

$$Q_C = T_{1m}\Delta s \quad \text{(II.34)}$$

Ensuit :

$$H_0 = \left(1 - \frac{T_a}{T_{0m}}\right) Q_F = \left(1 - \frac{T_a}{T_{0m}}\right) T_{0m}\Delta S \quad \text{(II.35)}$$

$$H_1 = \left(1 - \frac{T_a}{T_{1m}}\right) Q_C = \left(1 - \frac{T_a}{T_{1m}}\right) T_{1m}\Delta S \quad \text{(II.36)}$$

$$W = Q_C - Q_F = T_{1m}\Delta S - T_{0m}\Delta S \quad \text{(II.37)}$$

$$COP = \frac{Q_F}{W} = \frac{T_{0m}}{T_{1m} - T_{0m}} \quad \text{(II.38)}$$

le Rendement exergetique :

$$\eta_{ex} = \frac{H_0}{H_0 + H_1} = \frac{T_{0m} - T_a}{T_{0m} + T_{1m} - 2T_a} \quad \text{(II.39)}$$

## II.5. Un cycle de réfrigération magnétique de Brayton avec régénération :

Il existe trois types de régénérateurs différents: types externes, internes et actifs. Dans cette présentation seulement régénérateurs magnétiques actifs sont considérés, où le matériau magnétocalorique lui-même agit comme un régénérateur.

La figure (II.7) montre un procédé de régénération à plusieurs étages. Ici le rejet par le système de chaleur est représenté par la surface: cd22'. Matériau magnétocalorique est donc refroidi dans un(Constant) de champ magnétique entre 2 et 2'. 2' à 2'' le même matériau magnétocalorique poursuit son chemin dans le champ magnétique. En même temps, la «régénération» aux fluides qui a été refroidi dans le processus 11' passes à travers elle (La première régénération). Ensuite, le matériau magnétocalorique continue à se déplacer à travers le champ magnétique, dans une autre étape, à savoir 2 ''3, où une autre «régénération» de fluide étape 1'1'' passe à travers elle. Après avoir atteint le point 3 du l'échantillon est déplacé hors du champ magnétique (ou une région d'l'intensité de champ magnétique plus faible). En même temps un adiabatique effet de refroidissement se produit. Enfin ab1''4 de surface représente le refroidissement «capacité» de ce processus de régénération. Après ça le matériau magnétocalorique est chauffé et se produit au point 1''.Parce qu'entre 1''1' et 2''3 il y a une régénération en raison de le fluide circulant à travers le matériau magnétocalorique, ce matériau se réchauffe et arrive au point 1'. Le même processus de régénération se produit entre 1'1 et 2''2', Donc finalement le matériau magnétocalorique atteint le point 1 de nouveau. Après ça il est adiabatique magnétisé, et donc la température augmente au point 2. Le travail, qui est effectuée dans ce système est représentée par la surface 1234. [15]

Comme on l'a sans doute devenu évident, dans la régénération systèmes il n'y a pas de chevauchement des «cycles», comme cela est habituellement dans le cas d'un système en cascade. D'un autre côté, il est difficile pour réaliser un système de régénération à plusieurs étages avec différents matériaux magnétocaloriques, parce que chacun d'entre eux doit passer à travers tous les cycles de l'ensemble du système. Le multi régénération processus ne peut pas être aussi flexible que d'une cascade processus, parce que dans ce dernier chaque étape peut être ajustée avec un autre

«débit massique» de fluide frigorigène solide. Les tentatives sont actuellement déployées pour trouver des matériaux hybrides ou multicouche matériaux pour améliorer les systèmes de régénération. [15]

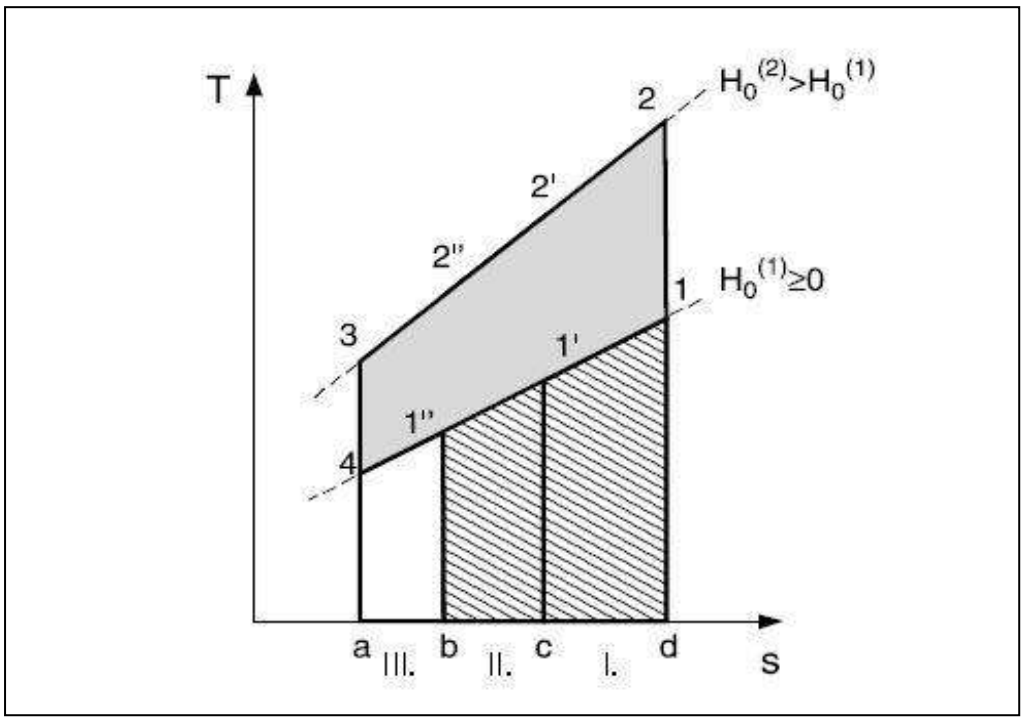



Fig. II.7: Un système de régénération basé sur le cycle de Brayton. [15]

# Chapitre III : Résultats et interprétation

## III.1.Introduction

Dans ce chapitre, nous avons obtenus les courbe (d'évolutions de l'effet magnétocalorique, la chaleur spécifique total, et la variation d'entropie magnétique) en fonction de la température en utilisons la théorie de champ moléculaire sur ces quatre matériaux (Le gadolinium ; l'erbium ; Le dysprosium ; le terbium).Et on obtenue aussi les courbes des alliages terres rares de type $Gd_{1-x}R_x$(R=Tb, Er, Dy).

## III.2. les définitions des matériaux magnétocaloriques

### III.2. 1. Le gadolinium(Gd)

Le gadolinium est un métal de couleur gris-argent faisant partie des terres rares et qui est désigné par le symbole Gd et de numéro atomique 64, il est assez stable dans l'air sec. [17]

### III.2. 2. L'erbium(Er)

L'erbium est un métal des terres rares de symbole Er et de numéro atomique 68 sa couleur est grise L'erbium et aussi malléable et ductile que la plupart des autres lanthanides. Exposé a l'air sec il s'oxyde lentement, plus lentement que d'autre terres rares cet élément est ferromagnétique en dessous de 19K. [18]

### III.2. 3. Le dysprosium(Dy)

Le Dysprosium est un métal des terres rares classé dans le groupe des terres rares lourdes (HREEs) de symbole Dy et de numéro atomique 66. Ce métal lourd gris argenté est à la fois flexible et extensible. Il est très impur et de ce fait très réactif, le Dysprosium possède des propriétés fortement magnétiques. [19]

### III.2. 4. Le terbium (Tb)

Le terbium est un métal d'aspect gris argenté des terres rares, de symbole Tb et de numéro atomique 65. Comme les autres membres de la famille des lanthanides, il est malléable, ductile et assez mou pour être coupé avec un couteau. Il est assez stable dans l'air, et existe sous deux formes allotropiques, avec un changement de phase à 1 289 °C. [20]

## III.3. Les propriétés magnétiques des matériaux magnétiques

Dans un système de réfrigération magnétique, la théorie du champ moléculaire présente une très grande importance.

Dans cette section nous allons appliquer la théorie de champ moléculaire pour l'étude théorique sur du Gd, Er, Dy, Tb (nous allons l'expliquer dans le chapitre 1).

Afin de pouvoir être exploité dans le domaine du refroidissement magnétique, un matériau magnétocalorique doit présenter un certain nombre de propriétés qui sont présenté dans ce Tableau (III .1) au dessous **:**

| | **Gd** | **Er** | **Dy** | **Tb** |
|---|---|---|---|---|
| **$T_C$ (K)** | **293** | **85** | **180** | **220.6** |
| **$T_D$ (K)** | **184** | **192** | **179** | **177** |
| **$g_J$ [.]** | **2** | **1.2** | **1.33** | **1.5** |
| **$J_1$ [.]** | **3.5** | **7.5** | **7.5** | **6** |
| **MM (Kg/mol)** | **0.157** | **0.167** | **0.162** | **0.159** |
| **$K_B$ (J/K)** | **$1.38.10^{-23}$** | **$1.38.10^{-23}$** | **$1.38.10^{-23}$** | **$1.38.10^{-23}$** |
| **$T_0$ (K)** | **10** | **10** | **10** | **10** |
| **$T_F$ (K)** | **400** | **400** | **400** | **400** |
| **B (T)** | **1.5** | **1.5** | **1.5** | **1.5** |

Tableau (III .1) : Les propriétés magnétiques des matériaux magnétiques. [2]

## 1er cas :

Dans le premier cas on applique l'étude théorique de la théorie de champ moléculaire (MTF) (expliquer dans le chapitre 1), l'exemple Gd on obtenue, les courbe d'évolutions de l'effet magnétocalorique, la chaleur spécifique ($Cp_{électronique}$, $Cp_{magnétique}$, $Cp_{réseau}$ et $Cp_{total}$) l'entropie($S_{électronique}$, $S_{magnétique}$, $S_{réseau}$ et $S_{total}$), et la variation d'entropie magnétique ont été étudiée en fonction de la température avec (B=1.5T). Et pour les autres matériaux est ce la même.

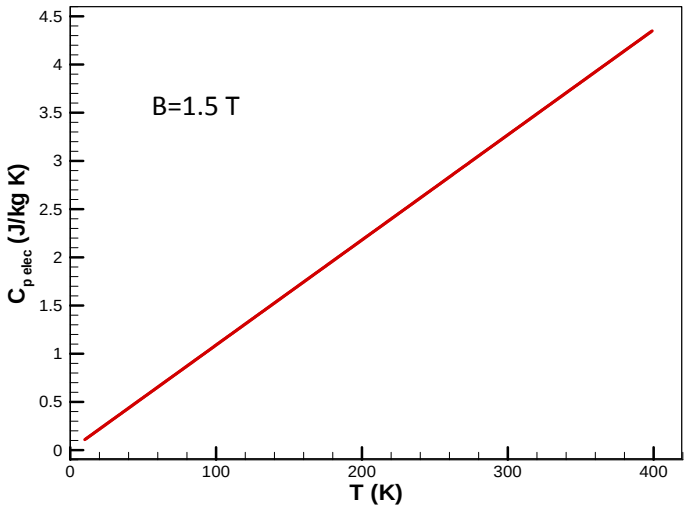



Fig. III.1: Evolution de la chaleur spécifique électronique

La courbe représentée sur la figure (III.1) montre la chaleur spécifique électronique prédites à l'aide de la théorie du champ moléculaire (MTF) décrite dans le premier chapitre pour un matériau magnétocalorique (Gd), en fonction de la température et la valeur de champ magnétique (B=1.5T).Donc on remarque que la courbe est augmente avec l'augmentation de température.

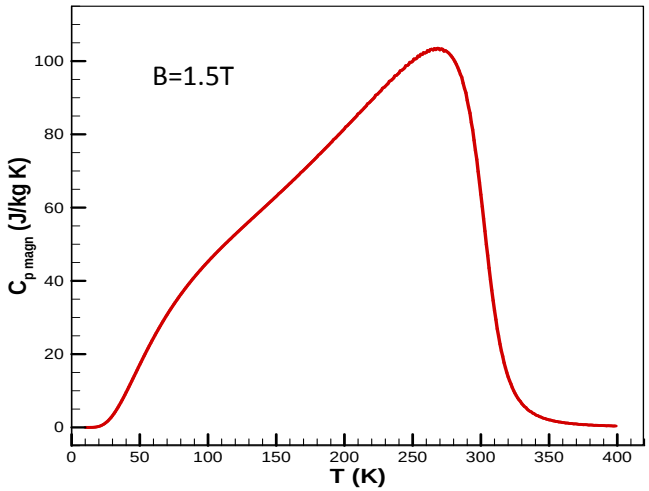



Fig. III.2 : Evolution de la chaleur spécifique magnétique

La courbe représentée sur la figure (III.2) montre la chaleur spécifique magnétique prédites à l'aide de la théorie du champ moléculaire (MTF) décrite dans le premier chapitre pour un matériau magnétocalorique (Gd), en fonction de la température et la valeur de champ magnétique (B=1.5T). Donc en remarque que la courbe $CP_{magnétique}$ est augmente avec l'augmentation de température jusqu'à atteindre son maximum au voisinage de point de curie T=293K et diminue avec l'augmentation de la température afin que $Cp_{magnétique} = 0$ J/Kg.K.

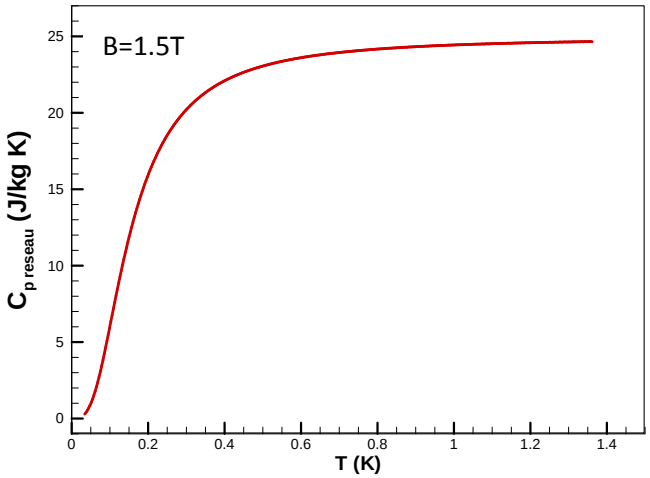



Fig. III.3 : Evolution de la chaleur spécifique du réseau

La courbe représentée sur la figure (III.3) montre la chaleur spécifique du réseau prédit à l'aide de la théorie du champ moléculaire (MTF) décrite dans le premier chapitre pour un matériau magnétocalorique (Gd), en fonction de la température et la valeur de champ magnétique (B=1.5T). Donc en remarque que la courbe $Cp_{Réseau}$ est augmente avec l'augmentation de température puis la courbe est presque stable.

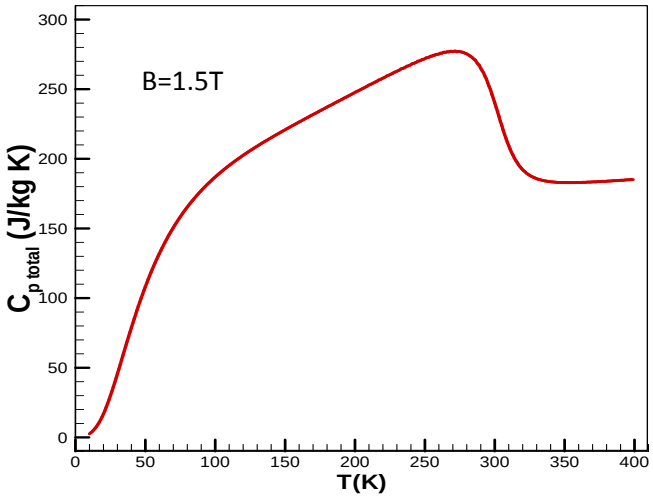



Fig. III.4: Evolution de la chaleur spécifique total

La courbe représentée sur la figure (III.4) montre la chaleur spécifique totale prédite à l'aide de la théorie du champ moléculaire (MTF) décrite dans le premier chapitre pour un matériau magnétocalorique (Gd), en fonction de la température et la valeur de champ magnétique (B=1.5). Donc en remarque que la courbe $Cp_{total}$ est augmente avec l'augmentation de température jusqu'à atteindre son maximum au voisinage de point de curie(T=293K), et diminue avec l'augmentation de la température.

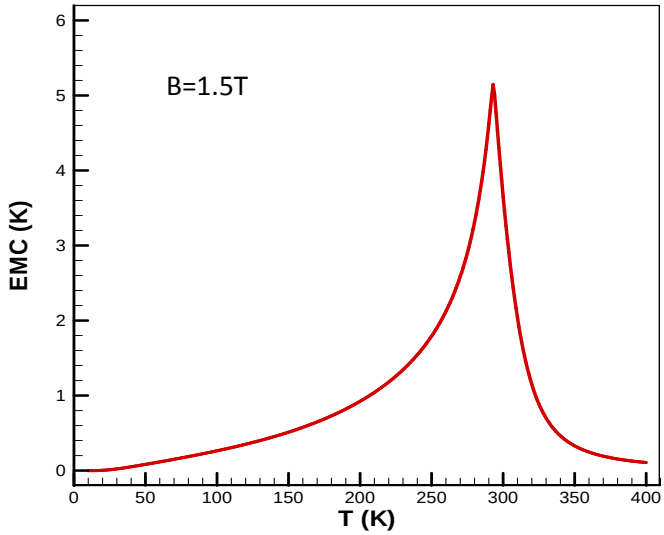



Fig. III.5: Evolution d'effet magnétocalorique.

La courbe représentée sur la figure (III.5) montre la chaleur spécifique magnétique prédites à l'aide de la théorie du champ moléculaire (MTF) décrite dans le premier chapitre pour un matériau magnétocalorique (Gd), en fonction de la température et la valeur de champ magnétique (B=1.5T).Donc en remarque que la courbe EMC est augmente avec l'augmentation de température jusqu'à atteindre son maximum au voisinage de point de curie (T=293K) et diminue avec l'augmentation de la température(EMC=0K).

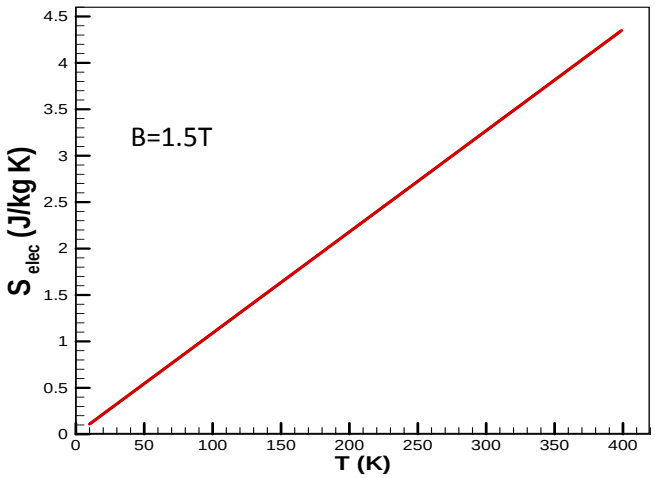



Fig. III.6: Evolution de l'entropie électronique.

La courbe représentée sur la figure III.6 montre l'entropie électronique prédites à l'aide de la théorie du champ moléculaire (MTF) décrite dans le premier chapitre pour un matériau magnétocalorique (Gd), en fonction de la température et la valeur de champ magnétique (B=1.5T).Donc on remarque que la courbe est augmente avec l'augmentation de température.

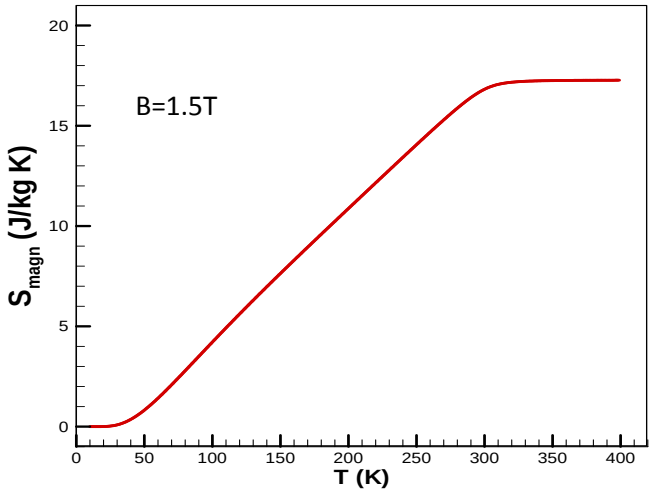



Fig. III.7: Evolution de l'entropie magnétique

La courbe représentées sur la figure **(**III.7) l'entropie magnétique prédites à l'aide de la théorie du champ moléculaire (MTF) décrite dans le premier chapitre pour un matériau magnétocalorique (Gd), en fonction de la température et la valeur de champ magnétique (B=1.5T). Donc en remarque que la courbe est augmente avec l'augmentation de température jusqu'à atteindre son maximum au point de curie avec T=293 K et a la fin la courbe est stable au point de $S_{magnétique}$ = 17J/Kg.K

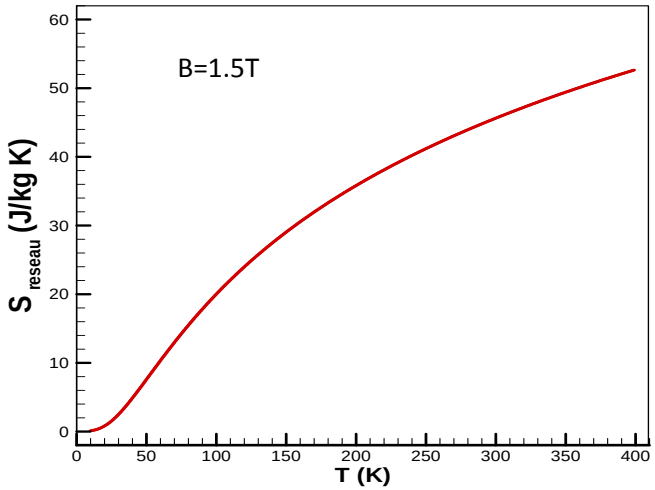



Fig. III.8: Evolution de l'entropie du réseau

La courbe représentée sur la figure (III.8) montre l'entropie du réseau prédites à l'aide de la théorie du champ moléculaire (MTF) décrite dans le premier chapitre pour un matériau magnétocalorique (Gd), en fonction de la température et la valeur de champ magnétique (B=1.5T). Donc en remarque que la courbe $S_{Réseau}$ est augmente avec l'augmentation de température.

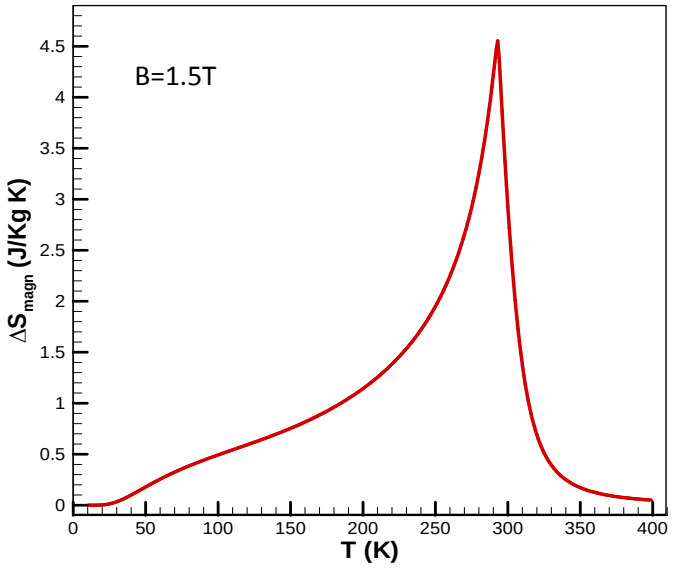



Fig. III. 9: La variation de l'entropie magnétique

La courbe représentée sur la figure III. 9 montres la variation de l'entropie magnétique prédite à l'aide de la théorie du champ moléculaire (MTF) décrite dans le premier chapitre pour un matériau magnétocalorique (Gd), en fonction de la température et la valeur de champ magnétique (B=1.5T). Donc en remarque que la courbe est augmente avec l'augmentation de température jusqu'à atteindre son maximum au voisinage de point de curie(T=293K, $\Delta S_{magnétique}$=4.5J/Kg.K).En suite elle diminuée avec l'augmentation de la température.

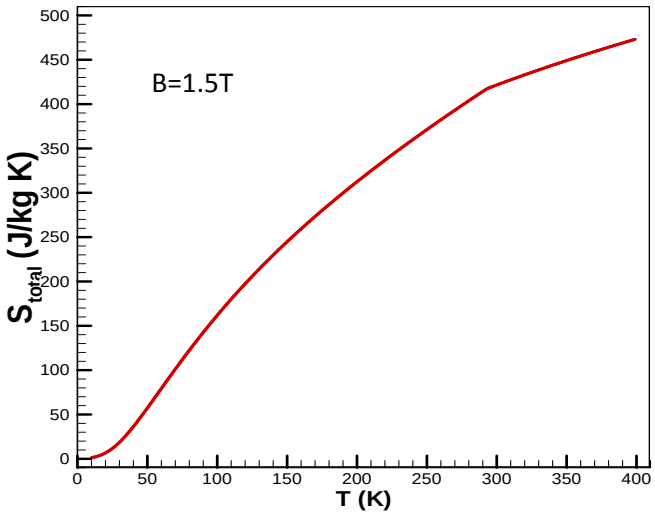



Fig. III.10: Evolution de l'entropie total

La courbe représentée sur la figure **(**III.10) montre l'entropie totale prédites à l'aide de la théorie du champ moléculaire (MTF) décrite dans le premier chapitre pour un matériau magnétocalorique (Gd), en fonction de la température et la valeur de champ magnétique (B=1.5T). Donc en remarque que la courbe $S_{total}$ est augmente avec l'augmentation de température.

## 2eme cas :

Dans le dexiéme cas on appliquons l'étude théorique du théorie de champ moléculaire (MTF) (expliquer dans le chapitre 1), l'exemple Gd on obtenons, les courbe de la chaleur spécifique ($Cp_{magn}$ , $Cp_{total}$) et l'entropie ($S_{magn}$ et $S_{total}$), ont été étudiée en fonction de la température avec (B=0 ;1.5T). Et pour les autres matériaux est ce la même**.**

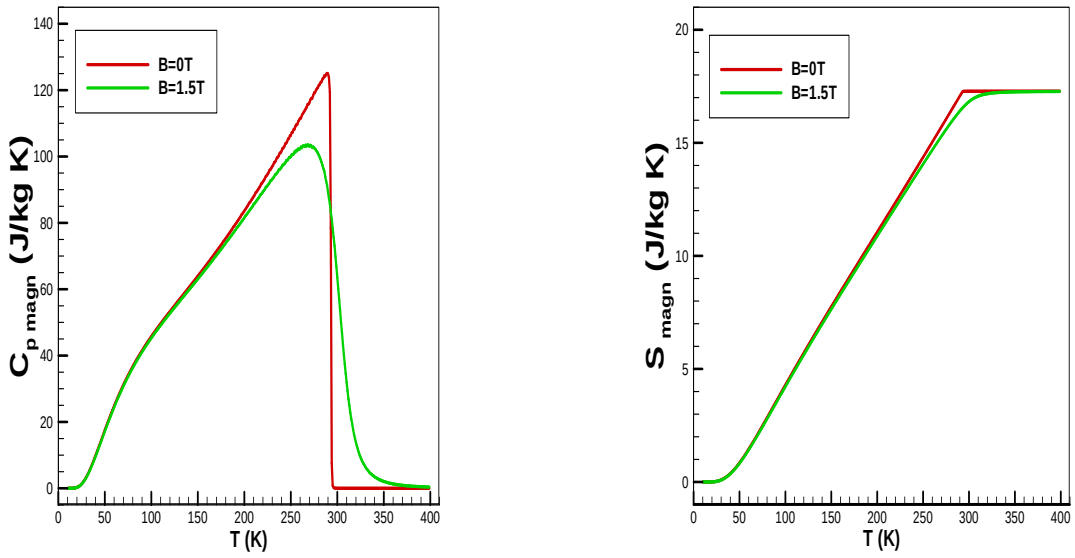



Fig. III.11: Evolution de la chaleur spécifique magnétique et l'entropie Magnétique.

La figure (III.11) présente l'évolution de la chaleur spécifique magnétique et l'entropie magnétique.de (Gd) en fonction de température. Sachant que la valeur de B= (0 ; 1.5) (B : champ magnétique). On constate que la valeur de ($Cp_{mag}$ ) augmente jusqu'à le point de curie avec la valeur de $Cp_{mag}$ (B=0)> $Cp_{mag}$ (B=1.5) et quand la température dépasse le point de curie, le ($Cp_{mag}$) de (Gd) diminué jusqu'à 0 . Et dans la 2éme courbe sachant que la valeur de B= (0 ; 1.5) en remarque que la courbe $S_{mag}$ est augmente avec l'augmentation de la température jusqu'à atteindre son maximum au point de curie avec T=293 K et a la fin la courbe est stable.

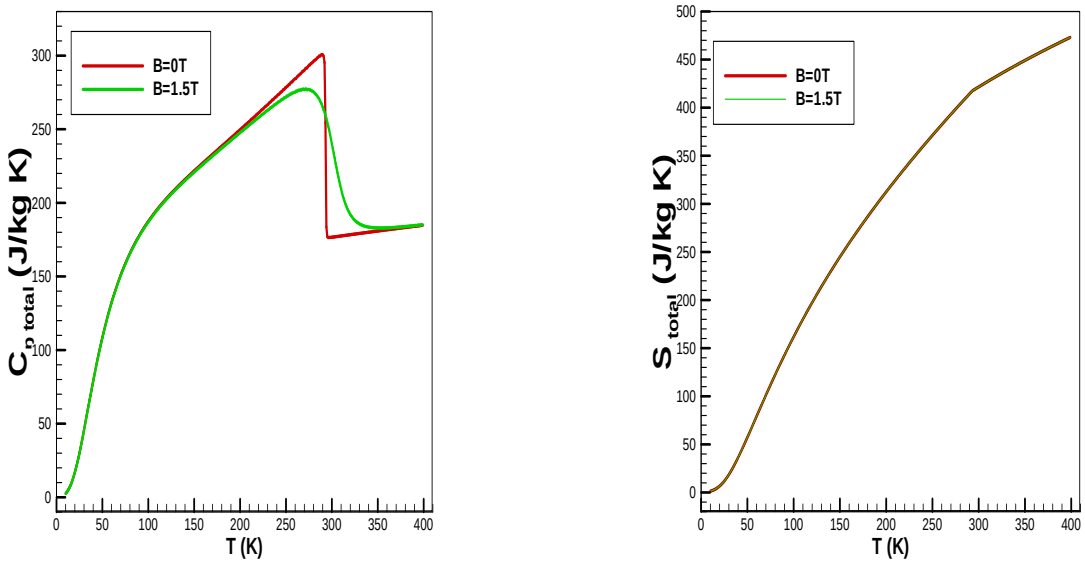



Fig. III.12: Evolution de la chaleur spécifique total et l'entropie total.

La figure (III.12) présente l'évolution de la chaleur spécifique totale et l'entropie total.de (Gd) en fonction de température. Sachant que la valeur de B= (0 ; 1.5) (B : champ magnétique). On constate que la valeur de ($Cp_{total}$) augmente jusqu'à le point de curie avec la valeur de $Cp_{total}$ (B=0)> $Cp_{total}$ (B=1.5) après le $Cp_{total}$ diminué avec l'augmentation de la température. Et dans la 2$^{éme}$ courbe sachant que la valeur de B=(0 ;1.5) en remarque que la courbe $S_{total}$ augmente avec l'augmentation de la température .

## 3eme cas :

Dans le troisiéme cas on appliquons l'étude théorique du théorie de champ moléculaire (MTF) (expliquer dans le chapitre 1), l'exemple Gd, Er, Dy, Tb on obtenons, les courbe d'évolutions de l'effet magnétocalorique , la chaleur spécifique total($Cp_{total}$) l'entropie total($S_{total}$), et la variation d'entropie magnétique ont été étudiée en fonction de la température.

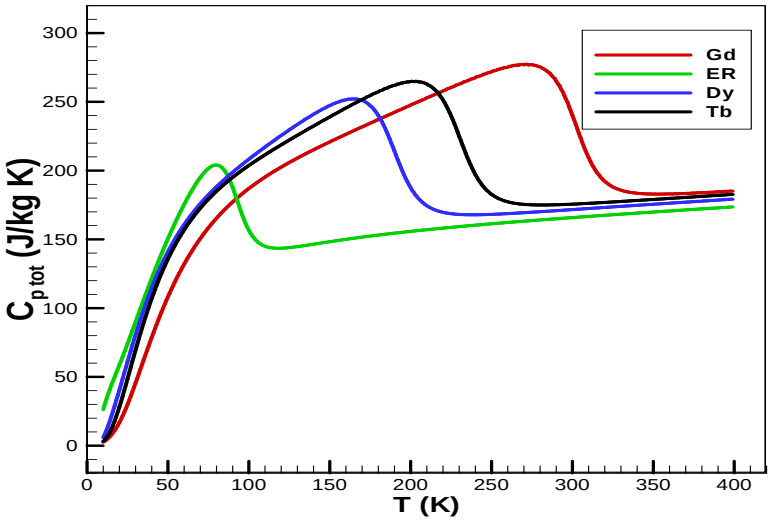



Fig. III.13: Evolution de la chaleur spécifique total (Gd-Er-Dy-Tb).

La figure (III.13) présente l'évolution de la chaleur spécifique totale de ces matériaux (Gd-Er-Dy-Tb) en fonction de température. Sachant que la valeur de B=1,5T (B : champ magnétique).

On constate que la valeur de ($Cp_{total}$) des quatre matériaux augmente jusqu'à le point de curie et quand la température dépasse le point de curie, le ($Cp_{total}$) des (Gd-Er-Dy-Tb) diminué .mais le Gd est le meilleure par rapport a les autre matériaux.

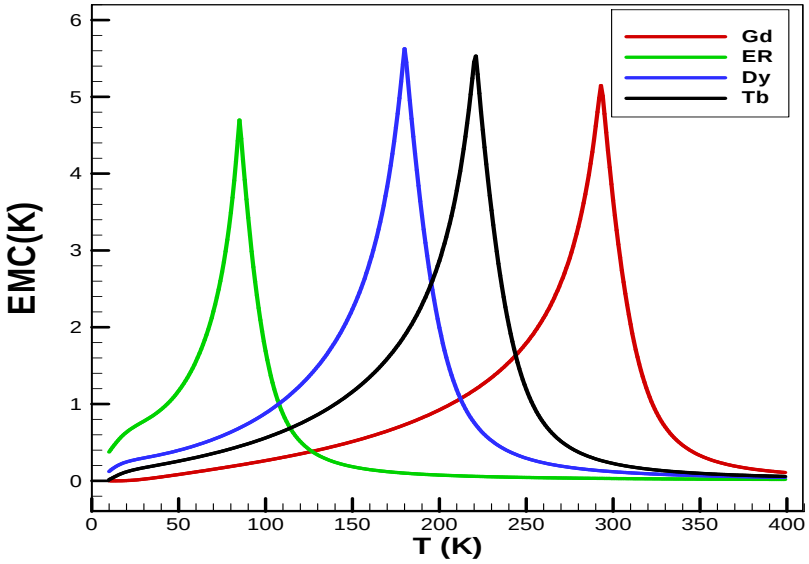



Fig. III.14: Variation de l'effet magnétocalorique (Gd-Er-Dy-Tb) .

La figure (III.14) présente la variation de l'effet magnétocalorique de ces matériaux (Gd-Er-Dy-Tb) en fonction de température. Sachant que la valeur de B=1,5(B : champ magnétique).

On remarque que nous avons obtenu plusieurs point d'intersection entre les courbes des quatre matériaux, on constate aussi que la valeur de EMC de ces matériaux augmente jusqu'à le point de curie et quand la température dépasse le point de curie, le EMC des (Gd-Er-Dy-Tb) diminué.

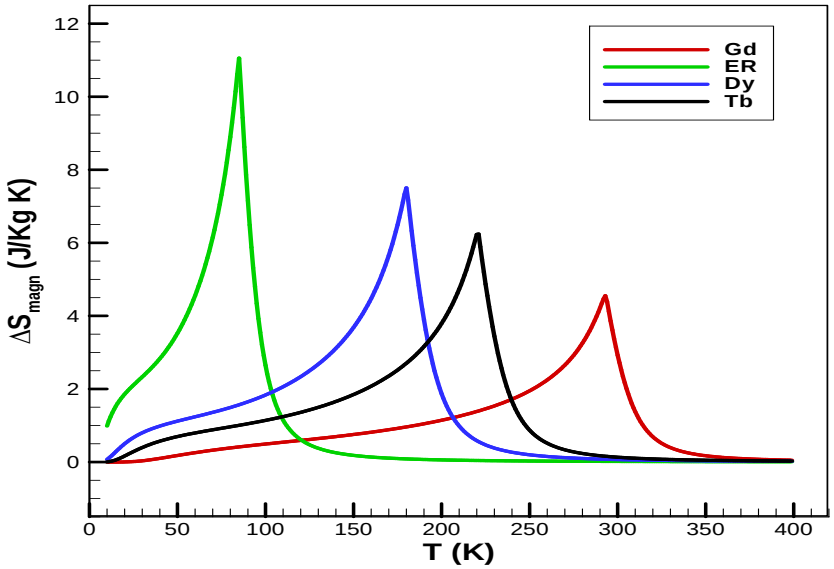



Fig. III. 15 : La variation de l'entropie magnétique (Gd-Er-Dy-Tb)

La figure (III. 15) présente la variation de l'entropie magnétique de ces matériaux (Gd-Er-Dy-Tb) en fonction de température. Sachant que la valeur de B=1,5(B : champ magnétique).

On remarque que nous avons obtenues plusieurs point d'intersection entre les courbes des quatre matériaux, on constate aussi que la valeur de $\Delta S_{mag}$de ces matériaux augmente jusqu'à le point de curie et quand la température dépasse le point de curie, le $\Delta S_{mag}$ des (Gd-Er-Dy-Tb) diminué.

## III.4. les alliages terres rares

Les autres éléments de terres rares (Tb, Dy, Er…) ne sont pas directement à notre application, puisque leurs températures de transition ($T_N$ : température de Néel dans la majorité des cas) sont très basses .cependant, on peut envisager des alliages terres rares de type $Gd_{1-x}\,R_x$(R=Tb, Er, Dy) .Cela permettrait le contrôle de la température de transition et donc une utilisation optimale des performances magnétocaloriques pour une gamme de température voulue. [6]

Le modèle développé semble répondre à ce type d'optimisation, reste à identifier ses paramètres ($J_1$, $g_{J,\,TC}$).pour ce faire, nous avons utilisé les propriétés des alliages binaires. Considérant un alliage Gd1-x Rx dont x est la concentration de R dans l'alliage, alors on peut écrire les relations suivantes :

$$G_{Gd_{1-x}R_x} = (1-x)G_{Gd} + x\,G_R \qquad \text{(III.1)}$$

$$\mu^2{}_{Gd_{1-x}R_x} = (1-x)\mu^2{}_{Gd} + x\,\mu^2{}_R \qquad \text{(III.2)}$$

Tel que :

$$\mu = g_J\sqrt{J(J+1)} \qquad \text{(III.3)}$$

$$G = (g_J\text{-}1)^2\,J\,(J+1) \qquad \text{(III.4)}$$

La température de Curie obéit à la loi :

$$T_C = 46G^{2/3} \qquad \text{(III.5)}$$

Le facteur de lande $g_{JGd-R}$ et le moment cinétique total $J_{Gd-R}$ de l'alliage sont donnes par :

$$g_{JGd_{1-x}R_x} = \frac{\mu_{Gd_{1-x}R_x}}{\mu_{Gd_{1-x}R_x} - \sqrt{G_{Gd_{1-x}R_x}}} \qquad \text{(III.6)}$$

$$J_{Gd_{1-x}R_x} = \frac{1}{2}\left(\sqrt{1+\left(\frac{2.\mu_{Gd_{1-x}R_x}}{g_{JGd_{1-x}R_x}}\right)^2} - 1\right) \qquad \text{(III.7)}$$

| | G | $T_C$ (K) | $T_D$ (K) | M (Kg/mol) | μ | $g_J$ [-] | $J_1$ [-] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $Gd_{0.9}Tb_{0.1}$ | 15,23 | 282,57 | 183,3 | 0,1572 | 8,13 | 1,92 | 3,76 |
| $Gd_{0.8}Tb_{0.2}$ | 14,70 | 276,04 | 182,6 | 0,1574 | 8,32 | 1,85 | 4,02 |
| $Gd_{0.7}Tb_{0.3}$ | 14,18 | 269,43 | 181,9 | 0,1576 | 8,51 | 1,79 | 4,27 |
| $Gd_{0.6}Tb_{0.4}$ | 13,65 | 262,73 | 181,2 | 0,1578 | 8,69 | 1,74 | 4,53 |
| $Gd_{0.5}Tb_{0.5}$ | 13,13 | 255,95 | 180,5 | 0,158 | 8,87 | 1,69 | 4,78 |
| $Gd_{0.9}Er_{0.1}$ | 14,43 | 272,65 | 184,8 | 0,158 | 8,12 | 1,88 | 3,85 |
| $Gd_{0.8}Er_{0.2}$ | 13,11 | 255,76 | 185,6 | 0,159 | 8,29 | 1,78 | 4,20 |
| $Gd_{0.7}Er_{0.3}$ | 11,79 | 238,29 | 186,4 | 0,16 | 8,46 | 1,68 | 4,56 |
| $Gd_{0.6}Er_{0.4}$ | 10,47 | 220,15 | 187,2 | 0,161 | 8,63 | 1,60 | 4,92 |
| $Gd_{0.5}Er_{0.5}$ | 9,15 | 201,24 | 188 | 0,162 | 8,80 | 1,52 | 5,29 |
| $Gd_{0.9}Dy_{0.1}$ | 14,87 | 278,15 | 183,5 | 0,1575 | 8,24 | 1,88 | 3,92 |
| $Gd_{0.8}Dy_{0.2}$ | 13,99 | 267,06 | 183 | 0,158 | 8,54 | 1,78 | 4,33 |
| $Gd_{0.7}Dy_{0.3}$ | 13,11 | 255,73 | 182,5 | 0,1585 | 8,83 | 1,70 | 4,73 |
| $Gd_{0.6}Dy_{0.4}$ | 12,23 | 244,14 | 182 | 0,159 | 9,11 | 1,62 | 5,13 |
| $Gd_{0.5}Dy_{0.5}$ | 11,35 | 232,27 | 181,5 | 0,1595 | 9,37 | 1,56 | 5,53 |
| $Gd_{0.3}Er_{0.7}$ | 6,60 | 161,86 | 189,6 | 0,164 | 9,30 | 1,38 | 6,25 |
| $Gd_{0.3}Tb_{0.7}$ | 12,08 | 242,11 | 179,1 | 0,1584 | 9,22 | 1,60 | 5,27 |
| $Gd_{0.3}Dy_{0.7}$ | 9,58 | 207,56 | 180,5 | 0,1605 | 9,89 | 1,46 | 6,31 |

Tableau .III .2 : Paramètres caractéristiques des alliages métalliques

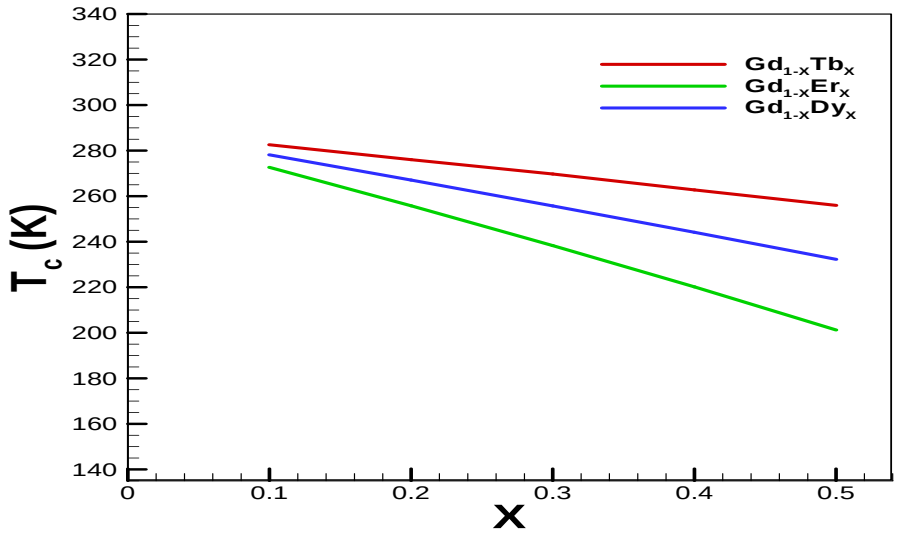



Fig. III. 16 : température de curie TC en fonction de la concentration x pour différents alliages

La figure (III.16) présente la température de curie $T_C$ en fonction de la concentration x pour différents alliages, avec(x=0.1, 0.2….0.5).On remarque que la température des alliages $Gd_{1-x}$ R $_x$(R=Tb, Er, Dy) diminué avec l'augmentation de la concentration.

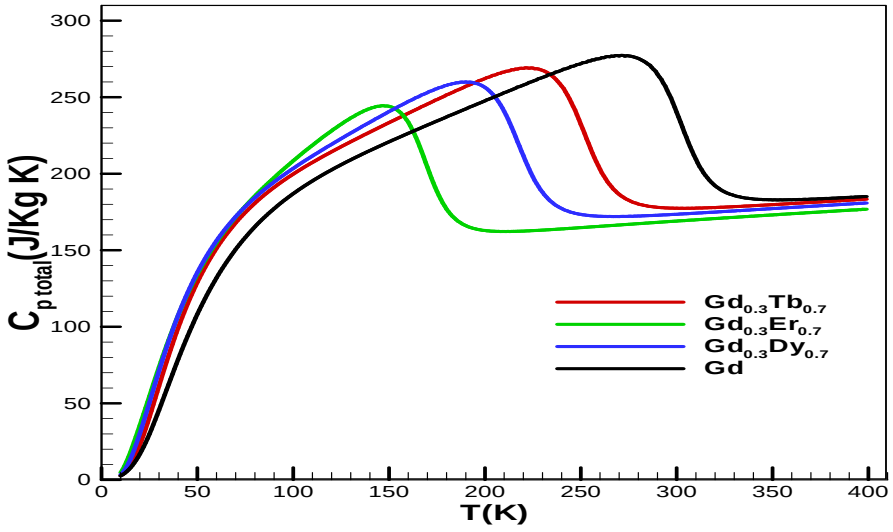



Fig. III. 17 : Evolution de la chaleur spécifique total en fonction de la température pour différentes compositions

La figure (III.17) présente évolution de la chaleur spécifique totale en fonction de la température pour différentes compositions. On constate que la valeur de ($Cp_{total}$) des alliages $Gd_{0.3}R_{0.7}$(R=Tb, Er, Dy) augmente jusqu'à le point de curie et quand la température dépasse le point de curie , le ($Cp_{total}$) des alliages diminué .

Mais le $Cp_{total}$ de Gd est la meilleure par rapport à les alliages.

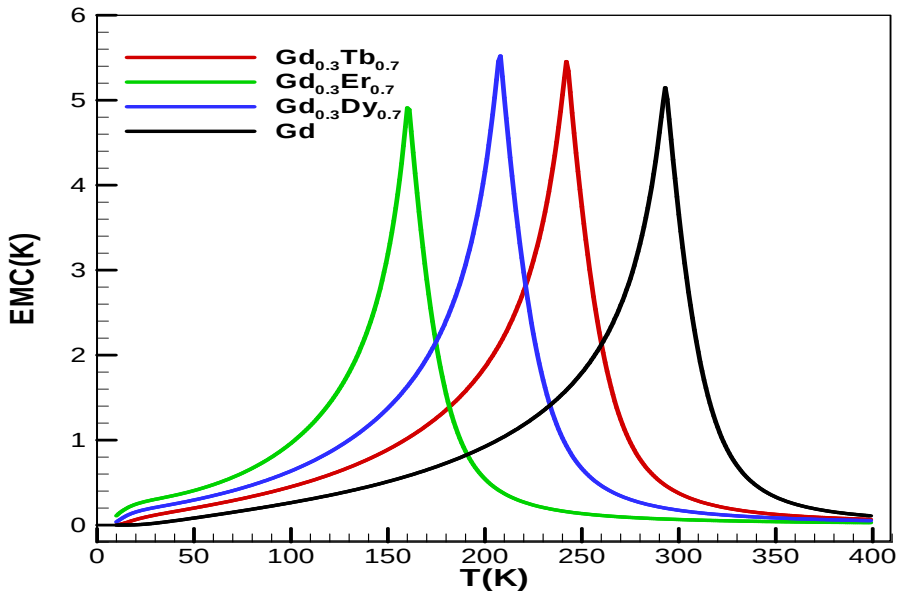



Fig. III. 18: Evolution de la Variation de l'effet magnétocalorique en fonction de la température pour différentes compositions.

La figure (III.18) présente l'évolution de la Variation de l'effet magnétocalorique en fonction de la température pour différentes compositions.

On remarque que nous avons obtenu plusieurs point d'intersection entre les courbes des quatre matériaux, on constate aussi que la valeur de EMC de ces matériaux augmente jusqu'à le point de curie et quand la température dépasse le point de curie, le EMC des alliages diminué.

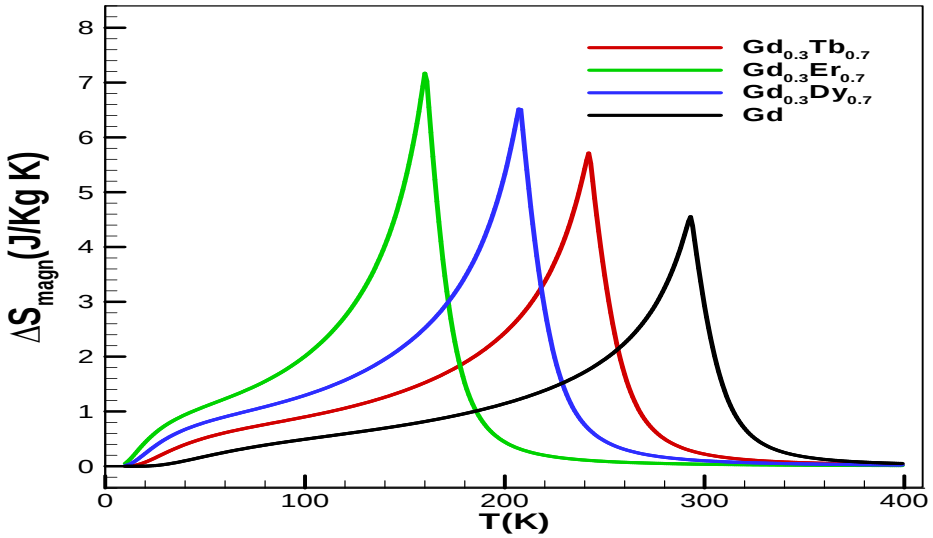



Fig. III. 19 : La variation de l'entropie magnétique en fonction de la température pour différentes compositions.

La figure (III. 19) présente La variation de l'entropie magnétique en fonction de la température pour différentes compositions.

On remarque que nous avons obtenues plusieurs point d'intersection entre les courbes des quatre matériaux, on constate aussi que la valeur de $\Delta S_{mag}$de ces matériaux augmente jusqu'à le point de curie et quand la température dépasse le point de curie, le $\Delta S_{mag}$ des alliages diminué.

## III.5.Etude du cycle réfrigération magnétique de Brayton

### 1er cas :

Dans le premier cas on applique étude le cycle réfrigération magnétique de Brayton, l'exemple Gd on obtient, les courbe de variation de la quantité de chaleur dégagée au niveau de source froide, et le courbe de coefficient de performance en fonction de température.

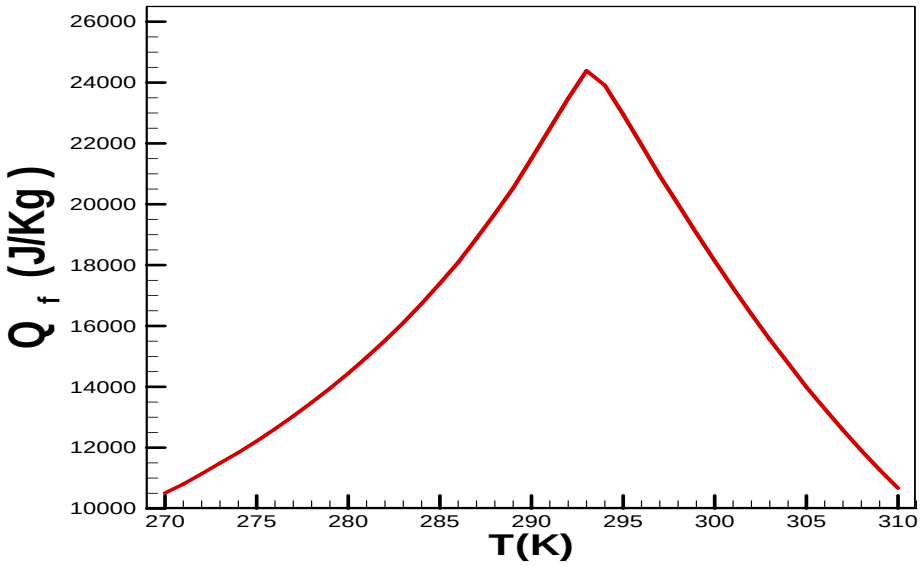



Fig. III.20 : Variation de la quantité de chaleur dégagée au niveau de source froide en fonction de température.

La figure (III. 20) présente La variation de la quantité de chaleur dégagée au niveau de source froide en fonction de température.

On remarque, que la valeur de $Q_f$ de ce matériau(Gd) augmente jusqu'à le point de curie et quand la température dépasse le point de curie, le $Q_f$ de Gd diminué.

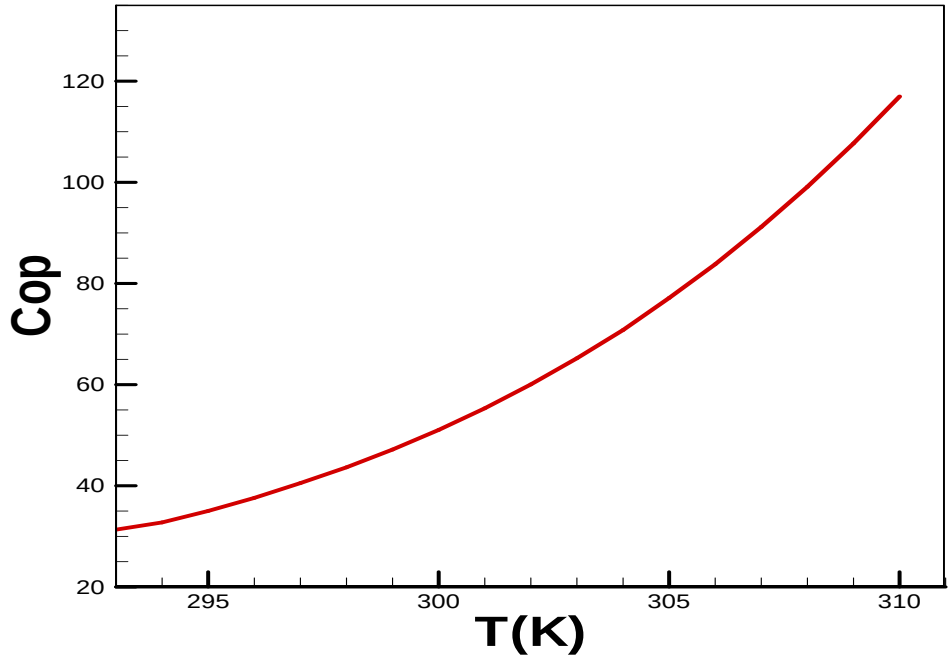



Fig. III.21 : Evolution de coefficient de performance en fonction de la température.

La figure(III.21), présente l'évolution de coefficient de performance du COP en fonction de la température de matériau(Gd), on remarque que la courbe de COP est augmentée avec l'augmentation de température.

## 2eme cas :

Dans le dexiéme cas on étude le cycle réfrigération magnétique de Brayton, l'exemple (Gd, Er, Dy, Tb) on obtient, les courbe de variation de la quantité de chaleur dégagée au niveau de source froide, et le courbe de coefficient de performance en fonction de température.

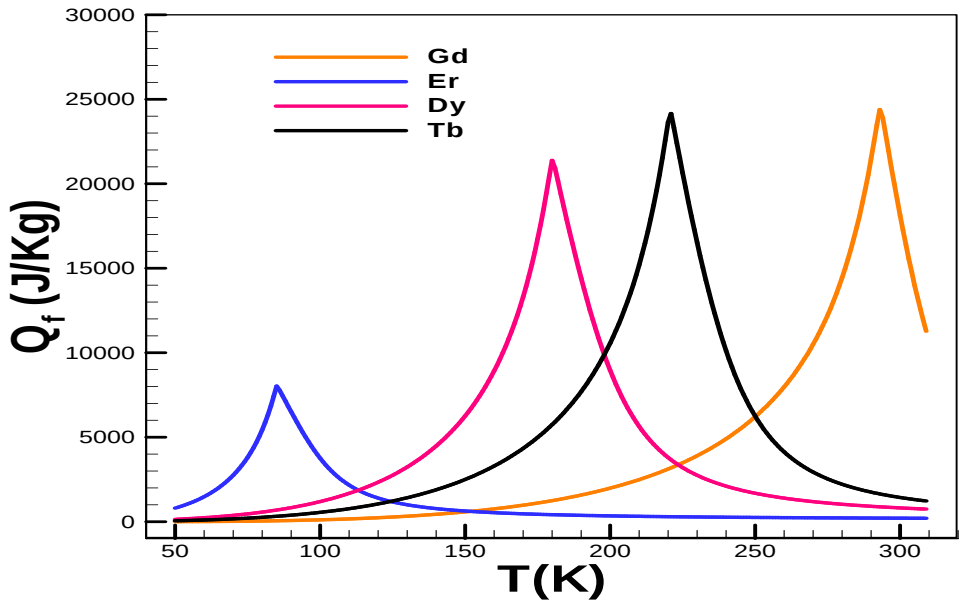



Fig. III.22 : Variation de la quantité de chaleur dégagée au niveau de source froide en fonction de température.

La figure (III. 22) présente La variation de la quantité de chaleur dégagée au niveau de source froide en fonction de température.

On remarque, que nous avons obtenu plusieurs point d'intersection entre les courbes des quatre matériaux, et la valeur de $Q_f$ de ces matériau (Gd, Er, Tb, Dy) augmente jusqu'à le point de curie et quand la température dépasse le point de curie, le $Q_f$ de Gd diminué.

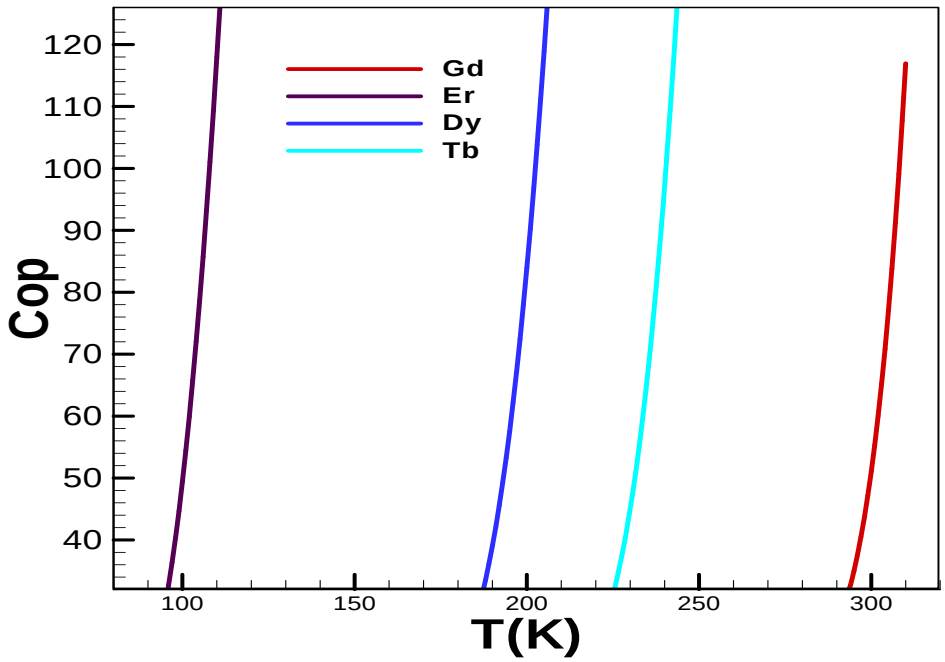



Fig. III.23 : Evolution de coefficient de performance en fonction de la température.

La figure(III.23), présente l'évolution de coefficient de performance du COP en fonction de la température des matériaux (Gd, Dy, Er, Tb), on remarque que les courbes de COP sont augmentées avec l'augmentation de température mais le cop de Gd est plus petit par apport au cop des autres matériaux.

## 3eme cas :

Dans le troisiéme cas on étude le cycle réfrigération magnétique de Brayton, l'exemple des alliages $Gd_{1-x}R_x$(R=Tb, Er, Dy) on obtient, les courbe de variation de la quantité de chaleur dégagée au niveau de source froide, et le courbe de coefficient de performance en fonction de température.

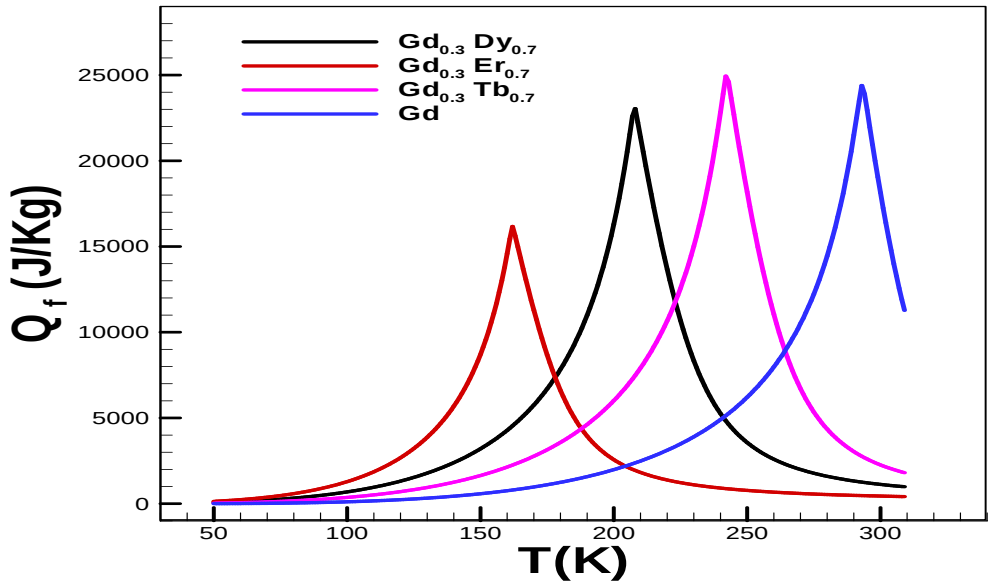



Fig. III.24 : Variation de la quantité de chaleur dégagée au niveau de source froide en fonction de température.

La figure (III. 24) présente La variation de la quantité de chaleur dégagée au niveau de source froide en fonction de température.

On remarque, que nous avons obtenu plusieurs point d'intersection entre les courbes, et la valeur de $Q_f$ de ce matériau (Gd) avec les alliages $Gd_{1-x}R_x$(R=Tb, Er, Dy) augmente jusqu'à le point de curie et quand la température dépasse le point de curie, le $Q_f$ diminué.

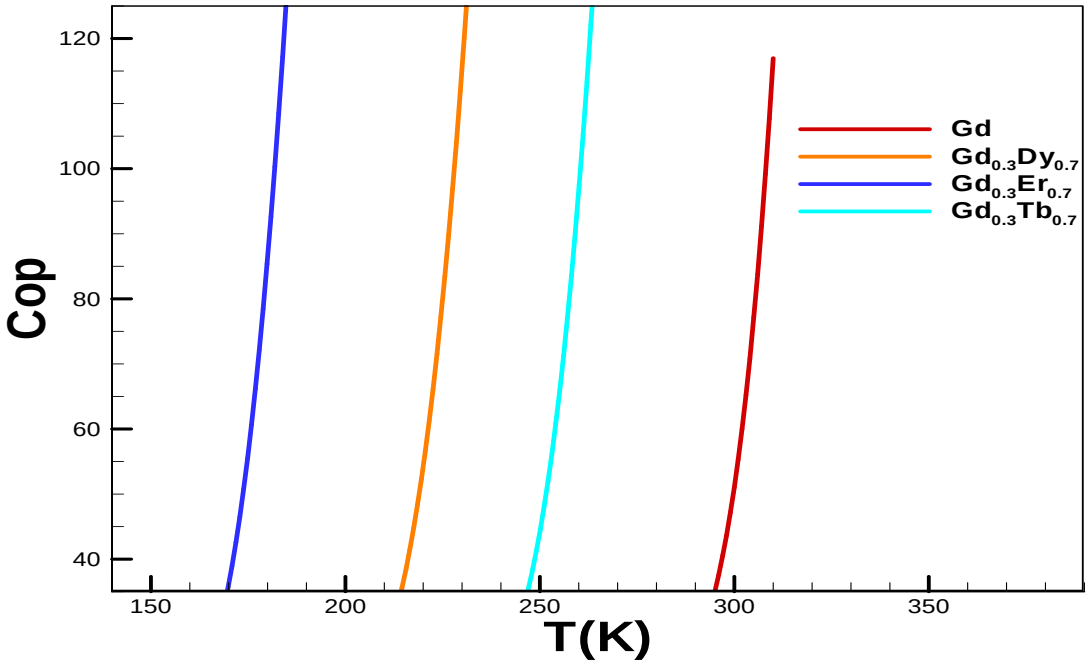



Fig. III.25 : Evolution de coefficient de performance en fonction de la température.

La figure(III.25), présente l'évolution de coefficient de performance du COP en fonction de la température de matériau (Gd) avec les alliages $Gd_{1-x}R_x$(R=Tb, Er, Dy), on remarque que les courbes de COP sont augmentées beaucoup plus avec l'augmentation de la température quand on ajoutons les alliage.

# Conclusion Générale

# Conclusion Générale

L’étude réalisée dans ce travail de Master traite le cycle de réfrigération magnétique de Brayton utilisés en réfrigération magnétique. Ces travaux constituent une contribution à l'étude de la modélisation thermique et électromagnétique des systèmes de réfrigération magnétique. La technologie de la réfrigération magnétique présentée dans ce manuscrit constitue une alternative prometteuse à la technologie de production de froid à condition de faire sauter certains verrous scientifiques et technologiques qui entravent son essor, notamment dans le domaine des matériaux. La réfrigération magnétique permet en effet d’envisager la réalisation de systèmes compacts à haute efficacité énergétique et qui préservent l’environnement.

Le travail effectué dans le cadre de projet de fin d’étude a porté tout d’abord sur une étude de l'effet magnétocalorique (EMC), matériaux magnétocaloriques et les cycles thermodynamiques en RM, principalement le cycle de Brayton. Une étude expérimentale a été menée afin de déterminer les propriétés des matériaux magnétocaloriques montre que L'EMC décroît rapidement lorsque la température du matériau magnétique s'éloigne de sa température de transition. Pour finir la thèse nous avons calculé l’effet magnétocalorique dans les matériaux Gadolinium Dysprosium Erbium Terbium, et nous avons utilisé l’approximation du champ moléculaire de Weiss. Pour déterminer les paramètres nécessaires pour les calculs comme le facteur de Landé, le moment angulaire total ou la température de Curie des matériaux (Gd, Dy, Er, Tb).

Concernant les matériaux magnétocaloriques, une proposition de recherche peut être portée sur une étude approfondie des matériaux magnétocaloriques. On estime qu'à ce niveau le progrès de la recherche fondamentale sera le plus important, car il y a un vrais essor dans cette direction. Il s'agit d'une part de la mise au point des nouveaux alliages avec une température de Curie autour de la température ambiante pour un large domaine de variation entre la source chaude et la source froide. Une analyse de sensibilité des paramètres, adaptée aux matériaux magnétocalorique peut être utile lorsque l’étude prend en compte une utilisation de plusieurs matériaux magnétocaloriques différentes. Cette analyse peut s’étendre aussi sur des matrices des plusieurs matériaux magnétocaloriques disposés en fonction de températures de Curie pour maximiser l’écart de température obtenu. Donc conclue dans ce projet que les

alliages donnent un meilleur résultat de la quantité de chaleur dégagée au niveau de source froide et le meilleur coefficient de performance.

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 mémoire 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.

# Bibliographiques

## Bibliographie :

[1] Charlotte MAYER, Nouveaux matériaux magnétocaloriques pour la réfrigération magnétique, Thèse de doctorat. L'université bordeaux 1, (2011).

[2] Houssem Rafik El-Hana Bouchekara, les Systèmes de Réfrigération Magnétique, Modélisation Numérique, .Thèse de doctorat. Laboratoire de génie électrique de Grenoble G2Elab, (2008).

[3] Mohamed BALLI, Etude structurale et magnétique en vue de la mise en œuvre de nouveaux matériaux à effet magnétocalorique géant, Thèse de doctorat. L'université Joseph Fourier – Grenoble I, (2007).

[4] Quentin Recour, Étude des propriétés structurales, magnétiques et magnétocaloriques de Mn3Sn2 et ses dérivés, Thèse de doctorat de l'Université de Lorraine. Spécialité de Chimie (2012).

[5] Barclay, J. A. (1983). Wheel-type magnetic refrigerator. U.S. Patent No.

[6] Allab, F, Etude et conception d'un dispositif de réfrigération magnétique basé sur l'effet magnétocalorique géant, Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble INP, G2elab. (2008).

[7] Younes CHIBA, Contribution á l'étude d'un réfrigérateur á régénération magnétique active opérant près de la température ambiante : considérations thermo fluides, Thèse de DOCTORAT. ENP Alger (2015).

[8] François Guillou. Différents matériaux à effet magnétocalorique : Aspects fondamentaux et applicatifs. Science des matériaux [cond-mat.mtrl-sci]. Université de Caen, (2011).

[9] F. Shir, C. Mavriplis, L. H. Bennett, and E. D. Torre, International Journal of Réfrigération 28, 616 (2005).

[10] Cédric Dupuis. Matériaux _a effet magnétocalorique géant et systèmes de réfrigération Magnétique. Sciences de l'ingénieur [physics]. Université de Grenoble, 2009. Français.

## Bibliographie


[11] J. A. Barclay and S. Sarangi, Sélection of régénération geometry for magne tic réfrigération applications (ASME winter annual meeting, New Orleans, 1984).

[12] Julien ROUDAUT, Modélisation et conception de systèmes de réfrigération magnétique autour de la température ambiante, Thèse de doctorat de L'université de Grenoble. Spécialité : Génie Électrique.

[13] LACAZE Alain, Contribution à l'étude de la réfrigération magnétique aux températures de l'hélium liquide, Thèse de doctorat de l'université l'institut scientifique et médicale national polytechnique de Grenoble. (1985).

[14] wikipedia.org/wiki/Cycle_de_Brayton.

[15] Andrej Kitanovski, Peter W. Egolf, Thermodynamics of magnetic réfrigération, University of Applied Sciences of Western Switzerland. International Journal of Réfrigération 29 (2006) 3–21.

[16] A M Tishin, The Magnétocalorique Effect and its Applications, M V Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia.

[17] wikipedia.org/wiki/Gadolinium.

[18] wikipedia.org/wiki/Erbium.

[19] wikipedia.org/wiki/Dysprosium.

[20] wikipedia.org/wiki/ Terbium.

[21] Balli, M., Sari, O., Mahmed, C., Besson, C., Bonhote, P., Duc, D. et Forchelet, J. (2010). A pre-industrial magnetic cooling system for room- temperature applications. In Proc. Fourth IIF-IIR International Conference on Ma-gnetic Réfrigération at Room Température, pages 313–322, Baotou, China.

## Bibliographie

[22] LIONTE Sergiu, caractérisation: étude et modélisation du comportement thermomagnétique d'un dispositif de réfrigération magnétique à matériaux non linéaires et point du curie proche de la température ambiante , Thèse de doctorat de l'Université de Strasbourg .Spécialité d'énergétique /thermique .Mécanique des fluides, (2015).

[23] Marc-ANDRE RICHARD, Régénérateurs magnétiques actifs multicouches pour la réfrigération magnétique, Université du Québec à Trois-Rivières (2003).

[24] Revue officielle de l'association française du froid, froid et conditionnement d'air, N1142 (2014).

[25] Ulrich Legait. Caracterisation et Modelisation Magnetothermique AP-pliquee à la réfrigération magnétique. Sciences de l'ingenieur [physics]. Université de Grenoble, 2011.