République Algérienne Démocratique et populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Dr. YAHIA FARES DE MEDEA

Faculté des Sciences et de la technologie
Département de science de la matière

Filière : Génie mécanique
Option : Energétique et thermique des systèmes

Projet de Fin d'Etudes

Pour l'obtention du Diplôme de Master en Génie mécanique

THÉME :
Simulation numérique de cycle De réfrigération magnétique D'Ericsson

Etudié par :
**** BOUALAMALLAH Soumia***
**** DRISS Farida***

Proposé et Dirigé par :
**** Dr. CHIBA Younes***

Promotion: 2015/2016



ملخص:

في العمل قمنا بإجراء دراسة الديناميكا الحرارية لدورة التبريد المغناطيسية لإريكسون. ولحساب الخصائص المغناط حرارية للمواد المغناطيسية الصلبة (الجادولينيوم، التيربيوم، الدسبروزيوم والإربيوم) استعملنا نظرية الحقول الجزيئية. ولبرمجة دورة التبريد المغناطسية لإريكسون قمنا بتطوير برنامج عددي باستعمال الفورتران. وفي الأخير قمنا بعرض نتائج المحاكاة العددية الممثلة في كمية الحرارة المتبادلة وفعالية دورة إريكسون لمختلف المواد المغناطُ حرارية المقترحة.

كلمات المفتاح:

التبريد المغناطيسي، تأثير المغناطو-الحراري، دورة إريكسون، المحاكاة العددية.

Résumé :

Ce travail présente une étude thermodynamique du cycle de réfrigération magnétique d'Ericsson. Les propriétés magnétocaloriques des réfrigérants magnétiques solides (Gadolinium Terbium, Dysprosium et Erbium) sont déterminées en utilisant la théorie de champ moléculaire. Un code de calcul numérique a été développé en Fortran pour modéliser le cycle thermomagnétique d'Ericsson. Les résultats de la simulation numérique incluant les différentes quantités de chaleur échangées et la performance énergétique de cycle d'Ericsson pour les matériaux magnétocaloriques proposées sont présentés et discutés.

Mots clés :

Réfrigération magnétique, Effet magnétocalorique, cycle d'Ericsson, Simulation numérique.

Abstract:

This work presents a thermodynamic study of magnetic Ericsson refrigeration cycle. The magneto caloric properties of solid magnetic refrigerants (Gadolinium, Terbium, Dysprosium and Erbium) are determined by using mean field theory. A numerical code was developed in FORTRAN to modulate thermomagnetic Ericsson cycle. The results of numerical simulation including the various heat exchanged quantities and the energy performance of Ericsson cycle for magneto caloric materials proposed are presented and discussed.

Keywords:

Magnetic refrigeration, Magneto caloric effect, Ericsson cycle, numerical simulation.

REMERCIEMENTS

ET

DÉDICACE

REMERCIEMENTS

Au terme de ce modeste travail, je remercie dieu

Tout puissant qui m'a amené à terminer
Ce travail et tous ce qui on contribuât à ma formation
En particulier mes parents
Et mes enseignants d'université de Médéa.
Je remercie mon promoteur monsieur : ***CHIBA Younes***
Qui a suivi et dirigée ce travail.
Je remercie s'adressent à tout ce qui ont aidés et soutenue
De près ou de loin à la réalisation
De cette Mémoire.
J'adresse mes vifs remerciements à tous les membres
De jury qui m'ont
Honorés d'avoir accepté de juger ce travail .

Farida .. Soumia ..

DÉDICACE

Je dédié ce modeste travail

À mon cher père

À ma chère mère

À mes chers frères

À tous ceux que j'aime et qui m'aime.

Soumia

DÉDICACE

Au nom de dieu que je le remercie infiniment

qui ma donné le pouvoir

D'étudier et a facilité mon trajet d'étude et ma

aidé dans tout les

Moments que j'avais besoin d'aide.

Je dédié ce modeste travail à mes chers parents

Mes sœurs AMINA, DALILA, DJAMILA,

Mes frères RABEH, ABDELKADER.

À mes collègues

A tous ceux que j'aime et qui m'aime.

Farida

TABLE DES MATIÈRES

Table des matières

Remerciements et dédicace…….…….. i

Table des matières ……..……..... iv

Liste des figures et Liste des tableaux…….…… vii

Nomenclature……..… xi

Introduction générale……..…….....…….1

Chapitre I : Etat de l'art

I.1 Introduction..... 3

I.2 L'effet magnétocalorique ….……...……..... 3

I.2.1 Définition …… 3

I.2.2 Historique ……. 4

I.2.3 Principe de l'effet magnétocalorique…….…….... 6

I. 3 La réfrigération magnétique ……....7

I.3.1 Définition ……..….7

I.3.2 Principe de la réfrigération magnétique ……8

I.3.3 Systèmes de réfrigération magnétiques ……8

I.3.3.1 Le réfrigérateur magnétique de Brown ……..9

I .3.3.2 Le réfrigérateur magnétique de Steyert ……...10

I .3.3.3 Le réfrigérateur magnétique de Kirol……...10

I .3.3.4 Le réfrigérateur magnétique de Green et al…….11

I .3.3.5 Le réfrigérateur magnétique de Zimm et al 1998 ……...12

I .3.3.6 Réfrigérateur magnétique de Chubu electric/Toshiba ……13

I .3.3.7 Le réfrigérateur magnétique de Balli *et al.* (2010)…….....14

I .3.3.8 Autres réfrigérateurs magnétique ……....14

I .4 Approche thermodynamique……..16

I.4.1 Relations de Maxwell ……16

I.4.2 Expression de l'effet magnétocalorique ……..17

I .5 Théorie du champ moléculaire ……..18

I.6 Matériaux magnétocalorique (MMC) ……...20

Chapitre : II Modélisation le cycle Réfrigération magnétique d'Ericsson

II.1 Introduction ……...…….. 22

II.2 Les cycles des réfrigérations magnétiques ……..…… 22

II.2.1 Présentation des cycles thermodynamiques appliqués à la RM……..…23

II.2.1.1 Cycle réfrigération magnétique de Carnot ……..…….....23

II.2.1.2 Cycle magnétique de Brayton …….....25

II.2.1.3 Le cycle réfrigération magnétique active avec régénération(AMRR)…….…26

II.3 Etude du cycle réfrigération magnétique d'Ericsson ……...…….29

II.3.1 Description du cycle réfrigération magnétique d'Ericsson ……..….32

II.3.2 Analyse du cycle de réfrigération magnétique d'Ericsson …..…….....30

Chapitre III : Résultat et Discussion

III .1 Introduction.……...……..... 32

III .2 Définition …….....32

III.3 Calcul propriétés magnétique des matériaux magnétocaloriques……...…..…. 32

III.4 Calcul propriétés magnétique des alliages magnétocaloriques ……..…..... 41

III.5 Étude du cycle réfrigération magnétiques d'Ericsson…...….....45

Conclusion générale …….. 50

Références

LISTE DES FIGURES

ET

LISTE DES TABLEAUX

Liste des figures

Chapitre I

Fig. I.1 schéma de principe de l'Effet magnétocalorique……...5

Fig. I.2 Principe de l'effet magnétocalorique…….…….....6

Fig. I.3 Diagramme *S-T* d'un matériau ferromagnétique, montrant l'entropie totale enfonction de la température sous des champs magnétiques H_I et H_F (avec $H_F>H_I$).....7

Fig. I.4 Analogie entre le cycle compression-détente traditionnel et le cycle de réfrigération magnétique……8

Fig. I.5 Schéma du système de réfrigération magnétique de Brown…….9

Fig. I.6 Principe du réfrigérateur magnétique de Steyert……...….…….10

Fig.1.7 Schéma de fonctionnement du système de réfrigération magnétique de Kirol…….11

Fig. I.8 Schéma réfrigération magnétique de Green et al…….12

Fig. I.9 Schéma de réfrigération magnétique de Zimm et al……...…….....……13

Fig. I.10 Le dispositif japonais initial (gauche) et amélioré (droite)…….……...13

Fig. I.11 Schéma de réfrigération magnétique de Balli et al…….....14

Fig. I.12 Transitions de phase et variation de l'entropie magnétique associées……..21

Chapitre II

Fig. II.1 Analogie entre le cycle de la réfrigération conventionnel et le cycle de la réfrigération magnétique……..……...…….23

Fig. II.2 Cycle magnétique de Carnot…….…….24

Fig. II.3 Cycle magnétique de Brayton…….……...26

Fig. II.4 Principe de la réfrigération magnétique par un cycle AMRR……27

Fig. II.5 Principe du cycle d'Ericsson …….29

Fig. II.6 Le cycle magnétique d'Ericsson ……....29

Chapitre III

Fig. III.1 Evolution de la chaleur spécifique électronique et l'entropie électronique de Gd en fonction de Température ……... 34

Fig. III.2 Evolution de la chaleur spécifique magnétique et l'entropie magnétique en fonction de Température …….34

Fig. III.3 Evolution de la chaleur spécifique du réseau et l'entropie du réseau en fonction de Température…….….35

Fig. III.4 Evolution d'EMC et la variation d'entropie magnétique en fonction de Température …… 36

Fig. III.5 Evolution de l'entropie total et la chaleur spécifique total en fonction de Température ……..…….…….....37

Fig. III.6 Evolution de la chaleur spécifique total et l'entropie total en fonction de Température …..... 38

Fig. III.7 Evolution de la chaleur spécifique magnétique et l'entropie magnétique en fonction de Température …….38

Fig. III.8 Evolution de la chaleur spécifique total en fonction de Température……...39

Fig. III.10 la variation d'entropie magnétique et de l'effet magnétocalorique en fonction de la température……...……....40

Fig. III.11 Températures de Curie en fonction de la concentration en (Tb, Dy, Er) x dans $Gd_{1-x}Tb_x$, $Gd_{1-x}Dy_x$, $Gd_{1-x}Er_x$…….…… 43

Fig. III.12 Evolution de la chaleur spécifique total en fonction de Température pour l'alliage $Gd_{0,6}Tb_{0,4}$ avec 0<H>1.5 …….…….. 43

Fig. III.13 la variation de l'effet magnétocalorique en fonction de Température pour l'alliage $Gd_{0,6}Tb_{0,4}$ avec H=1.5 …….. 44

Fig. III.14 la variation d'entropie magnétique en fonction de Température pour l'alliage $Gd_{0,6}Tb_{0,4}$ avec H=1.5 ……...… 45

Fig. III.15 Evolution de coefficient de performance en fonction de la température ……..……... 45

Fig. III.16 Variation de la quantité de chaleur dégagée au niveau de sources chaude en fonction de température…….…….. 46

Fig. III.17 Variation de la quantité de chaleur dégagée au niveau de sources froide en fonction de température……..…..……... 46

Fig. III.18 Variation de la quantité de chaleur dégagée au niveau de sources froide en fonction de température……...47

Fig. III.19 Evolution de coefficient de performance en fonction de la température ……...…….. 48

Fig. III.20 Variation de la quantité de chaleur dégagée au niveau de sources froide en fonction de température.…….…… 48

Fig. III.21 Evolution de coefficient de performance en fonction de la température..49

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau. I.1 Principaux Démonstrateurs des réfrigérateurs magnétiques……..…….15

Chapitre III

Tableau. III.1 Les propriétés magnétiques des matériaux magnétiques ……..…...33

Tableau. III.2 Les propriétés magnétiques de l'alliage $Gd_{1-x}Tb_x$ …….....42

Tableau. III.3 Les propriétés magnétiques de l'alliage $Gd_{1-x}Dy_x$…….....42

Tableau. III.4 Les propriétés magnétiques de l'alliage $Gd_{1-x}Er_x$…….…...42

NOMENCLATURE

Nomenclature

Abréviations

Abréviations	Signification
AMMR	La Réfrigération Magnétique Active à Régénération
EMC	Effet Magnétocalorique
RM	Réfrigération magnétique
COP	Coefficient de Performance
MMC	Matériau magnétocalorique
MFT	Théorie de champ moléculaire

Symbol

Symbol	Grandeur	Unité
Cp	Capacité Calorifique	[J/Kg.K]
ΔS	Variation de l'entropie	[J/Kg.K]
ΔT	Variation de temperature	[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	[-]
ρ	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]
X	Susceptibilité magnétique	[-]
A	Diffusivité thermique	[m^2/s]
M	Perméabilité magnétique	[H/m]
C_p	Chaleur spécifique	[J/Kg.K]
S_e	Entropie électronique	J/K.mol
S_r	Entropie du réseau	J/K.mol
S_M	Entropie magnétique	J/K.mol
H	Coefficient de convection	W/K.m^2
J	Nombre quantique du moment angulaire total	[-]
R	Constante universelle des gaz	[J.K/mol]
Q_c	Quantité de chaleur de la source chaude	[J]
Q_f	Quantité de chaleur de la source froide	[J]
α	Diffusivité thermique	[m^2/s]
γ	Coefficient de capacité calorifique électronique	[J/K.mol]
X	Susceptibilité magnétique	[-]
η	Efficacité	[-]
T_H, T_L	Les températures des hautes et basse de réservoir	[K]
Tm	Température moyenne	[K]

Constantes physiques

Symbol	Grandeur	Valeur	Unité
K_B	constante de Boltzmann	$1{,}381.10^{-23}$	[J/K]
μ_0	perméabilité du vide	$4\pi.10^{-7}$	[H/m]
μ_B	magnéton de Bohr	$9{,}274.10^{-24}$	[A/m]

INTRODUCTION

GÉNÉRALE

Introduction générale

Le froid occupe une place très importante dans notre vie quotidienne. Il est utilisé dans de nombreuses applications telles que la climatisation automobile ou de bâtiment, la réfrigération industrielle ou domestique, la conservation agroalimentaire ou médicale, etc. Sa production s'appuie essentiellement sur des techniques classiques de compression et de détente de gaz comme les chlorofluorocarbones (CFC), les hydrofluorocarbones (HFC) et les hydro chlorofluorocarbones (HCFC). Ces derniers, sont malheureusement, des gaz à effet de serre, qui contribuent au réchauffement climatique.

Des travaux sont menés aujourd'hui pour pallier ce problème en suivant deux voies parallèles. 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. [1]

La réfrigération magnétique constitue une des solutions. Cette technologie est basée sur l'effet magnétocalorique (EMC), une propriété intrinsèque de certains matériaux magnétiques. Cet effet se traduit par un changement de l'état thermique du matériau (chaud / froid) lors de la variation de son état magnétique (aimanté/désaimanté) induit par un champ magnétique extérieur. [2]

Cette réfrigération est donc une technologie plus écologique que la réfrigération Conventionnelle qui ne devrait avoir aucun impact dangereux sur l'environnement car elle ne met pas en œuvre des gaz à effet de serre mais uniquement des matériaux magnétiques et des fluides comme l'eau ou l'air. Elle présente également un autre avantage majeur qui est la grande efficacité thermodynamique. En effet, avec l'EMC, les efficacités peuvent atteindre 60%, voire plus, de l'efficacité limite de Carnot alors qu'elles ne dépassent pas 40% dans les meilleurs systèmes thermodynamiques conventionnels. Le coefficient de performance traduisant le rendement énergétique (Puissance froide / Puissance fournie) est théoriquement de 10 alors qu'il vaut 5 et 0.5 respectivement pour un cycle thermodynamique classique et une cellule à effet

Peltier. D'autres avantages peuvent être également mentionnés comme la possibilité de réaliser des systèmes compacts, le matériau étant solide et non gazeux, l'absence de bruit et de vibration grâce à l'absence de compresseur et un réglage aisé de la puissance ou des températures des sources froide et chaude. [1]

Plusieurs prototypes de réfrigération magnétique ont été réalisés à travers le monde mais il reste encore des progrès à faire tant sur le plan fondamental que pratique pour rendre cette technologie industrialisable et compétitive.

Le présent manuscrit de master est structuré en trois chapitres.

Le premier chapitre de ce mémoire consacrée à une introduction à l'effet magnétocalorique et dresse un état de l'art des Réfrigérations magnétiques. L'étude historique permet de comprendre les différentes étapes qui ont mené à la technologie actuelle, que ce soit l'étude des matériaux ou des systèmes de réfrigération.

Dans le deuxième chapitre, nous avons présente les cycles des réfrigérations magnétiques et étude le cycle de Ericsson et présenté le coefficient de performance (COP).

Enfin, dans le troisième chapitre, les résultats de simulation numérique ont été présentés et discutés.

CHAPITRE I :

ETAT DE L'ART

I.1 Introduction

La réfrigération magnétique repose sur la propriété physique de certains matériaux magnétiques qui voient leur température intrinsèque s'élever lorsqu'ils sont soumis à un champ magnétique. Ce premier chapitre va servir comme initiation à cette nouvelle technologie. Nous allons définir l'effet magnétocalorique principe essentiel de la réfrigération magnétique, donner quelques définitions importantes pour pouvoir suivre le reste du mémoire et surtout faire une analogie entre les systèmes de réfrigération conventionnelle à gaz et les systèmes basés sur la réfrigération magnétique. [3]

I.2 L'effet magnétocalorique

La réfrigération magnétique exploite une propriété de certains matériaux : l'effet magnétocalorique. Celui-ci va être l'objet de cette section.

I.2.1 Définition

L'effet magnétocalorique est une propriété intrinsèque à tout matériau magnétique qui reflète sa capacité à absorber ou à émettre de la chaleur lors d'une variation de champ magnétique. Pour appréhender simplement l'effet magnétocalorique, considérons un système de spins paramagnétiques ou ferromagnétiques proche de sa température de transition. L'entropie de ce système peut être décrite comme la somme de deux contributions : l'entropie relative à l'ordre magnétique du système (entropie magnétique) et celles apparentées à la température (entropies de réseau et électronique).

L'application d'un champ magnétique provoque l'alignement des moments magnétiques à l'origine désordonnés par l'agitation thermique. Ceci a pour conséquence de diminuer la valeur de l'entropie magnétique.

Si le champ magnétique est appliqué de façon adiabatique, c'est-à-dire sans échange de chaleur avec l'extérieur, l'entropie de réseau et l'entropie électronique augmentent afin de maintenir l'entropie totale du système constante. C'est cette augmentation de l'entropie de réseau qui entraîne un échauffement du système et donc une élévation de sa température .Le processus inverse, c'est-à-dire une désaimantation

adiabatique, provoquera une diminution de la température du système. Cette variation de température est la manifestation de l'effet magnétocalorique.

Dans le cas d'un système antiferromagnétique, l'application d'un champ magnétique aura généralement l'effet inverse, la température du système diminuera car le champ magnétique déstabilise l'arrangement antiparallèle des moments avec comme conséquence une augmentation du désordre. [4]

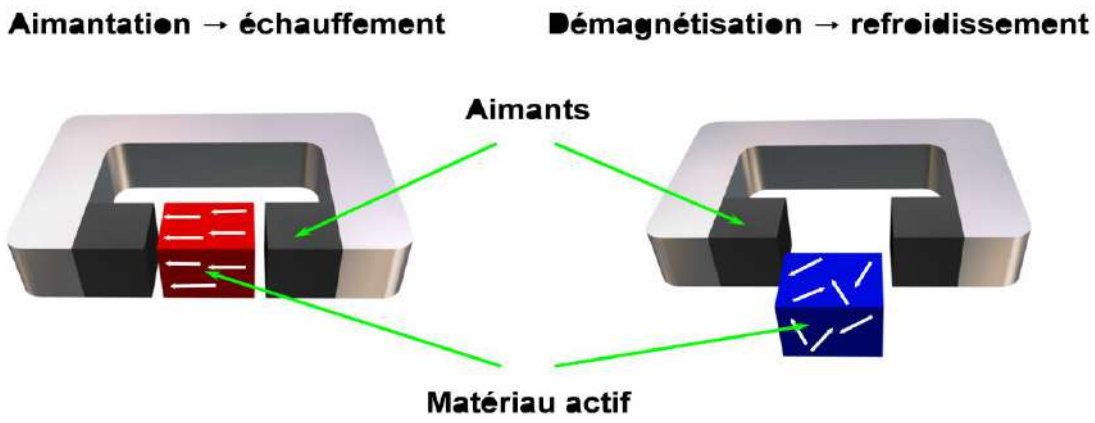


Fig. I.1 schéma de principe de l'effet magnétocalorique. [5]

I.2.2 Historique

L'effet magnétocalorique a été mis en évidence pour la première fois en 1881 par l'allemand Emil Warburg (1846-1931) alors qu'il étudiait la variation de température du fer lors de l'application d'un champ magnétique. [5]

Quelques années plus tard, en 1887 et 1890, Edison et Tesla utilisèrent l'effet thermomagnétique de matériaux à l'aimantation fortement dépendante de la température dans des prototypes de générateur électrique. [5]

Dans les années 1926-1927, cette idée d'utiliser la désaimantation adiabatique pour atteindre de très basses températures a été proposée, indépendamment par Debye et Giauque.

Giauque et McDougall en 1933 ont réussi la première désaimantation adiabatique et obtiennent la température de 0.5 K avec un champ de 0.8 Tesla,

en utilisant du sulfate de gadolinium. Leurs travaux seront nobélisés en 1949. Depuis, une course pour atteindre les très basses températures a été lancée. [2]

En 1954 Heer, Barnes et Daunt ont construit un réfrigérateur magnétique qui fonctionne en continu et qui produit 7 HW à 0.26 K. [1]

En 1966 Van Geuns a proposé un cycle magnétique régénératif analogue au cycle d'Ericsson qui opère entre 4 K et 15 K, les performances théoriques de ce cycle sont supérieures de 60% à 70% au cycle de Carnot. [1]

En 1976 Barclay et al. ont construit un réfrigérateur magnétique tournant à régénération, celui-ci opère entre 4 K et 15 K et produit 0.9 W. [1]

Dans la même année Brown fut le premier à appliquer la réfrigération magnétique autour de la température ambiante au ''Lewis Research Centre of American National Aeronautics and Space Administration''. [1]

Des études théoriques et expérimentales menées principalement aux USA par Gschneidner, Zimm et Pecharsky ont démontré la validité et l'efficacité du procédé dans la fabrication du froid et, en 1996, Zimm et son groupe de recherche ont développé un réfrigérateur basé sur la réfrigération magnétique active produisant entre 500 et 600 W de puissance froide sous un champ de 5T. [1]

La première conférence sur la réfrigération magnétique autour de la température ambiante (Thermag I) qui a eu lieu en 2005 à Montreux (Suisse) permet de fédérer les scientifiques et les industriels travaillant sur cette thématique. Par la suite, des avancées significatives sont faites. Le premier prototype utilisant des matériaux à EMC géant est réalisé par Lu *et al.* [8]

Lors de la seconde conférence sur la réfrigération magnétique autour de la température ambiante (Thermag II) qui a eu lieu en 2007 à Portoroz (Slovénie), plusieurs prototypes aux performances intéressantes sont dévoilés. Okamura*et al.* Présentent un prototype rotatif dont la structure est proche d'un moteur à aimants permanents. [8]

Récemment, lors de la quatrième conférence sur la réfrigération magnétique autour de la température ambiante (Thermag IV) qui a lieu en 2010 à Baotou (Chine). [8]

I.2.3 Principe de l'effet magnétocalorique :

L'effet magnétocalorique (EMC) est défini comme étant le réchauffement où le refroidissement de certains matériaux magnétiques sous l'application où la suppression d'un champ magnétique extérieur. Cet effet a été appelé la démagnétisation magnétique ou encore la désaimantation adiabatique par le passé, bien que ce phénomène soit une application pratique de l'EMC. L'effet magnétocalorique est le résultat du changement de l'entropie du solide dû aux couplages entre l'arrangement magnétique et le champ magnétique extérieur. L'entropie totale d'un matériau magnétique est la somme de l'entropie de réseau S_R, l'entropie électronique S_E et l'entropie magnétique S_M. Dans la plupart des cas, les entropies électronique et du réseau sont indépendantes du champ magnétique H ; par contre l'entropie magnétique dépend essentiellement de H. L'application d'un champ magnétique à tendance à aligner les moments magnétiques (Figure I.2), et cette mise en ordre des moments est accompagnée d'une réduction de l'entropie magnétique. A une température constante T et pour une variation du champ appliqué de ΔH, l'entropie magnétique varie de $\Delta S_M(T, \Delta H)$, tandis que SR et SE restent constantes La quantité $\Delta S_M\ (T, \Delta H)$ est appelée la variation de l'entropie isotherme. **[6]**

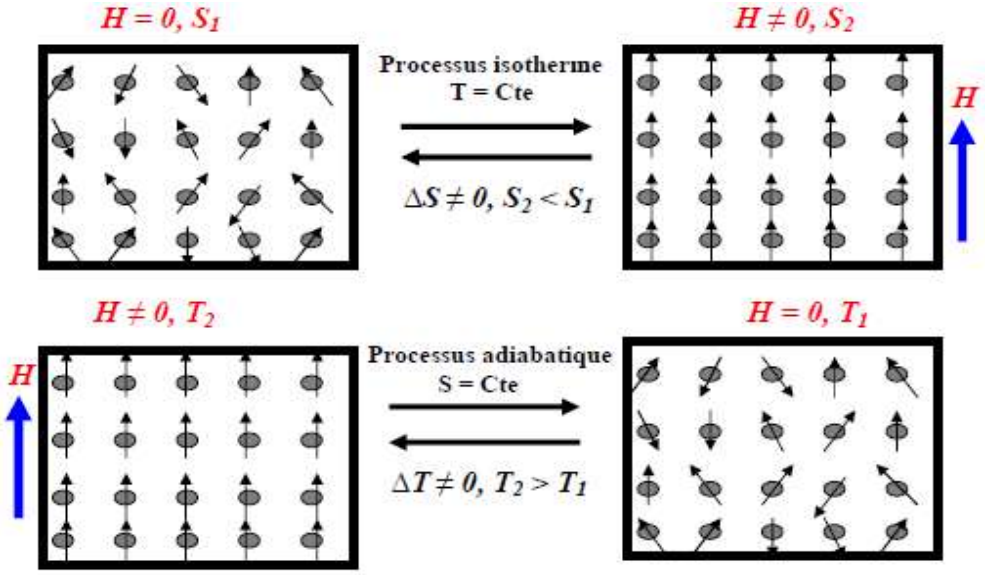


Fig. I.2 Principe de l'effet magnétocalorique. [6]

Dans les conditions adiabatiques, l'entropie totale est constante à cause de l'absence d'échange thermique avec l'extérieur. Dans ce cas, l'entropie du réseau et l'entropie électronique varient de $\Delta (S_R+S_E) = - \Delta S_M$ pour satisfaire la condition $\Delta S = 0$. Ainsi, la variation de S_R et S_E provoque un changement de la température du matériau magnétique en augmentant ou en diminuant l'intensité des vibrations du réseau selon le signe de ΔH. Ce changement de température est appelé variation de la température adiabatique $\Delta T_{ad}(T)_{\Delta H}$.

Le schéma de la figure I.3 S – T illustre la relation entre la variation de l'entropie magnétique isotherme et la variation de la température adiabatique. Cette figure montre l'entropie totale d'un matériau ferromagnétique pour deux champs magnétiques différents H_I et H_F, avec $H_F > H_I$.

Les quantités $\Delta S_m(T, \Delta H)$ et $\Delta T_{ad}(T, \Delta H)$ sont données pour une température T et une variation du champ $\Delta H = H_F - H_I$.

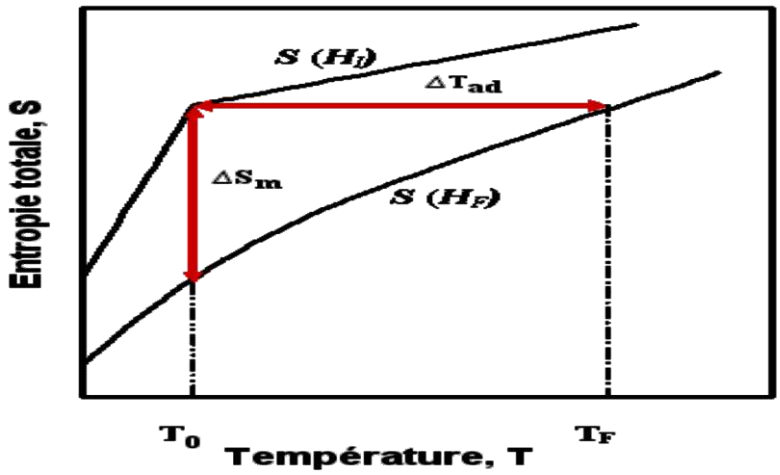


Fig. I.3 Diagramme S-T d'un matériau ferromagnétique, montrant l'entropie totale en fonction de la température sous des champs magnétiques H_I et H_F (avec $H_F > H_I$). Les quantités $\Delta S_M(T_0, H_I - H_F)$ et $\Delta T_{ad}(T0, H_I - H_F)$ sont indiquées par des flèches.[6]

I.3 La réfrigération magnétique

I.3.1 Définition

La réfrigération magnétique est une technologie de rupture pour produire du froid basée sur l'effet magnétocalorique. L'avantage principal de la réfrigération magnétique est sa grande efficacité thermodynamique. [7]

I.3.2 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]

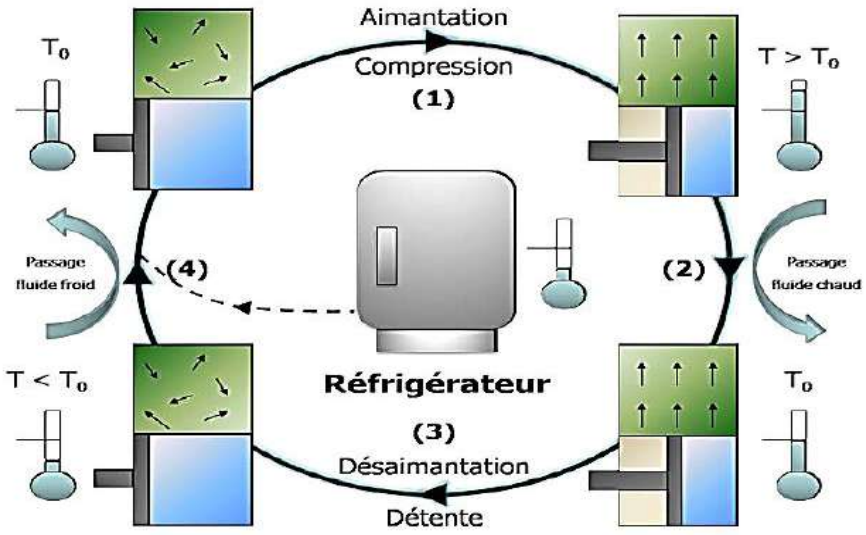


Fig. I.4 Analogie entre le cycle compression-détente traditionnel et le cycle de réfrigération magnétique. [3]

I.3.3 Systèmes de réfrigération magnétiques

Les travaux menés par Brown en 1976 qui marquent le point de départ de la réfrigération magnétique à des températures proches de l'ambiante, développée par la suite par de nombreuses équipes de recherche. Ces travaux montrent qu'il est

notamment possible de s'affranchir des effets néfastes liés à la forte chaleur spécifique des matériaux, par l'instauration d'un gradient de température dans le fluide régénérateur.

Avant cela, la conception de dispositifs réfrigérants à ces températures était orientée vers l'utilisation de« Ferro-fluides » (suspensions colloïdales de particules ferromagnétiques). La faible concentration en particules magnétiques dans de telles suspensions et les problèmes de transfert de chaleur inhérents à cette technique ont conduit à la recherche de nouveaux systèmes. [9]

Plusieurs prototypes ont été mis au point, et même s'il est impossible de tous les citer, en voici cependant quelques-uns parmi les plus remarquables.

I.3.3.1 Le réfrigérateur magnétique de Brown

L'appareil développé par Brown en 1976 Figure I.5 est basé sur un cycle de type Ericsson. Le champ magnétique alternatif de 7 T est généré par un aimant Supraconducteur. Le matériau magnétique immergé dans le fluide régénérateur est constitué d'une mole de Gd sous la forme de plaques d'un millimètre d'épaisseur séparées par des intervalles d'un millimètre également, permettant au fluide de circuler entre elles. Enfin, le fluide régénérateur est un mélange de 80 % d'eau et 20% d'éthanol. [9]

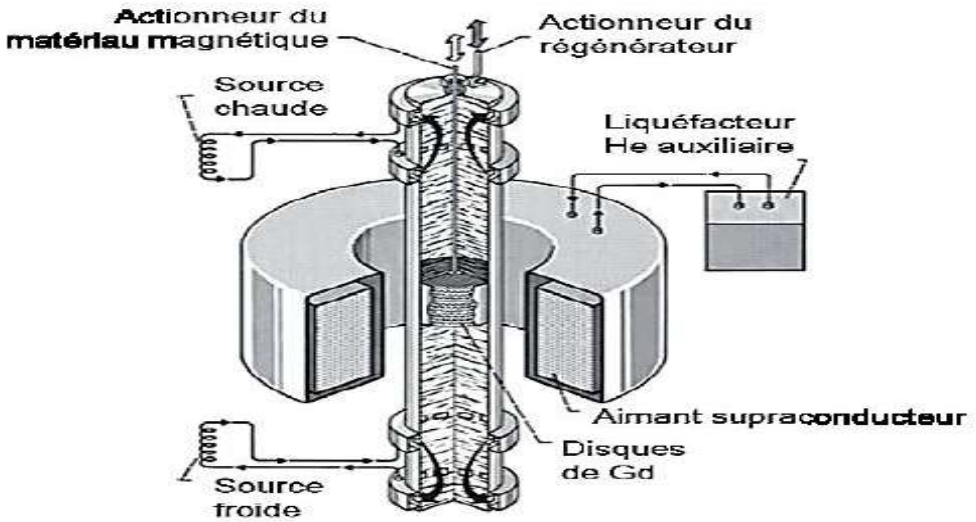


Fig. I.5 Schéma du système de réfrigération magnétique de Brown. [10]

I.3.3.2 Le réfrigérateur magnétique de Steyert

L'année suivant la mise au point du réfrigérateur de Brown, Steyert [11] a conçu et construit un prototype basé sur un cycle de Brayton. Ici, un assemblage poreux de fer et de gadolinium en forme d'anneau tourne à travers le système,Figure I.6. L'anneau traverse alors successivement une zone de champ magnétique faible puis une zone de champ magnétique fort.

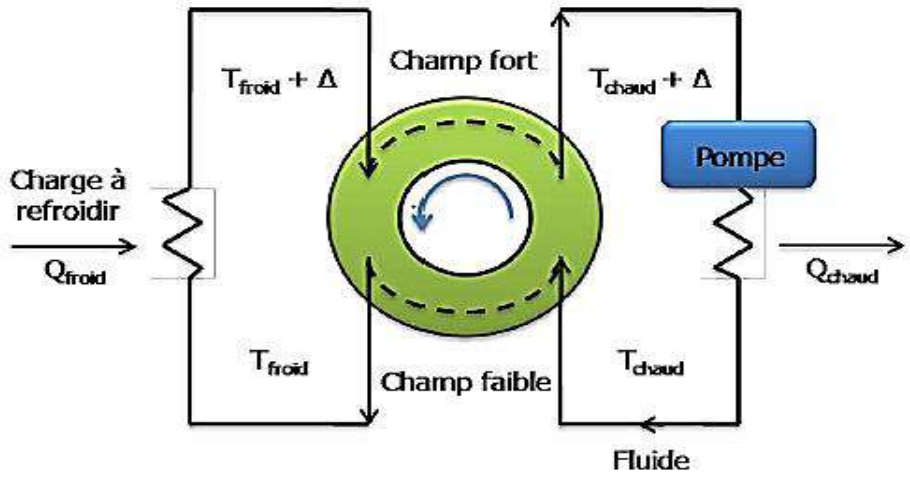


Fig. I.6 Principe du réfrigérateur magnétique de Steyert. [4]

À T_{chaud}, le fluide entre dans l'anneau puis le quitte à la température T_{froid} après avoir rejeté la chaleur au matériau réfrigérant sous champ faible. Puis le fluide est réintroduit dans l'anneau à la température $T_{froid}+\Delta$ après avoir récupéré la charge de chaleur Q_{froid}. Durant l'échange thermique avec la roue maintenant à température $T_{chaud}+\Delta$, le fluide s'échauffe jusqu'à $T_{chaud}+\Delta$. Finalement il dépose une charge de chaleur Q_{chaud} dans le réservoir chaud, ce qui met fin au cycle.

I.3.3.3 Le réfrigérateur magnétique de Kirol

Le cycle à régénération n'a pas été la seule voie explorée, d'autres prototypes de réfrigération à la température ambiante, basés sur des systèmes différents ont été élaborés en parallèle. Ainsi, par exemple, en 1988, Kirol et Dacus[12] ont construit et testé un appareil fonctionnant sur le principe d'une machine tournante et d'un cycle de type Ericsson ,Figure I.7.

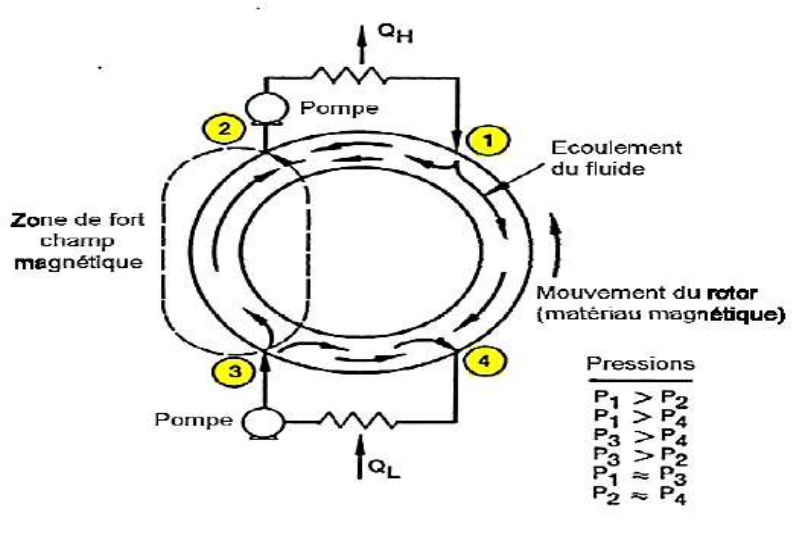


Fig I.7: Schéma de fonctionnement du système de réfrigération magnétique de Kirol. [10]

Le champ magnétique d'une valeur maximale de 0,9 T dans l'entrefer est généré par un aimant permanent NdFeB. Le matériau réfrigérant a la forme d'un rotor constitué de 125 disques plats de Gd faiblement espacés les uns des autres, qui sont liés ensemble par une résine époxy. Les orifices d'écoulement du fluide calorifique (eau) sont positionnés sur les bords de l'aimant de manière à ce que celui-ci puisse s'écouler à travers les zones de variation du champ magnétique. Au cours d'un tour du rotor, quatre cycles thermodynamiques sont opérés et une variation de température de 11 K est obtenue. Dans un tel cycle, le fluide dit de « récupération » est en contact thermique avec le matériau réfrigérant uniquement en dehors des phases d'aimantation et désaimantation, contrairement à la régénération. Ces deux chercheurs pensaient que l'élévation de température dans le fluide régénérant (d'un cycle à régénération) diminuait l'efficacité de ce dernier et qu'en cela la récupération était supérieure à la régénération. Cet appareil s'est, toutefois, montré moins efficace que la technologie régénérative développée par Barclay et Steyert.

I.3.3.4 Le réfrigérateur magnétique de Green et al:

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 [13]. La première couche contient du T_b dont la température de Curie est T_C = 235K, la seconde couche un alliage Gd Tb (T_C = 264 K) et la dernière du Gd

(T_C = 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.

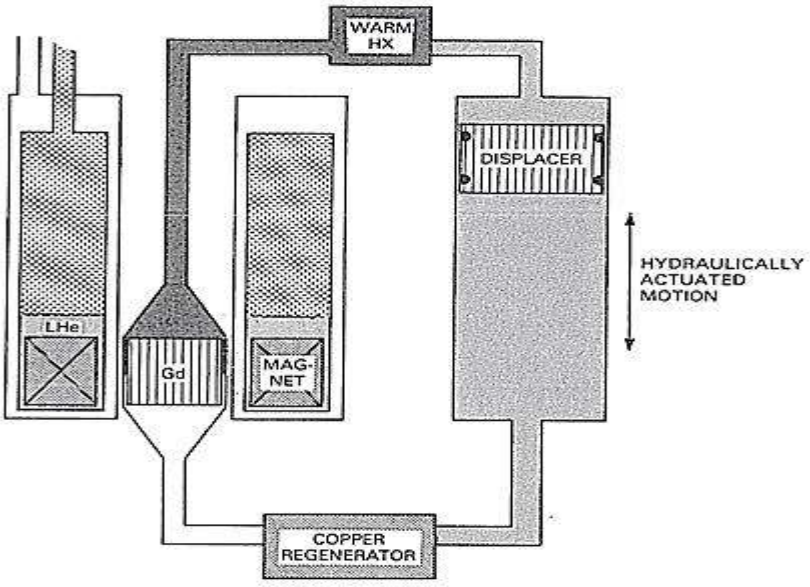


Fig. I.8 Schéma réfrigération magnétique de Green et al. [13]

I.3.3.5 Le réfrigérateur magnétique de Zimm et al 1998

Une étape importante a été franchie en 1998 lorsque l'entreprise Astraunotics s'est associée à l'Ames Laboratory pour réaliser un prototype de réfrigération magnétique destiné à démontrer la faisabilité et la compétitivité de la réfrigération magnétique à température ambiante [14]. 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. 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.

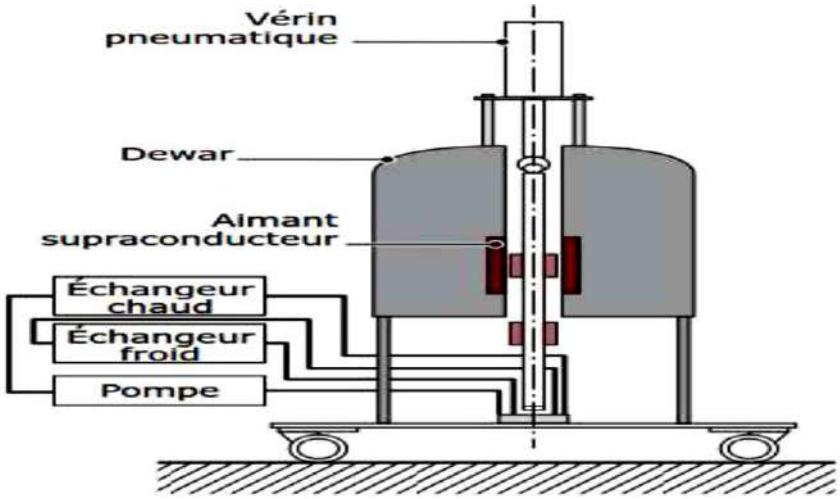


Fig. I.9 Schéma de réfrigération magnétique de Zimm et al. [14]

I.3.3.6 Réfrigérateur magnétique de ChubuElectric/Toshiba :

En 2000, la collaboration de ChubuElectics avec l'entreprise Toshiba [10] a permis de réaliser un démonstrateur linéaire à base de gadolinium sous forme de sphères en utilisant des supra conducteurs pour générer un champ magnétique de 4T ils ont obtenu 100W de puissance avec un écart de température de l'ordre de 21ºC

Par ailleurs, pendent les années 2002 et 2003 Hirano et son équipe ont réussi d'atteindre une puissance de 40 à 60 W avec un écart de température de l'ordre de 10à 27 ºC en utilisant des aimants permanents [10]. En 2006, l'entreprise ChubuElectics et Tokyo Institute of technologies ont conçu un autre démonstrateur rotatif Figure I.10 en suivant une série de modifications introduites sur les prototypes rotatifs développés précédemment ce quia leur permis d'atteindre une puissance plus grande de l'ordre de 540W.

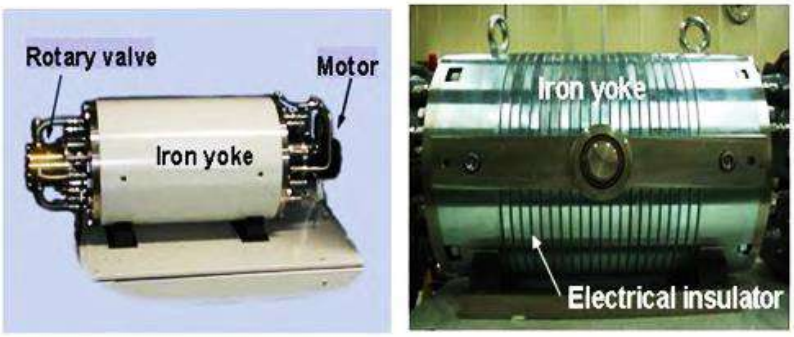


Fig. I.10 Le dispositif japonais initial (gauche) et amélioré (droite). [1]

I.3.3.7 Le réfrigérateur magnétique de Balli*et al.* (2010) :

Le prototype réalisé par Balli*et al.* (University of Applied Sciences of Western Switzerland) est un système linéaire composé de deux cylindres de Halbach[7].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.

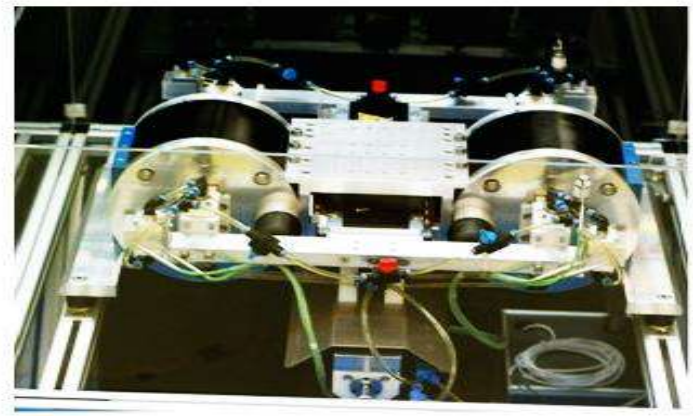


Fig. I.11 Schéma de réfrigération magnétique de Balli et al. [6]

I.3.3.8 Autres Réfrigérateurs magnétique

Parmi les démonstrateurs qui sont construits récemment, on cite celui de Riso en Danemark par l'équipe de Riso DTU [15]. En2012, l'équipe de Riso ont construit un réfrigérateur magnétique rotatif à base de gadolinium dont la source de champ magnétique consiste en des aimants permanents qui génèrent un champ magnétique de l'ordre de 1T avec une fréquence du cycle de 1.8Hz produisant une puissance de 1010W ; ce qui avait permis d'envisager d'utiliser ce type de réfrigérateur dans des applications de conditionnement d'air. D'autre part, ces derniers résultats obtenus par l'équipe des Danois ont été confirmés par le travail de Bahl et al. Qui a été présenté d'abord dans la conférence internationale de réfrigération magnétique près de la température ambiante en septembre 2012 à Grenoble, Thermag V puis récemment publié [16]. En somme, plusieurs d'autres prototypes de réfrigération magnétique opérant prés de la température ambiante ont été conçus comme le rapporte les travaux réalisés par Gschneidner Jr et al.2008 [10],Yu et al.2010 [17], Romero Gomez et al.2013 [18] et Aprea et al.2013 [19].

Tableau I.1 Principaux Démonstrateurs des réfrigérateurs magnétiques. [20]

Laboratoire et lieu	Annonec-Ment	Type	F(Hz)	B(T)	Réfrigérant	P(W)	ΔT (K)	Géométrie
NASA, USA	1976	Linéaire	–	7(E)	Gd	–	47 (80)	Plaques (0.1mm)
Haute École d'Ingénieur de Suisse Occidentale, Yverdon, Suisse	2006 2010 2014	Rotatif Linéaire Linéaire	– – –	1(p) 1.45(p) 1.45(p)	Gd Gd Gd	– – 	1 – –	Granuléscylindriques Plaques Plaques
Victoria University, Victoria, Canada	2001 2004 2007 2011	Linéaire Linéaire Linéaire Linéaire	_ 1 – 0-5	2(s) 2(s) 1.4(A) 1.4(AI)	Gd, Gd-Td Gd, Gd-Td Gd Gd	2 10 – 50	14 50 13 29	Multicouches Multicouches Sphères Sphères
Chubu Electric/Toshiba, Japon	2000 2002-2003 2006	Linéaire Rotatif Rotatif	_ 0.4 _	4(S) 0.77(A)	Gd Gd-Dy Gd-Dy	100 40-60 540	21 27-10	Sphères Multicouches, sphères Multicouches, sphères
Astronautics, Madison, Wisconsin, USA	1997 2001-2005 2007 2012	Linéaire Rotatif Rotatif Rotatif	_ 4 4 –	5(S) 1.5(A) 1.4(AI) 1.44(A)	Gd Gd, Gd-Er, LaFeSiH Gd LaFeSiH	600 50 220 3042	38 20-25 11 –	Sphères Sphères Plaques Multicouches
CooltechApplic-tions, Strasbourg	2005 2012	Rotatif Rotatif	_ 2	2.4(A) 0.85(A)	Gd Gd, Gd-Tb	360 _	14 39	Plaques Plaques, deuxétages
G2Elab, Grenoble	2003 2012	Linéaire Linéaire	0.5 _	0.8(AI) 0.8(AI)	Gd Gd, LaFeCoSi, PrSrMnO	8.8 _	4_7.8 10.5	Lames Multicouches, Plaque
Riso DTU, Danemark	2012	Rotatif	_	1(A)	Gd	1010	18.9	Sphères
Institute of Materials Science and Applied Mechanics,Pologne	2012	Linéaire	0.025	1(AI)	Gd	_	1.6	Particules

I.4 Approche thermodynamique :

Un système thermodynamique est caractérisé par des variables d'état. On distingue les variables extensives qui dépendent de la taille du système considéré, des variables intensives qui n'en dépendent pas. Dans le cas d'un matériau magnétique, les variables extensives sont le volume V, l'énergie interne U et l'entropie S. Les variables intensives sont la pression p, la température T et l'amplitude du champ magnétique H (ou de façon équivalente l'amplitude de l'aimantation M). L'énergie interne U est une fonction thermodynamique qui caractérise l'énergie d'un système fermé et l'entropie S caractérise son désordre. [7]

I.4.1 Relations de Maxwell :

D'une façon générale, pour un matériau magnétique, l'énergie interne s'écrit :

$$U = U\,(S, V, M) \tag{I.1}$$

La différentielle de l'énergie interne s'écrit alors :

$$\mathrm{dU} = \mathrm{TdS} - \mathrm{pdV} + \mu_0 \mathrm{VMH} \tag{I.2}$$

Pour les systèmes travaillant à pression constante, on utilise préférentiellement comme fonction thermodynamique l'enthalpie libre *G* (appelée aussi fonction de Gibbs), qui dérive de l'énergie interne :

$$G = U - TS + pV - \mu_0 VMH \tag{I.3}$$

La différentielle de l'enthalpie libre s'écrit alors :

$$\mathrm{dG} = \mathrm{Vd}p - \mathrm{SdT} - \mu_0 \mathrm{VMdH} \tag{I.4}$$

Les trois variables intensives sont exprimées en fonction de l'enthalpie libre par les équations d'état suivantes :

$$\mathrm{V} = \left(\frac{\partial \mathrm{G}}{\partial p}\right)_{\mathrm{T,H}} \tag{I.5}$$

$$S = -\left(\frac{\partial G}{\partial T}\right)_{H,p} \quad \text{(I.6)}$$

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

Si on utilise *H* comme variable intensive au lieu de *M*.

$$\mu_0 = -\left(\frac{\partial G}{\partial M}\right)_{T,p} \quad \text{(I.8)}$$

En dérivant les équations respectivement par rapport à T,M et Ton obtient les relation de Maxwall.[21] :

$$\left(\frac{\partial \mathrm{S}}{\partial \mathrm{p}}\right)_{\mathrm{T,H}} = -\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_{H,p} \quad \text{(I.9)}$$

$$\left(\frac{\partial S}{\partial M}\right)_{T,p} = \mu_0 \left(\frac{\partial H}{\partial T}\right)_{M,p} \quad \text{(I.10)}$$

$$\left(\frac{\partial \mathrm{S}}{\partial \mathrm{H}}\right)_{\mathrm{T},p} = \mu_0 \left(\frac{\partial \mathrm{M}}{\partial \mathrm{T}}\right)_{\mathrm{H},p} \quad \text{(I.11)}$$

I.4.2 Expression de l'effet magnétocalorique

L'entropie du système ne dépend que des variables intensives :

$$\mathrm{S} = \mathrm{S}\ (\mathrm{T},\ \mathrm{H},\ \mathrm{p}) \quad \text{(I.12)}$$

La différentielle de l'entropie s'écrit alors :

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

Par définition, la capacité calorifique à champ magnétique et pression constante s'écrit :

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

En utilisant les Équations (I.12) et (I.13), l'Équation (I.14) devient

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

Dans le cas d'un système adiabatique($\Delta \mathbf{S} = \mathbf{0}$)et isobare, l'Équation (1.15) s'écrit :

$$dT = -\frac{T}{C_{H,p}} \left(\frac{\partial M}{\partial T}\right)_{H,p} \mu_0 dH \quad (I.16)$$

On voit donc qu'il est possible d'exprimer l'EMC causé par une variation de champ magnétique, en intégrant l'Équation (I.16). De la même façon, si on utilise M comme variable intensive au lieu de H, on obtient :

$$dT = -\frac{T}{C_{M,p}} \left(\frac{\partial H}{\partial T}\right)_{M,p} \mu_0 dM \quad (I.17)$$

Si on considère un système non adiabatique, il est possible d'exprimer l'EMC à partir de la variation d'entropie :

$$dT = -\frac{T}{C_{H,p}} dS \quad (I.18)$$

Ensuite, l'EMC est déterminé soit de façon expérimentale (par des mesures directes ou indirectes, présentées dans la section I.4.2), soit de façon théorique (il faut alors expliciter les fonctions thermodynamiques caractéristiques du matériau par des considérations sur sa structure microscopique).

I.5 Théorie du champ moléculaire

Le modèle de Weiss est fondé sur le théorème de champ moléculaire (mean field theory) qui permet de déterminer l'effet magnétocalorique et les propriétés thermomagnétiques des matériaux magnétocaloriques selon les bases de magnétisme et les relations thermodynamiques.

Les caractéristiques importantes d'un matériau magnétique sont son entropie totale et l'entropie de son sous-système (l'entropie magnétique, l'entropie de réseau et l'entropie électronique) qui peut être modifiée par la variation du champ magnétique. Les relations suivantes décrivent les propriétés thermomagnétiques d'un matériau magnétocalorique de seconde d'ordre. [20]

$$S\ (H,T) = S_{\mathrm{M}}(H,T)\ + S_{\mathrm{r}}(H,T)\ + S_{\mathrm{e}}(t) \quad \text{(I.19)}$$

Ou :

S_M, S_r et S_e sont respectivement l'entropie magnétique, l'entropie du réseau et l'entropie électronique, elles sont données par les relations suivantes :

$$S_M(H,T) = R\left[\ln \sin h\left(\frac{2J+1}{2J}\chi\right) - \ln \sin h\left(\frac{1}{2J}\chi\right) - xB_J(\chi)\right] \quad \text{(I.20)}$$

Avec :

$$\chi = \frac{\mathrm{g_J \mu_B}}{\mathrm{K_B T}} + \frac{\mathrm{3T_C J H_J(x)}}{\mathrm{T(J+1)}} \quad \text{(I.21)}$$

D'où :

μ_B : est la magnéto de Bohr

g_J : est le facteur de Landé

J: est le nombre quantique du moment angulaire total

K_B : est la constante de Boltzmann

Et :

$$H_J(\chi) = \frac{2J+1}{2J}\coth\left(\frac{2J+1}{2J}\chi\right) - \frac{1}{2J}\coth\left(\frac{1}{2_J}\chi\right) \quad \text{(I.22)}$$

Est la fonction de Brillouin

$$S_r(H,T) = R\left[-3\ln\left(1 - e^{\frac{T_D}{T}}\right) + 12\left(\frac{T}{T_D}\right)^3 \int_0^{\frac{T_D}{T}} \frac{x^3}{e^x - 1}\,dx\right] \quad \text{(I.23)}$$

Ou :

T_D : est la température de Debye

$$\mathrm{S_e(T) = \gamma T} \quad \text{(I.24)}$$

Avec :

γ : est le coefficient de capacité calorifique électronique

La chaleur spécifique d'un matériau magnétocalorique peut se calculer suivant la relation suivante

$$c(H,T) = T\left(\frac{\partial S}{\partial T}\right)_H \quad \text{(I.25)}$$

L'effet magnétocalorique peut aussi se calculer en fonction de l'entropie totale suivant la relation suivante :

$$\Delta T_{ad} = -\int_{H_i}^{H_f} \frac{T}{c(H,T)}\left(\frac{\partial S}{\partial H}\right)_T dH \quad \text{(I.26)}$$

I.6 Matériaux magnétocalorique (MMC)

Les MMC sont classés par l'ordre de la transition, premier ordre c'est-à-dire possédant une transition de phase du premier ordre, présentent de fortes variations de l'entropie magnétique $\Delta S_M(T)$ et de la température ΔT_{ad} mais sur un faible domaine de température δT .dans cette transition les pertes par hystérésis ainsi que les cinétiques assez lentes de ces transitions pourraient réduire l'efficacité des matériaux à effet magnétocalorique géant dans les systèmes de réfrigération à cycle rapide.

Les matériaux du second ordre possèdent de plus faibles amplitudes de $\Delta S_M(T)$ et ΔT_{ad} mais leurs effets s'étendent sur une plus large plage de température δT (fig.I.12).

Et sont exempts de phénomènes pénalisants tels que l'hystérésis, la cinétique lente et les modifications structurales. [22]

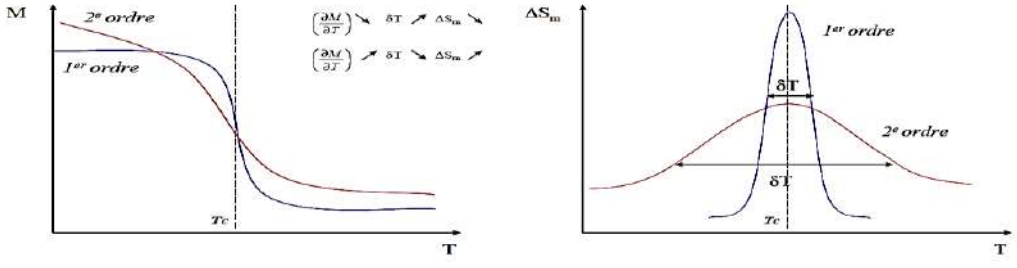


Fig. I.12 Transitions de phase et variation de l'entropie magnétique associées. [23]

Le gadolinium (Gd) est un matériau de terres rares de second d'ordre qui cristallise sous forme hexagonale à la température ambiante. Son nom provient de la gadolinite, le minerai duquel il a été extrait. Le Gd est parmi les matériaux le plus utilisé dans la majorité des systèmes de réfrigération magnétique, mais son prix trop élevé, son oxydation facile et son application limitée à la température ambiante ont poussé des chercheurs à recourir à de nouveaux matériaux moins dispendieux, plus propres et performants. [20]

CHAPITRE II :

MODELISATION DE CYCLE DE RÉFRIGÉRATION MAGNÉTIQUE D'ERICSSON

II.1 Introduction

Le cycle de réfrigération existe, d'ailleurs comme tous les autres cycles, de quatre étapes. Le cycle de réfrigération est un cycle inverse parce que la course est inverse de celle d'une montre

Dans ce chapitre en est expliqué les cycles réfrigération magnétique et base sur le cycle réfrigération magnétique de Ericsson.

II.2 Les Cycles Des Réfrigérations Magnétiques

Afin d'utiliser convenablement l'EMC dans un réfrigérateur, un cycle Thermomagnétique doit être accompli [24]. Si l'on se réfère aux cycles traditionnels de réfrigération que subit un gaz, ils sont composés de quatre étapes essentielles :

- La compression, qui entraîne l'élévation en température d'un gaz.
- La condensation, phase pendant laquelle ont lieu les échanges thermiques entre le gaz et un milieu externe (refroidissement).
- La détente, phase pendant laquelle se détend et se refroidit le gaz.
- L'évaporation, phase pendant laquelle on lieu les échanges thermiques entre le gaz et un milieu externe (réchauffement).

Dans le cas de la réfrigération magnétique, quatre phases sont également définies. Cependant, c'est le matériau qui subit le cycle, et non pas le gaz. L'aimantation du matériau assure son échauffement et inversement avec sa désaimantation. L'analogie avec la réfrigération classique est décrite sur la Figure II.1.

L'extraction de l'énergie contenue dans le matériau est assurée par un fluide caloporteur, généralement de l'eau, du fait de sa grande capacité calorifique.

Afin de comprendre la thermodynamique de la réfrigération magnétique, il est important de définir les différents cycles magnétiques existants. **[23]**

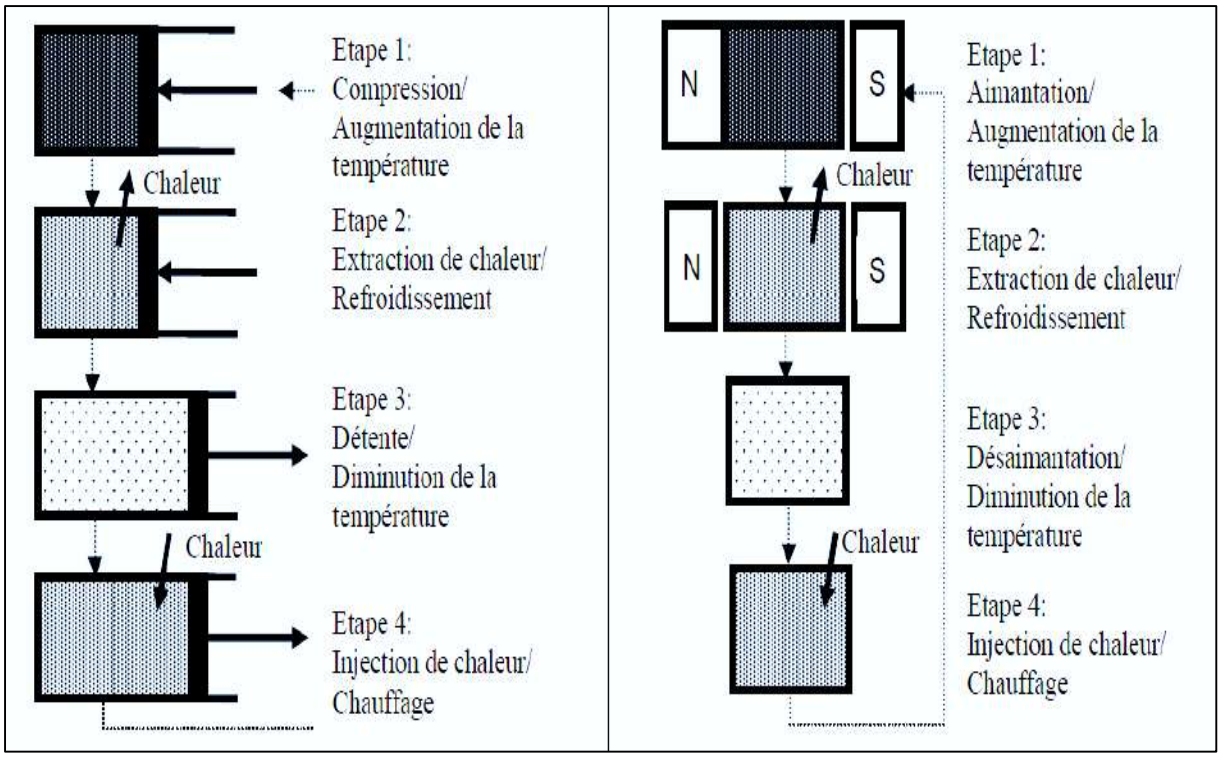


Fig. II.1 Analogie entre le cycle de la réfrigération conventionnel et le cycle de la réfrigération magnétique [26].

II.2.1 Présentation des cycles thermodynamiques appliqués à la RM

D'efférents cycles thermodynamiques de types idéaux sont connus, à titre d'exemple citons les processus de Carnot, Brayton et le cycle de réfrigération magnétique active(AMR).

II.2.1.1 Cycle réfrigération magnétique de Carnot

La Figure II.2 représente le schéma de base d'un réfrigérateur magnétique à régénération externe fonctionnant suivant le cycle Carnot. Il consiste en deux transformations isothermiques et deux transformations isentropiques [20]. Celles-ci sont définies comme suit :

- **1 →2 :** Aimantation isentropique, elle est due à l'application adiabatique du champ, par conséquent la température augmente jusqu'à T_H.
- **2 →3** : Dégagement de chaleur au niveau de la source chaude à la température T_H dénoté par Q_H, en magnétisant le réfrigérant d'une façon isotherme à la température T_H

- **3 →4** : Désaimantation isentropique, elle est due à l'enlèvement adiabatique du champ, par conséquent la température diminue jusqu'à T_C.
- **4 →1** : Absorption de chaleur au niveau de la source froide à la température T_C dénoté par Q_C,

En démagnétisant le réfrigérant d'une façon isotherme à la température T_C.

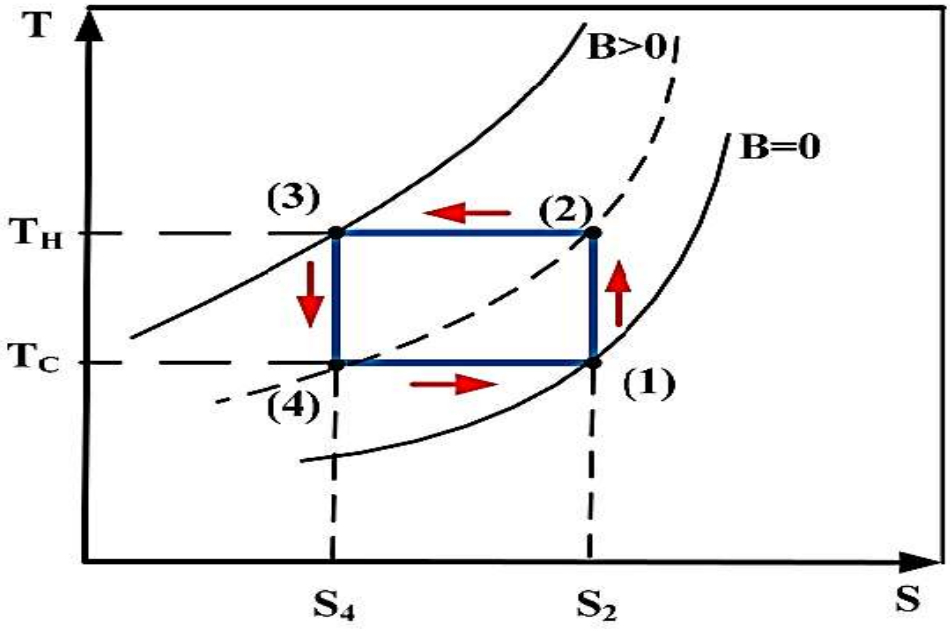


Fig. II.2 Cycle magnétique de Carnot. [20]

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

$$COP=\frac{1}{\frac{T_H}{T_C}-1} \qquad (II.1)$$

II.2.1.2 Cycle magnétique de Brayton

La figure II.3 représente le schéma de base d'un réfrigérateur magnétique à régénération externe fonctionnant suivant le cycle Brayton. Il consiste en deux transformations deux adiabatiques et deux transformations isochamps [20]. Les processus thermodynamiques de ce cycle sont définis comme suit :

- **1 →2 :** La chaleur est rejetée au niveau de la source chaude dénotée Q_H, dont l'expression estdonnée par la relation :

$$\mathbf{Q_H = -\int_{T_H}^{T_H+\Delta T(\Delta B,T_H)} c_B\ (B,T)dT} \quad \text{(II.2)}$$

- **3 →4 :** Démagnétisation adiabatique qui résulte de l'abaissement de la température du matériau magnétique dans le sens négatif de variation de température adiabatique ΔT (ΔB, T_C) et cela peut s'écrire comme suit :

$$\mathbf{S\ (0,\ T_C+\Delta T(\Delta B,T_C)) = S(B,T_C)} \quad \text{(II.3)}$$

- **4 →5 :** La chaleur est absorbée au niveau de la source froide Q_C

$$\mathbf{Q_C = \int_{T_C-\Delta T(\Delta B,T_C)}^{T_C} c_B\ (0,T)dT} \quad \text{(II.4)}$$

- 2 →3 : Transfert de chaleur entre le matériau magnétique et le fluide caloporteur.

$$\mathbf{Q_{rf} = \int_{T_H}^{T_C} c_B(B,T)dT} \quad \text{(II.5)}$$

- **5 →6 :** Transfert de chaleur entre le fluide caloporteur et le matériau magnétique.

$$\mathbf{Q_{fr} = \int_{T_C}^{T_H} c_B(0,T)dT} \quad \text{(II.6)}$$

- **6 →1 :** Magnétisation adiabatique qui résulte l'accroissement de la température de matériau magnétique dans le sens positif de variation de température adiabatique ΔT (ΔB, TH) et cela peut s'écrire comme suit :

$$\mathbf{S\ (0,}\boldsymbol{T_H}\mathbf{) = }\boldsymbol{S(B,T_H + \Delta T(\Delta B,T_H))} \quad \text{(II.7)}$$

Le premier principe de la thermodynamique est donné par l'expression suivante :

$$\boldsymbol{dU = \delta Q + \delta W} \quad \text{(II.8)}$$

Ainsi, pour une transformation cyclique, c'est-à-dire ; $dU = 0$ on peut définir l'expression du travail magnétique comme suit :

$$\mathbf{W} = -(\mathbf{Q_C} + \mathbf{Q_H} + \mathbf{Q_{rf}} + \mathbf{Q_{fr}}) \quad \text{(II.9)}$$

La performance de cycle de Brayton peut être calculée par la relation suivante :

$$\boldsymbol{COP} = \frac{Q_C}{W} \quad \text{(II.10)}$$

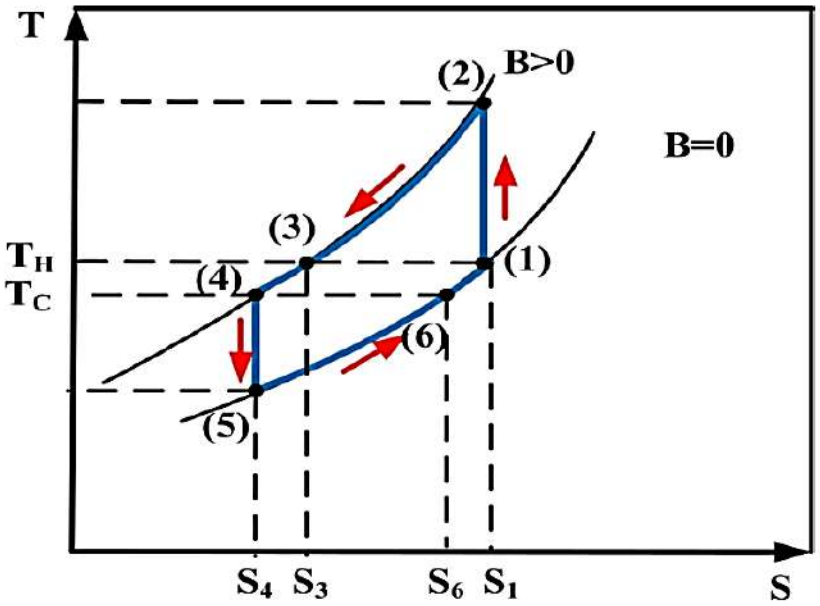


Fig. II.3 cycle magnétique de Brayton. [20]

II.2.1.3 Le cycle réfrigération magnétique active avec régénération (AMMR)

Le cycle AMRR est illustré dans les figures II.4, II.5 On considère un lit régénérateur composé de plaques de matériaux magnétocaloriques ayant initialement un profil de température quasi linéaire entre les deux réservoirs chaud et froid [6]. L'AMRR comporte quatre étapes qui sont :

- Aimantation du matériau. La température augmente alors tout le long du lit régénérateur par effet magnétocalorique. La température du matériau, côté chaud, devient supérieure à celle du réservoir chaud.

- Ecoulement du fluide du réservoir froid vers le réservoir chaud. Ceci conduit la température du lit à baisser au contact du fluide initialement froid (venant du réservoir froid). Quant au fluide, il va voir sa température augmenter. Durant cette étape, le lit rejette sa chaleur au fluide et si cette phase est suffisamment longue, le matériau revient à sa température initiale.
- Désaimantation du matériau entraînant une baisse de sa température.
- Ecoulement en sens inverse du fluide du réservoir chaud vers le réservoir froid.

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

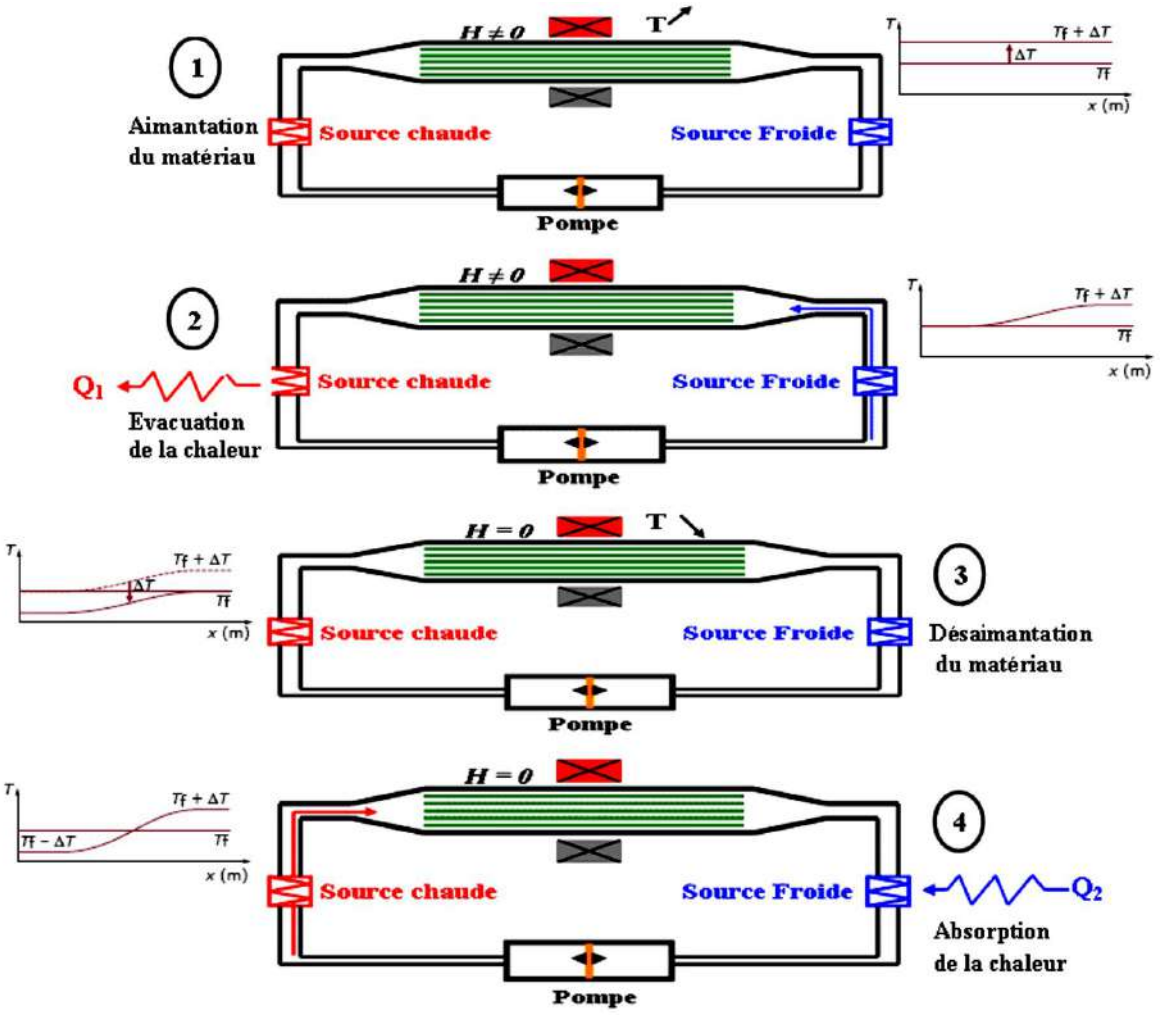


Fig. II.4 Principe de la réfrigération magnétique par un cycle AMRR.[6]

L'efficacité du cycle de réfrigération magnétique active est donnée par la relation suivant :

$$\mathbf{COP} = \frac{\mathbf{Q_C}}{\dot{\mathbf{W}}_{\mathbf{mag}} + \dot{\mathbf{W}}_{\mathbf{p}} + \dot{\mathbf{W}}_{\mathbf{F}}} \quad \text{(II.11)}$$

Avec :

$\dot{\mathbf{W}}_{\mathbf{mag}}$**:** La puissance magnétique

$\dot{\mathbf{W}}_{\mathbf{p}}$ **:** la puissance fourni par la pompe

$\dot{\mathbf{W}}_{\mathbf{F}}$ **:** Les pertes dus aux courants de Foucault

$\mathbf{Q_C}$ **:** La puissance frigorifique

On a :

$$\dot{\mathbf{W}}_{\mathbf{mag}} = \int \vec{\mathbf{F}}.\overrightarrow{\mathbf{dl}} \quad \text{(II.12)}$$

$$\dot{\mathbf{W}}_{\mathbf{p}} = \mathbf{V}\frac{\Delta \mathbf{P}}{\eta \mathbf{p}} \quad \text{(II.13)}$$

$$\mathbf{Q_C} = \dot{\mathbf{m}}_{\mathbf{f}}\mathbf{c}_{\mathbf{f}}\left(\mathbf{T_H} - \overline{\mathbf{T}}_{\mathbf{C,H}}\right) \quad \text{(II.14)}$$

$$\overline{\mathbf{T}}_{\mathbf{C,H}} = \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{t}}\int_{\mathbf{1}}^{\mathbf{T}} \mathbf{T}(\mathbf{x} = \mathbf{L}, \mathbf{t})\,\mathbf{dt} \quad \text{(II.15)}$$

II.3 Etude du cycle réfrigération magnétique d'Ericsson

Le cycle de réfrigération magnétique d'Ericsson l'un des cycles de réfrigération important. Il tient son nom de leur inventeur John Ericsson.

Le cycle d'Ericsson est constitué de deux processus isothermes (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. [9]

II.3.1 Description du cycle réfrigération magnétique d'Ericsson

C'est un cycle facile à opérer, la figure II.6 illustre les différentes étapes du cycle d'Ericsson.

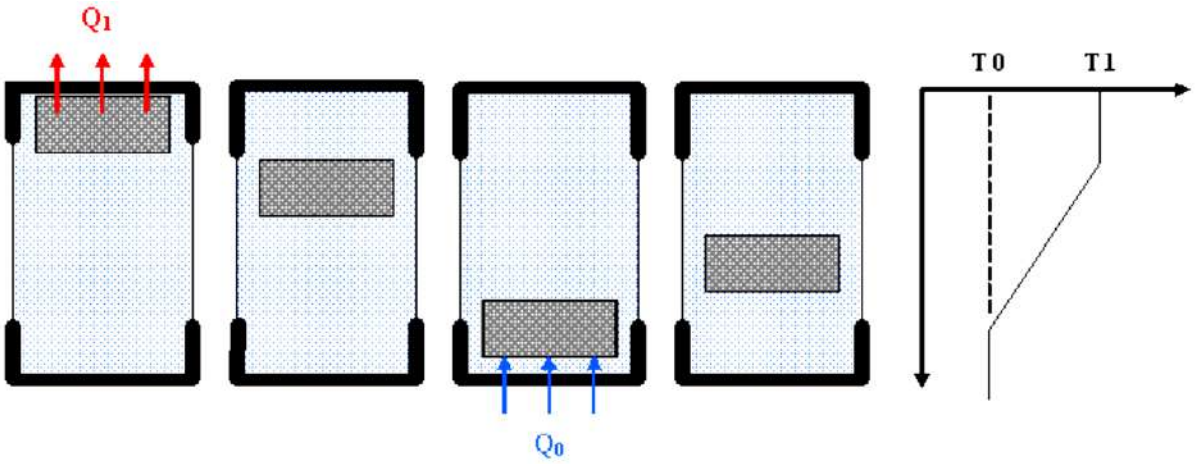


Fig. II.5 Principe du cycle d'Ericsson [6]

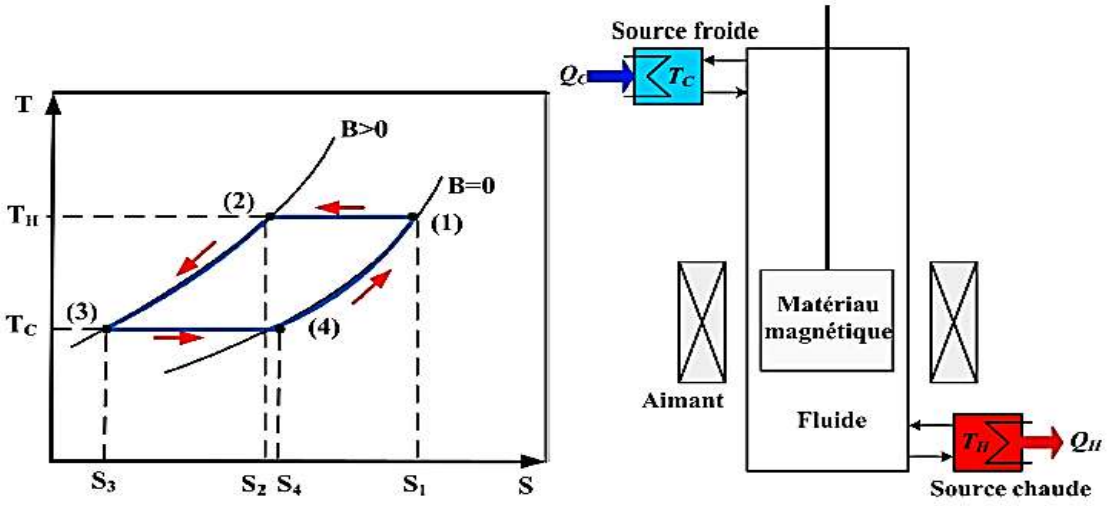


Fig. II.6 Le cycle magnétique d'Ericsson. [20]

La figure II.7 représente le schéma de base d'un réfrigérateur magnétique à régénération externe fonctionnant suivant le cycle d'Ericsson. Il consiste en deux transformations isothermiques et deux transformations iso champs. [20] Celles-ci sont définies comme suit :

- Aimantation isotherme, le matériau étant à la basse position, où il peut rejeter la quantité de chaleurQ_H, à la source chaude de températureT_H.
- Refroidissement à champ constant, le contenant du fluide caloporteur se déplace vers le bas en soustrayant de la chaleur du matériau, jusqu'à ce que sa température devienne égale à T_C.
- Désaimantation isotherme, le matériau étant à la haute position, où il peut absorber la quantité de chaleur TC de la source froide à la température TC.
- Réchauffement à champ nul, le contenant remonte vers le haut en cédant de la chaleur au matériau, jusqu'à ce que sa température devienne égale à T_H. [20]

II.3.2 Analyse du cycle de réfrigération magnétique d'Ericsson

Le coefficient de performance du cycle d'Ericsson est défini par le rapport

$$\mathbf{COP} = \frac{\mathbf{Q_c}}{\mathbf{W_{mag}} + \mathbf{T_H}.\Delta\mathbf{S_{Irr}}} \quad \text{(II.16)}$$

Où :

$\boldsymbol{\Delta S_{Irr}}$ **:** est la génération d'entropie.

$\boldsymbol{W_{mag}}$ **:** est le travail magnétique

$$\mathbf{W_{mag}} = \mathbf{Q_H} - \mathbf{Q_C} \quad \text{(II.17)}$$

D'autre part, on a :

$$\mathbf{Q_C} = \mathbf{T_C}\Delta\mathbf{S_C} \quad \text{(II.18)}$$

$$\mathbf{Q_H} = \mathbf{T_H}\Delta\mathbf{S_H} \quad \text{(II.19)}$$

Où :

$\boldsymbol{\Delta S_C}$ **:** les changements d'entropie isothermes produits froides.

$\boldsymbol{\Delta S_H}$ **:** les changements d'entropie isothermes produits sources et chaudes.

En pratique, tous les cycles sont irréversibles car n'existe pas de transformation sans production d'entropie (pertes thermiques) ce qui permet d'écrire d'après le deuxième principe de la thermodynamique l'inégalité

$$\mathbf{\Delta S_H \geq \Delta S_C} \tag{II.20}$$

Où :

$$\mathbf{\Delta S_H = \Delta S_C + \Delta S_{Irr}} \tag{II.21}$$

L'expression du coefficient de performance suivant le cycle d'Ericsson devient :

$$\mathbf{COP = \frac{T_C\,\Delta S_C}{T_H\,\Delta S_H - T_C\,\Delta S_C + \Delta S_{Irr}}} \tag{II.22}$$

Pour une transformation réversible, i.e. $\boldsymbol{\Delta S = C_{ste}}$, le $\boldsymbol{COP}$ d'Ericsson devient égale à celui de cycle de Carnot :

$$\mathbf{COP = \frac{T_C}{T_H - T_C}} \tag{II.23}$$

Le rendement de cycle magnétique d'Ericsson :

$$\mathbf{\eta = \frac{COP_{Ericsson}}{COP_{Carnot}}} \tag{II.24}$$

CHAPITRE III:

RÉSULTAT S

ET

DISCUSSION

III.1 Introduction

Dans ce chapitre en présente les résultats des études numériques de la théorie du champ moléculaire appliquée sur les matériaux : Gadolinium ; Terbium ; Dysprosium ; Erbium, et les alliages ($Gd1_{-x}$ Tb_x ; Gd_{1-x} Dy_x ; Gd_{1-x} Er_x). Les courbe d'évolutions de l'effet magnétocalorique, la chaleur spécifique (électronique ; magnétique ; réseau et total), l'entropie (électronique ; magnétique ; réseau et total), et la variation d'entropie magnétique ont été étudiée en fonction de la température et les matériaux avec le champ magnétique applique défirent et nous allons. Et à la fin en étudier le cycle réfrigération magnétique d'Ericsson.

III.2 Définition

- **Le gadolinium**

Est un élément chimique, de symbole Gd et de numéro atomique 64. Le gadolinium est un métal faisant partie les terres rares. Il est gris argent, malléable et ductile à la température ambiante. C'est l'élément de référence pour les études sur l'EMC et la RM. [27]

- **Le terbium**

Est un élément chimique, de symbole Tb et de numéro atomique 65. C'est un métal gris argenté de la série des lanthanides appartenant au groupe des terres rares. [27]

- **Le dysprosium**

Est un élément chimique, de symbole Dy et de numéro atomique 66. le Dysprosium appartient à la famille des terres rares (lanthanides + scandium + yttrium), d'aspect gris argenté. Il est malléable, ductile et assez mou pour être coupé avec un couteau. Il est assez stable dans l'air. [27]

- **L'erbium**

Est un élément chimique de symbole Er et de numéro atomique 68. Comme la plupart des autres lanthanides, il est de couleur gris argent, malléable et ductile à température ambiante. Il s'oxyde peu dans l'air sec. [27]

III.3 Calcul propriétés magnétique des matériaux magnétocaloriques

Dans cette section nous allons appliquer l'étude théorique basée sur la théorie de champ moléculaire (MFT) et développée précédemment chapitre I sur du Gd, Tb, Dy, Er. Le tableau III.1 donne les différents paramètres utilisés dans le modèle pour calculer les propriétés magnétocalorique :

	T_D [K]	T_C [K]	G_j [-]	J_I [-]	MM [Kg/mol]	H [T]	K_B [J/k]	T_0 [K]	T_F [K]
Gd 	184	293	2	3.5	0.157	1.5	$1.380662\ 10^{-23}$	10	400
Tb 	177	220.6	1.5	6	0.158	1.5	$1.380662\ 10^{-23}$	10	400
Dy 	179	180	1.33	7.5	0.162	1.5	$1.380662\ 10^{-23}$	10	400
Er 	192	85	1.2	7.5	0.167	1.5	$1.380662\ 10^{-23}$	10	400

Tableau III.1 Les propriétés magnétiques des matériaux magnétiques. [25]

1er Cas

Dans le première cas nous allons appliquer l'étude théorique basée sur la théorie de champ moléculaire (MFT) et développée précédemment chapitre **I** sur du Gd (exemple), 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.

Et pour les autres matériaux est-ce la même.

Les courbes représentées sur la figure III.1 montrent la chaleur spécifique électronique et l'entropie électronique prédites à l'aide de la théorie du champ moléculaire (MFT) décrite dans le première chapitre pour un matériau magnétocalorique (Gd), en fonction de la température et la valeur de champ magnétique (H=1.5T).Donc en remarque les courbes est augmenté avec l'augmentation de température.

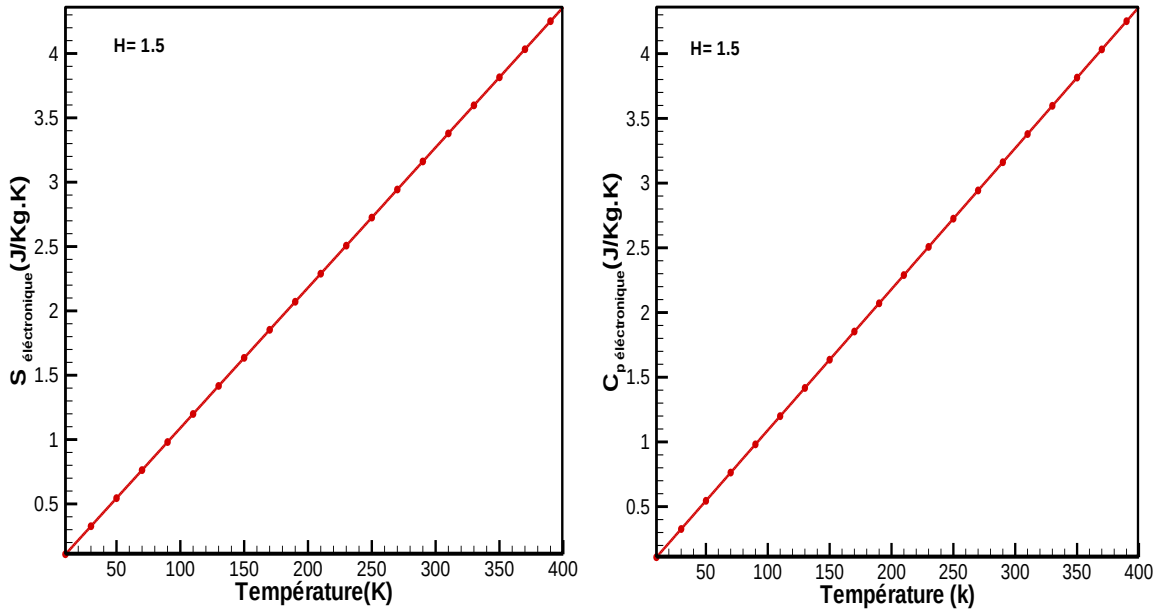


Fig. III.1 Evolution de la chaleur spécifique électronique et l'entropie électronique de Gd en fonction de Température.

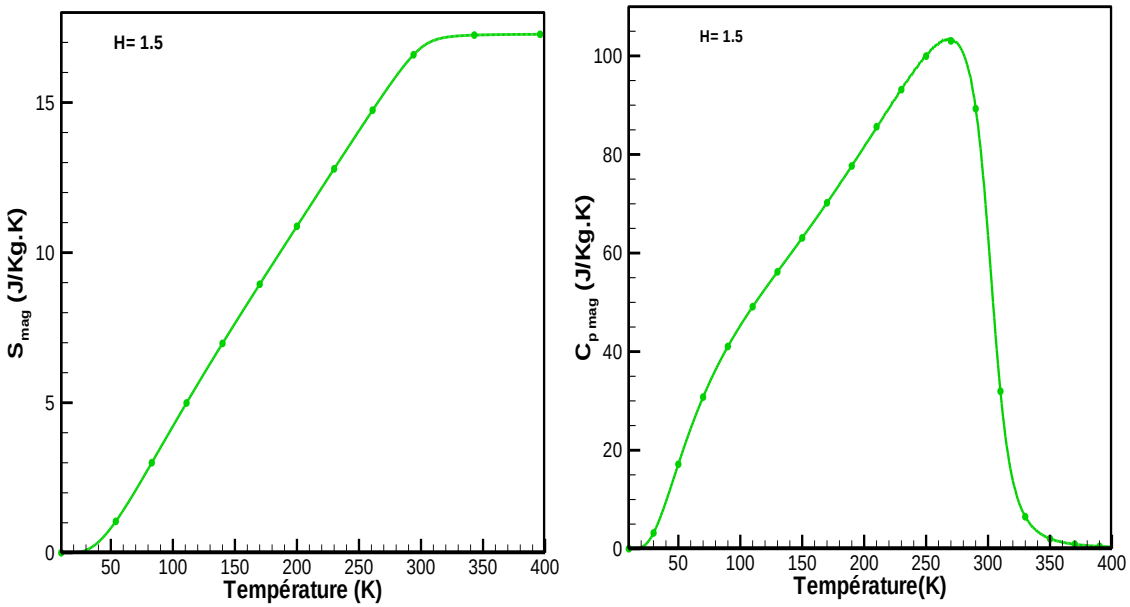


Fig. III.2 Evolution de l'entropie magnétique et de la chaleur spécifique magnétique en fonction de Température

Les courbes représentées sur la figure III.2 montrent la chaleur spécifique magnétique et l'entropie magnétique prédit à l'aide de la théorie du champ moléculaire (MFT) décrite dans le deuxième chapitre pour un matériau magnéto calorique (Gd). En fonction de la température et la valeur de champ magnétique (H=1.5T).Donc en remarque la courbe $Cp_{magnétique}$ est augmenté 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 $_{\text{magnétique}}$ =0 J/Kg. K. Et le 2eme courbe S $_{\text{magnétique}}$ est augmenté avec l'augmentation de température jusqu'à atteindre son maximum au voisinage de point de curie T=293 K et à la fin le courbe est stable au voisinage de la S $_{\text{magnétique}}$ =17 J/Kg.K.

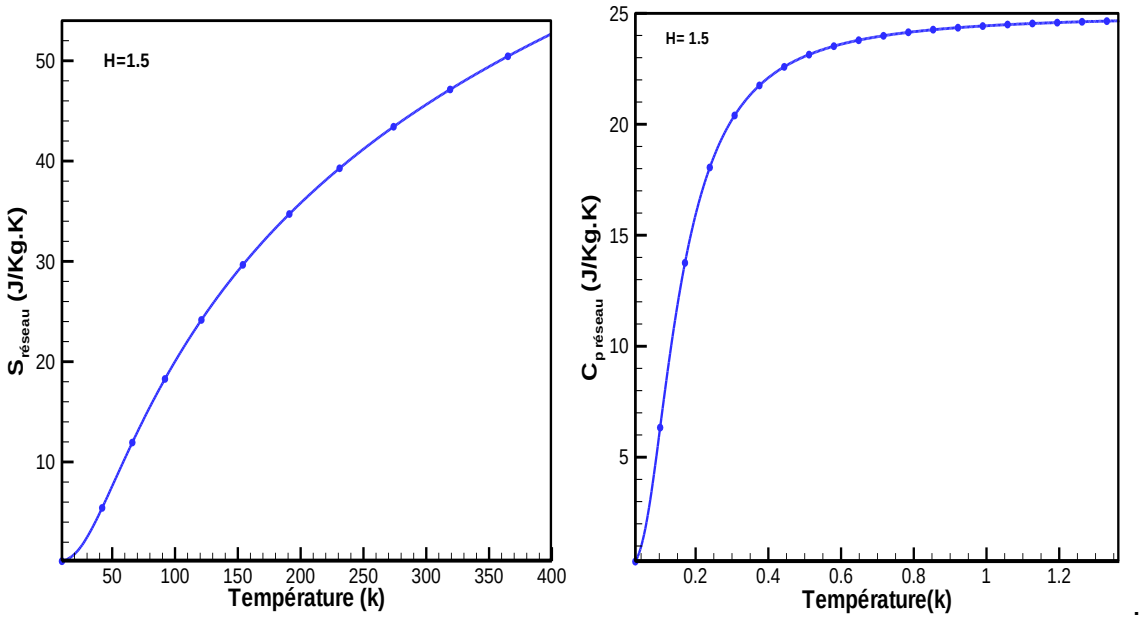


Fig. III.3 Evolution de l'entropie du réseau et la chaleur spécifique du réseau en fonction de Température.

En remarque les courbes représentées sur la figure III.3 montrent la chaleur spécifique du réseau et l'entropie du réseau prédites à l'aide de la théorie du champ moléculaire (MFT) décrite dans le deuxième chapitre pour un matériau magnétocalorique Gd, en fonction de la température et la valeur de champ magnétique (H=1.5T).Donc en remarque la courbe Cp $_{\text{Réseau}}$ est augmenté avec l'augmentation de température puis la courbe est presque stable. Et la 2eme courbe S $_{\text{Réseau}}$ est augmenté avec l'augmentation de température.

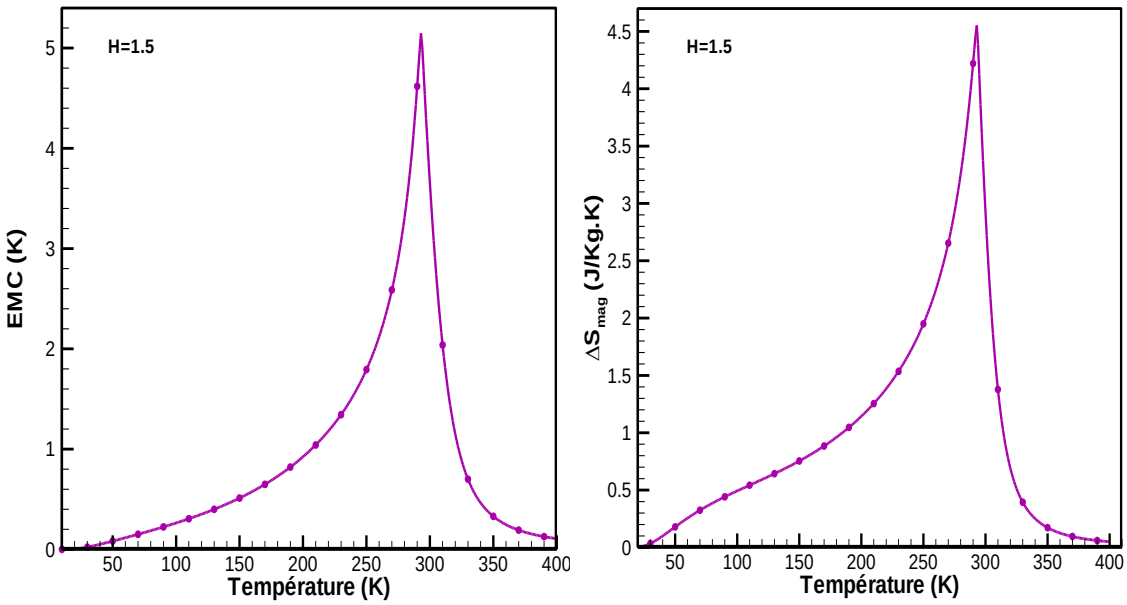


Fig. III.4 Evolution d'EMC et la variation d'entropie magnétique en fonction de Température.

Les courbes représentées sur la figure III.4 montrent la chaleur spécifique magnétique et l'entropie magnétique prédites à l'aide de la théorie du champ moléculaire (MFT) d'écrite dans le deuxième chapitre pour un matériau magnétocalorique (Gd). En fonction de la température et la valeur de champ magnétique (H=1.5T).Donc en remarque la courbe EMC est augmenté avec l'augmentation de température jusqu'à atteindre son maximum au voisinage de point de curie (T=293K, EMC=5K) et diminue avec l'augmentation de la température. Et le 2eme courbe $\Delta S_{magnétique}$ est augmenté 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).Et diminue avec l'augmentation de la température.

La figure III.5 montre la chaleur spécifique magnétique et l'entropie magnétique prédites à l'aide de la théorie du champ moléculaire (MFT) décrite dans le deuxième chapitre pour un matériau magnétocalorique Gd. En fonction de la température et la valeur de champ magnétique (H=1.5T).Donc en remarque la courbe Cp_{total} est augmenté avec l'augmentation de température jusqu'à atteindre son maximum au voisinage de point de curie (T=293K, EMC=5K) et diminue avec l'augmentation de la température jusqu'à atteindre son maximum au voisinage (T=300K) et puis il est presque stable. Et la 2eme courbe S_{total} est augmenté avec l'augmentation de température.

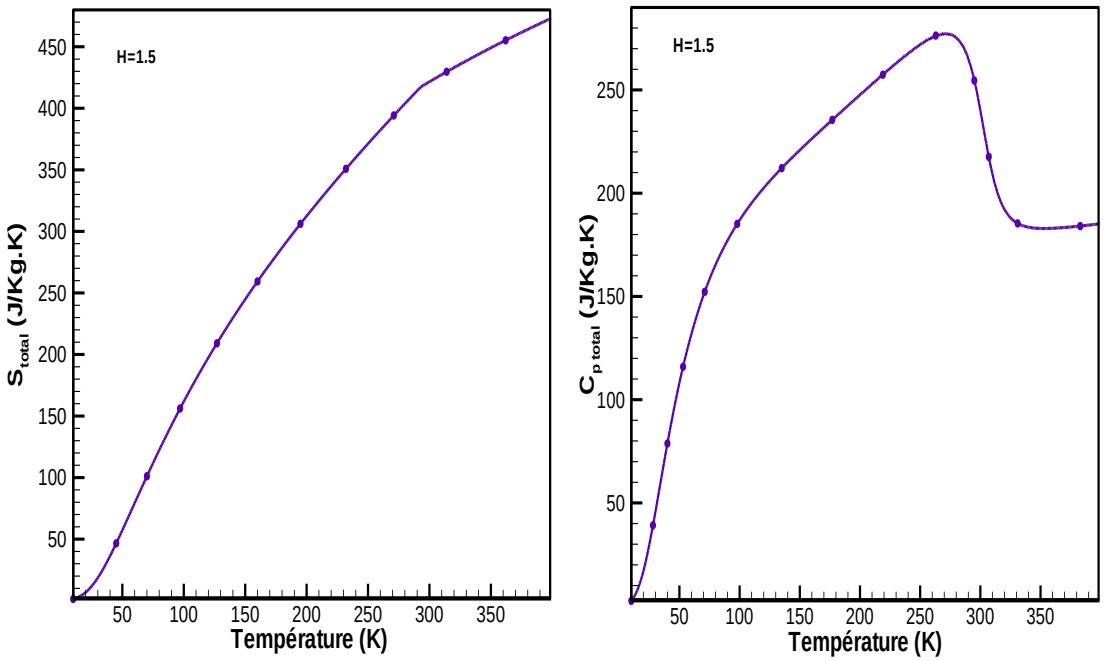


Fig. III.5 Evolution de l'entropie total et la chaleur spécifique total en fonction de Température.

2eme Cas

Dans le 2eme cas nous allons appliquer l'étude théorique basée sur la théorie de champ moléculaire (MFT) et développée précédemment (chapitre I) sur du Gd, les courbe d'évolutions de l'effet magnétocalorique, la chaleur spécifique ($Cp_{magnétique}$ et Cp_{total}) l'entropie($S_{magnétique}$ et S_{total}), et la variation d'entropie magnétique ont été étudiée en fonction de la température et des différente valeurs de champ magnétique (0T<H<1.5T).

Dans la figure III.6 représentées les courbes de Cp_{total} et l'entropie total en fonction de température et différentes valeurs de champ magnétique (0T >H>1.5T). Montrent la chaleur spécifique magnétique et l'entropie magnétique prédites à l'aide de la théorie du champ moléculaire (MFT) décrite dans le premier chapitre pour un matériau magnétocalorique Gd. Donc en remarque la courbe Cp_{total} et (H=1.5)est augmenté 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 jusqu'à atteindre son maximum au voisinage de point de curie(T=293K) , en puis est augmenté la courbe. Et dans le 2eme courbe le S_{total} dans le H=1.5TetH=0T est convergent et augmente avec l'augmentation de température.

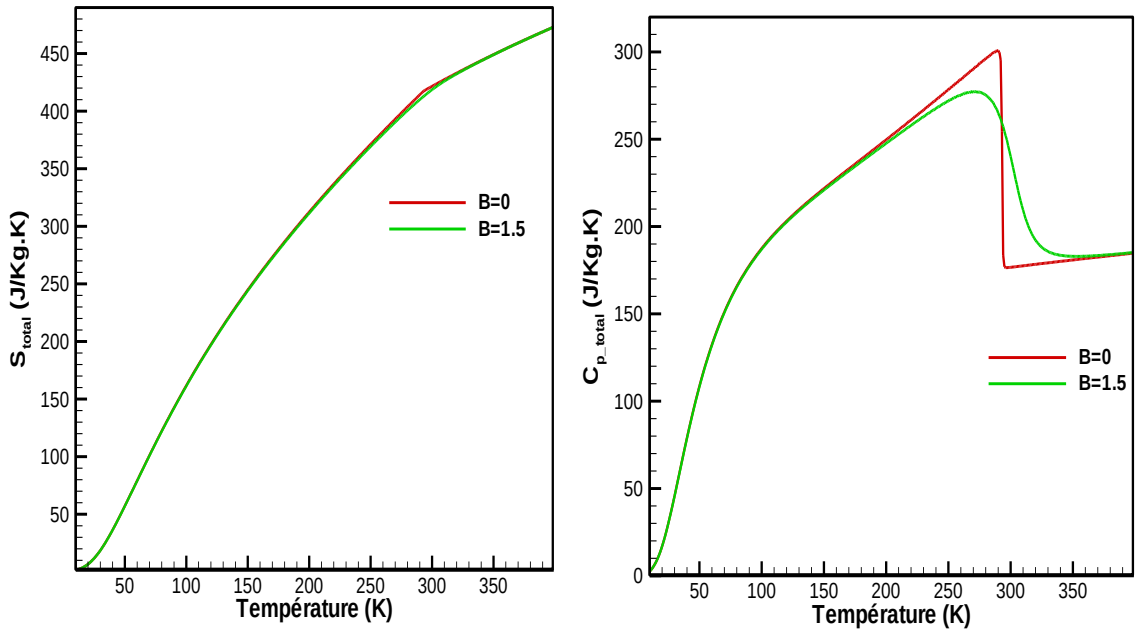


Fig. III.6 Evolution de la chaleur spécifique total et l'entropie total en fonction de Température.

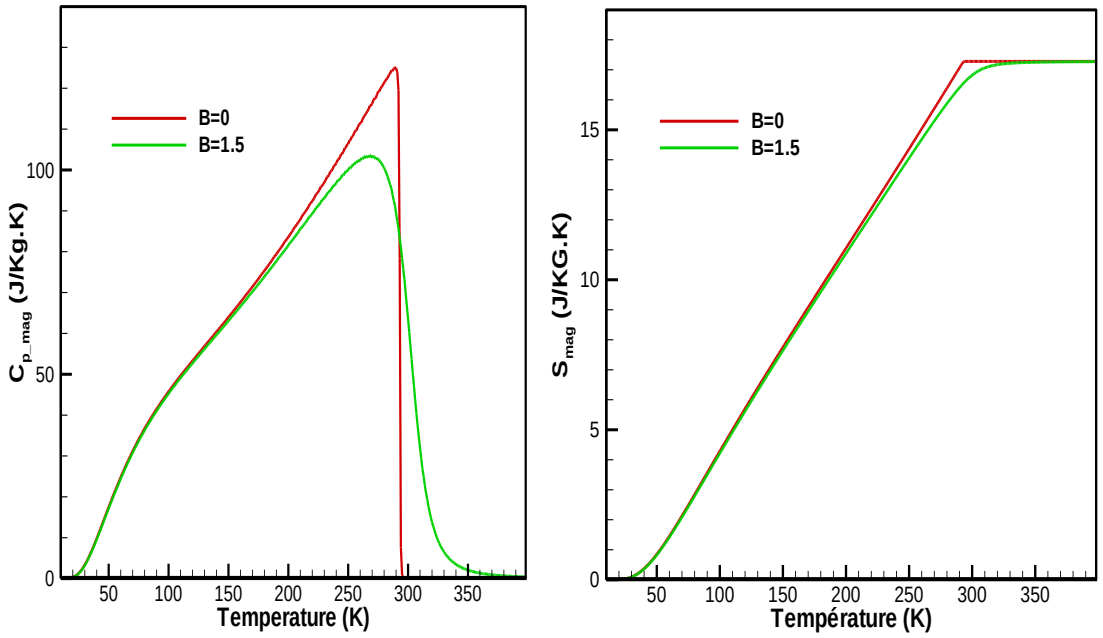


Fig. III.7 Evolution de la chaleur spécifique magnétique et l'entropie magnétique en fonction de Température.

Dans la figure III.7 représentées les courbes de l'entropie total et la chaleur spécifique en fonction de température et différentes valeurs de champ magnétique (0T >H>1.5T). Le 1er montre l'évolution de la chaleur spécifique de Gd en fonction de la température sous 0 et 1.5 T. on remarque bien le changement brutal de la chaleur spécifique au voisinage de 293 K. Cette transformation est due au changement de phase de l'état

Ferromagnétique à l'état paramagnétique. En revanche, sous un champ de 1.5 T la transition de la chaleur spécifique au voisinage de la température de Curie est moins brutale. Et dans le 2eme courbe le S $_{magnétique}$ dans le H=1.5TetH=0T est convergent et augmente avec l'augmentation de température jusqu'à atteindre son maximum au voisinage de point de curie (T=293K), et stable en T=293K jusqu'à T=450K.

3eme Cas

Dans le troisime cas nous allons appliquer l'étude théorique basée sur la théorie de champ moléculaire (MFT) et développée précédemment (chapitre I) sur du Gd, Tb, Dy, Er, les courbe d'évolutions de l'effet magnétocalorique (EMC), 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 et des différente valeurs de champ magnétique (0T<H<1.5T).

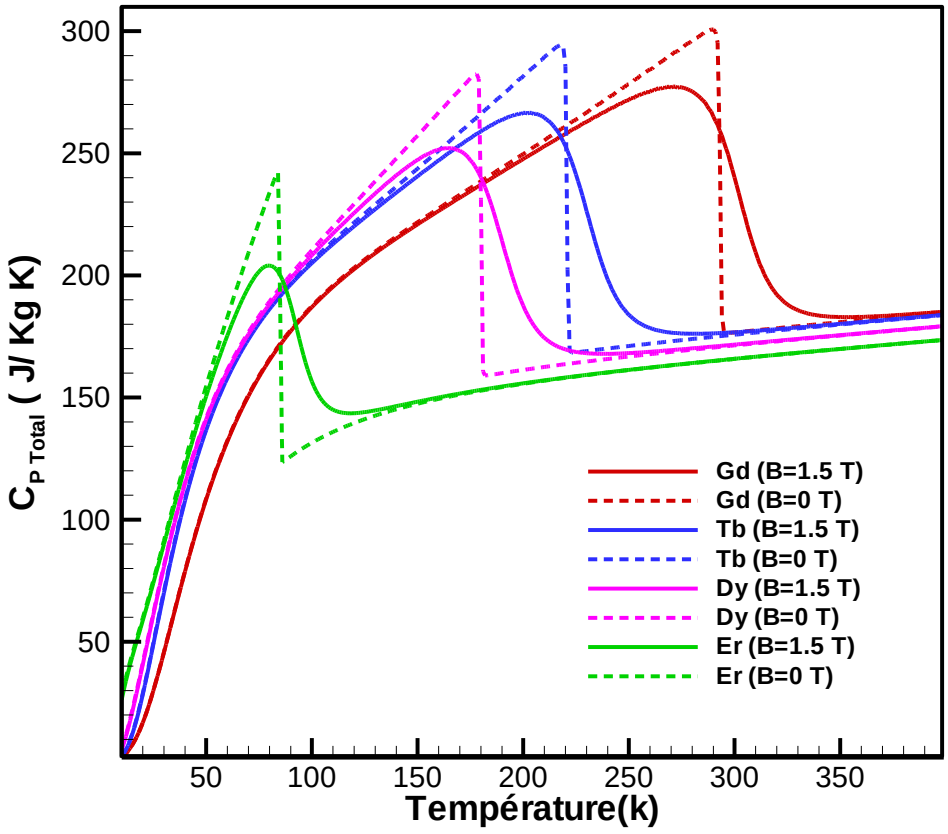


Fig. III.8 Evolution de la chaleur spécifique total en fonction de Température.

On remarque sur la figure III.8 la variation de $C_{p\ totale}$ en fonction de la température en applique sur les quatre matériaux (Gd, Tb, Dy, Er) avec différente valeurs de champ

magnétique (0T<H<1.5T), la chaleur spécifique augmente avec l'augmentation de la température jusqu'à atteindre son maximum au voisinage de température de curie pour chaque matériaux, et diminue avec l'augmentation de la température, mais le matériau de Gadolinium est amiaulé le $C_{p\ total}$ par rapport les autres matériaux. Et aussi en remarque les courbe est varié par rapport les différente valeurs de champ magnétique et en déduire la valeur de champ magnétique démuni donc la chaleur spécifique total est augmenté. On conclut lorsque le champ magnétique a diminué la chaleur spécifique est augmenté alors, il y a une symétrie directe.

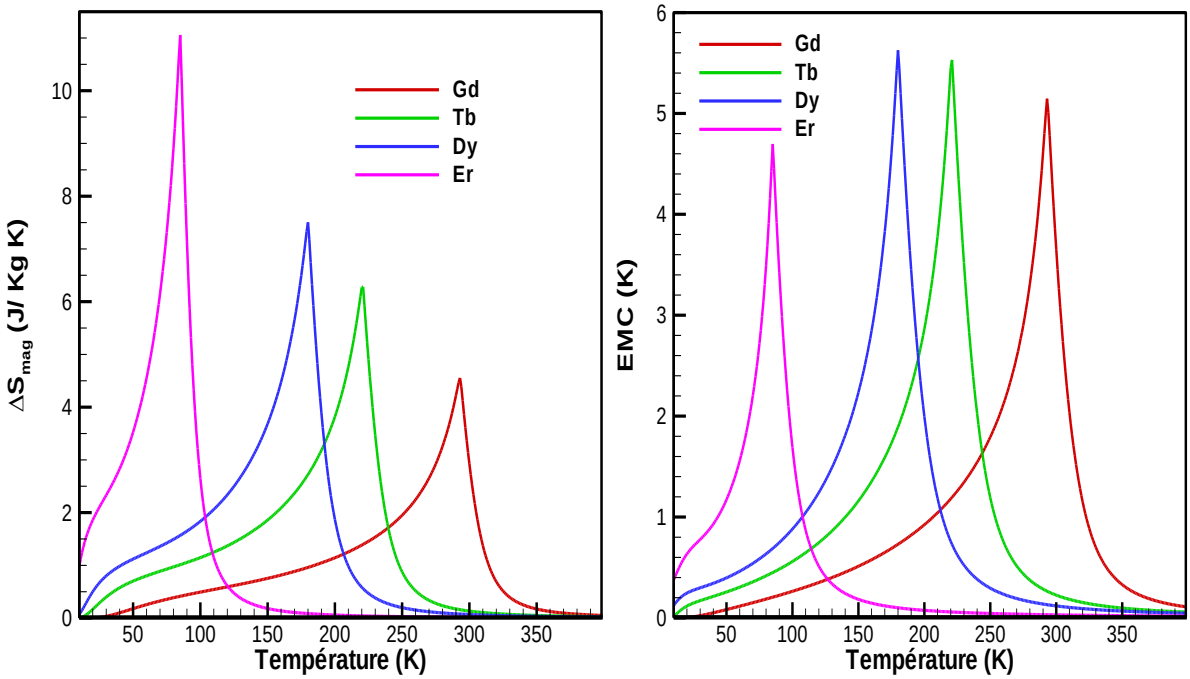


Fig. III.10 La variation d'entropie magnétique et de l'effet magnétocalorique en fonction de la température.

Les courbes représentées sur la figure III.10 montrent l'effet magnétocalorique et la variation d'entropie magnétique prédites à l'aide de la théorie du champ moléculaire (MFT) décrite dans le 1^{ere} chapitre pour le champ magnétique (H=1.5T), en fonction de la température et différentes les matériaux (Gd, Tb, Dy, Er). Nous avons remarqué une plusieurs point intersection entre les courbes, et l'entropie magnétique augmente avec l'augmentation de la température jusqu'à atteindre son maximum au voisinage de température de curie pour chaque matériaux et diminue avec l'augmentation de la température.

Pour les matériaux magnétocalorique, en fonction de la température, obtenue à champ magnétique constante .ces graphes présentent une transition de phase de l'état

ferromagnétique vers l'état paramagnétique au voisinage du point de curie Tc de chaque matériaux avec une évolution proportionnelle suivant l'accroissement du champ magnétique applique. Et en remarque l'effet magnétocalorique augmente avec l'augmentation de la température jusqu'à atteindre son maximum au voisinage de température de curie pour chaque matériau, et diminue avec l'augmentation de la température. Et des plusieurs point intersection entre les courbes.

III.4 Calcul propriétés magnétique des alliages magnétocaloriques

Les éléments de terres rares sont des éléments incontournables pour les applications dans la réfrigération magnétique. Le gadolinium métal est le matériau de référence pour les réfrigérants magnétiques, avec une température de Curie de 293 K. Les autres terres rares présentent des températures de transition inférieures à la température ambiante (Tableau III.1). Elles peuvent être utilisées comme des éléments de substitution au gadolinium afin de diminuer son point de Curie et de couvrir ainsi une large zone de température.

Le calcul de l'effet magnétocalorique dans les alliages binaires en particulier $Gd_{1-x}Tb_x$, $Gd_{1-x}Dy_x$, $Gd_{1-x}Er_x$ s'opère comme pour le gadolinium en utilisant les modèles du champ moléculaire et de Smart. Les paramètres comme le facteur de Landé ou encore le moment angulaire total des alliages binaires peuvent être calculés à partir des paramètres individuels de Gd et Tb, Dy, Er sur une base du modèle de Gennes.

Dans ce cas :

$$\mathbf{G_{Gd_Tb} = (1 - x)G_{Gd} + xG_{Tb}} \quad \text{(III.1)}$$

Le facture de Gennes est donne par

$$\mathbf{G = \left(g_J - 1\right)^2 J(J + 1)} \quad \text{(III.2)}$$

Et :

La température de Curie obéit à la loi :

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

Dans cette section nous allons appliquer l'étude théorique basée sur la théorie de champ moléculaire (MTF) sur des substitutions du gadolinium par du terbium, du dysprosium, du Erbium qui déplacent les températures de Curie. Les tableaux (III.2 ;

III.3 ; III.4) donne les différents paramètres utilisés dans le modèle pour calculer les propriétés magnétocalorique

$Gd_{1-x}Tb_x$

$Gd_{1-x}_Tb_x$	$g_{J\ Gd_Tb}$ [-]	J_{Gd_Tb} [-]	G_{Gd} [-]	G_{Tb} [-]	G_{Gd_Tb} [-]	T_c [K]	MM_{Gd_Tb} [Kg/mol]	$T_{D\ Gd_Tb}$ [K]
$Gd_{0,9}_Tb_{0,1}$	1,95	3,75	15,75	10,5	15,225	282,572156	0,1571	183,3
$Gd_{0,8}_Tb_{0,2}$	1,9	4	15,75	10,5	14,7	276,038328	0,1572	182,6
$Gd_{0,7}_Tb_{0,3}$	1,85	4,25	15,75	10,5	14,175	269,426232	0,1573	181,9
$Gd_{0,6}_Tb_{0,4}$	1,8	4,5	15,75	10,5	13,65	262,731976	0,1574	181,2
$Gd_{0,5}_Tb_{0,5}$	1,75	4,75	15,75	10,5	13,125	255,95132	0,1575	180,5
$Gd_{0,3}_Tb_{0,6}$	1,7	5	15,75	10,5	12,6	249,07962	0,1576	179,8

Tableau III.2 Les propriétés magnétiques de l'alliage $Gd_{1-x}Tb_x$

$Gd_{1-x}Dy_x$

$Gd_{(1-x)}_Dy_x$	$g_{J\ Gd_Dy}$ [-]	J_{Gd_Dy} [-]	G_{Gd} [-]	G_{Dy} [-]	G_{Gd_Dy} [-]	T_c [K]	MM_{Gd_Dy} [Kg/mol]	$T_{D\ Gd_Dy}$ [K]
$Gd_{0,9}_Dy_{0,1}$	1,933	3,9	15,75	6,942375	14,8692375	278,152925	0,1575	183,5
$Gd_{0,8}_Dy_{0,2}$	1,866	4,3	15,75	6,942375	13,988475	267,057479	0,158	183
$Gd_{0,7}_Dy_{0,3}$	1,799	4,7	15,75	6,942375	13,1077125	255,726521	0,1585	182,5
$Gd_{0,6}_Dy_{0,4}$	1,732	5,1	15,75	6,942375	12,22695	244,138678	0,159	182
$Gd_{0,5}_Dy_{0,5}$	1,665	5,5	15,75	6,942375	11,3461875	232,268939	0,1595	181,5
$Gd_{0,4}_Dy_{0,6}$	1,598	5,9	15,75	6,942375	10,465425	220,087686	0,16	181

Tableau III.3 : Les propriétés magnétiques de l'alliage $Gd_{1-x}Dy_x$

$Gd_{1-x}Er_x$

$Gd_{1-x}_Er_x$	$g_{J\ Gd_Er}$ [-]	J_{Gd_Er} [-]	G_{Gd} [-]	G_{Er} [-]	G_{Gd_Er} [-]	T_c [K]	MM_{Gd_Er} [Kg/mol]	$T_{D\ Gd_ER}$ [K]
$Gd_{0,9}_Er_{0,1}$	1,92	3,9	15,75	2,55	14,43	272,647834	0,158	184,8
$Gd_{0,8}_Er_{0,2}$	1,84	4,3	15,75	2,55	13,11	255,756272	0,159	185,6
$Gd_{0,7}_Er_{0,3}$	1,76	4,7	15,75	2,55	11,79	238,28701	0,16	186,4
$Gd_{0,6}_Er_{0,4}$	1,68	5,1	15,75	2,55	10,47	220,151823	0,161	187,2
$Gd_{0,5}_Er_{0,5}$	1,6	5,5	15,75	2,55	9,15	201,235792	0,162	188
$Gd_{0,3}_Er_{0,6}$	1,52	5,9	15,75	2,55	7,83	181,384013	0,163	188,8

Tableau III.4 Les propriétés magnétiques de l'alliage $Gd_{1-x}Er_x$

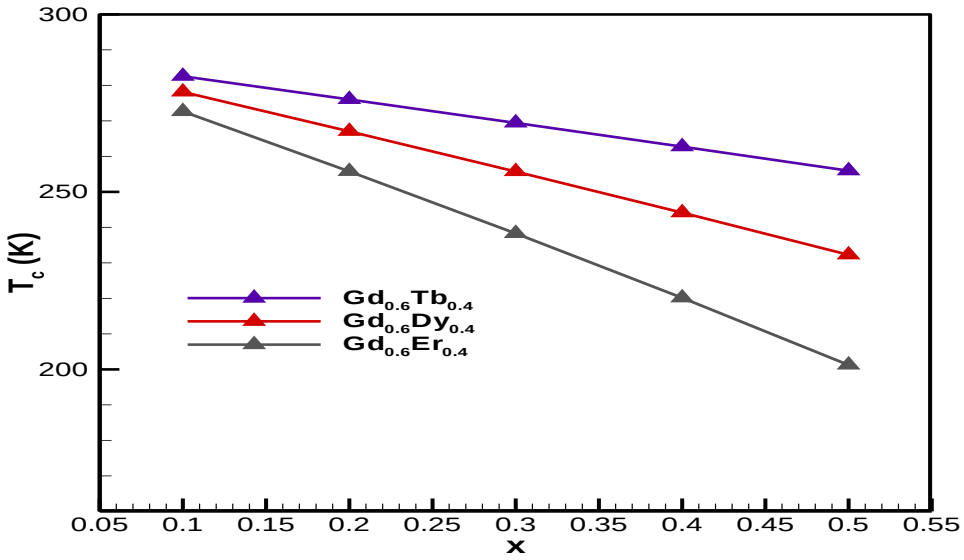


Fig. III.11 Températures de Curie en fonction de la concentration en (Tb, Dy, Er) x dans $Gd_{1-x}Tb_x$, $Gd_{1-x}Dy_x$, $Gd_{1-x}Er_x$

La figure III.11 représenté la température de curie T_c en fonction de la concentration x pour différents alliages la température de curie dépend linéairement de la concentration de Gd et la pente caractérise la nuance du substitué. Les alliages $Gd_{1-x}Er_x$ présentent la pente la plus élevée, cela signifie que leur température de curie est très sensible à la quantité d'Er substituée. En effet 10% d'Er permet d'obtenir une température de curie de 272K, alors qu'il faut 20% de Dy et plus de 30% de Tb pour obtenir le même effet.

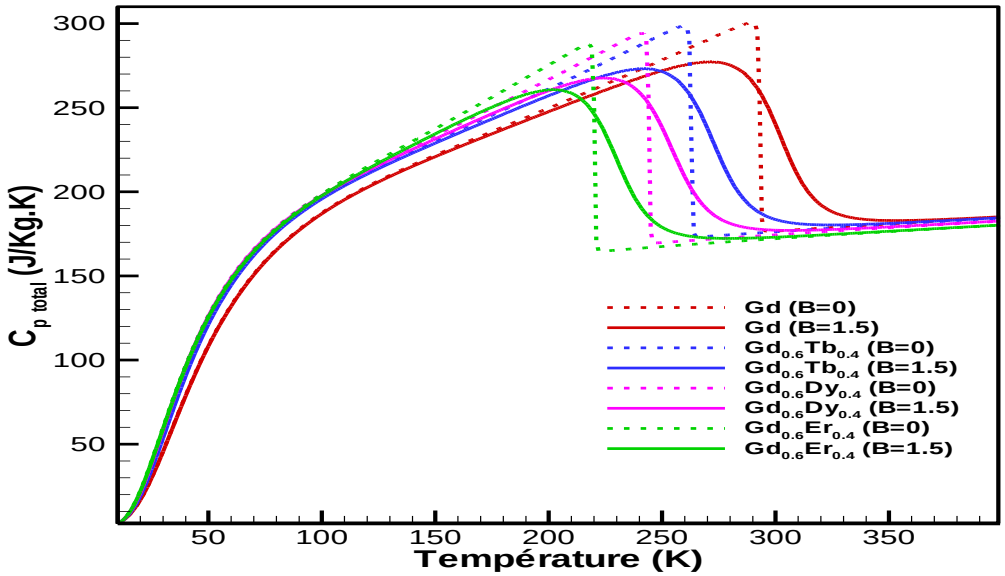


Fig. III.12 Evolution de la chaleur spécifique total en fonction de Température pour le Gd et les alliages $Gd_{0,6}Tb_{0,4}$, $Gd_{0,6}Dy_{0,4}$, $Gd_{0,6}Er_{0,4}$

La figure III.12 représente la variation de $C_{p\ totale}$ en fonction de la température en applique sur le Gd et les alliages $Gd_{0,6}Tb_{0,4}$, $Gd_{0,6}Dy_{0,4}$, $Gd_{0,6}Er_{0,4}$ avec différente valeurs

de champ magnétique (0T<H<1.5T). La chaleur spécifique augmente avec l'augmentation de la température jusqu'à atteindre son maximum au voisinage de température de curie pour chaque alliages, et diminue avec l'augmentation de la température, mais le matériau de Gadolinium est amiaulé le $C_{p\ total}$ par rapport les autres alliages. Et aussi en remarque les courbe est varié par rapport les différente valeurs de champ magnétique et en déduire la valeur de champ magnétique démunie donc la chaleur spécifique total est augmenté.

Les courbes représentées sur les figures III.13 et III.14 montrent l'effet magnétocalorique et la variation d'entropie magnétique prédites à l'aide de la théorie du champ moléculaire (MFT) pour le champ magnétique (H=1.5T), en fonction de la température pour le Gd et les alliages $Gd_{0,6}Tb_{0,4}$, $Gd_{0,6}Dy_{0,4}$, $Gd_{0,6}Er_{0,4}$. Nous avons remarqué une plusieurs point intersection entre les courbes, et l'entropie magnétique augmente avec l'augmentation de la température jusqu'à atteindre son maximum au voisinage de température de curie pour chaque alliages, et diminue avec l'augmentation de la température.

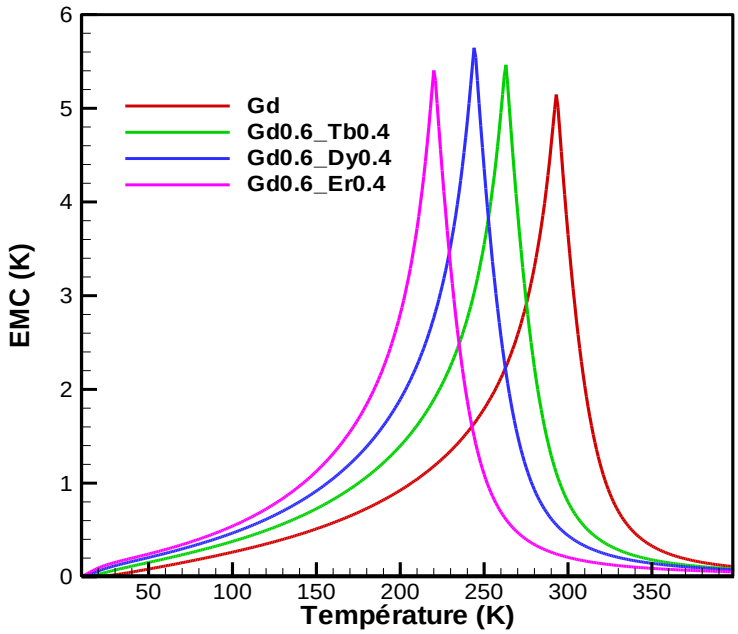


Fig. III.13 la variation de l'effet magnétocalorique en fonction de Température pour le Gd et les alliages $Gd_{0,6}Tb_{0,4}$, $Gd_{0,6}Dy_{0,4}$, $Gd_{0,6}Er_{0,4}$ avec H=1.5T

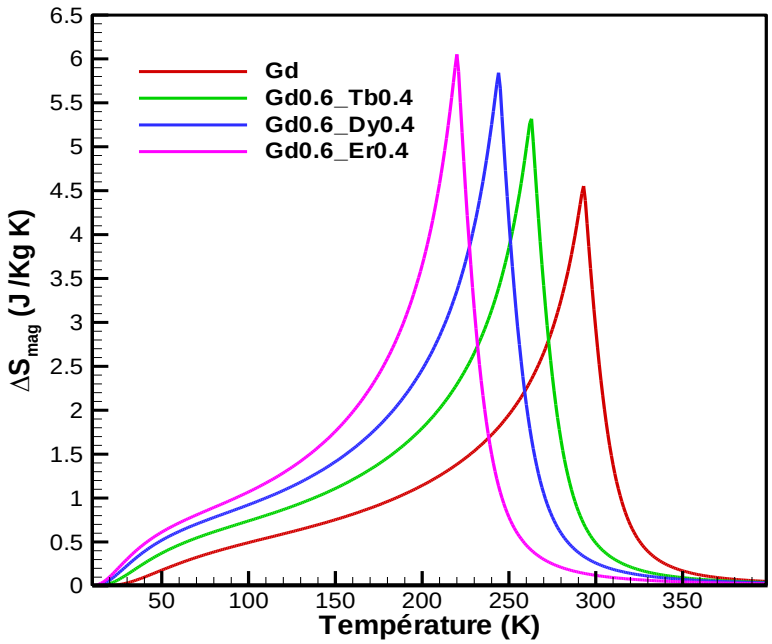


Fig. III.14 La variation d'entropie magnétique en fonction de Température pour le Gd et les alliages $Gd_{0,6}Tb_{0,4}$, $Gd_{0,6}Dy_{0,4}$, $Gd_{0,6}Er_{0,4}$ avec H=1.5T

III.5 Étude du cycle réfrigération magnétiques d'Ericsson

- **Etude sur le Gadolinium**

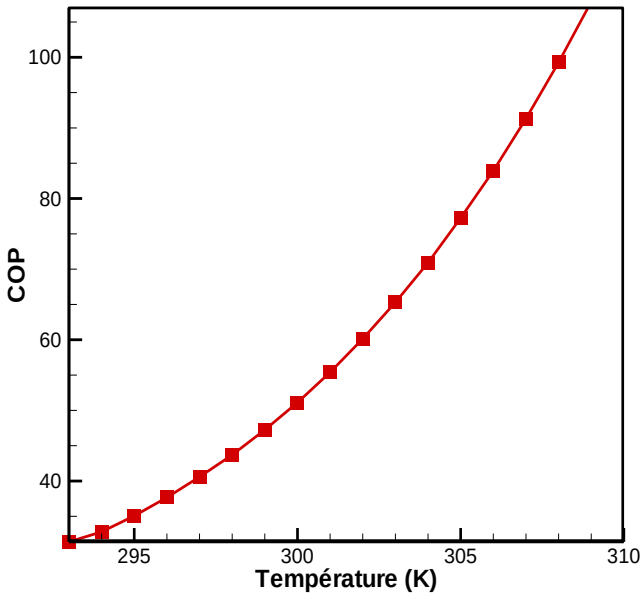


Fig. III.15 Evolution de coefficient de performance en fonction de la température.

La figure III.15 représenté l'évolution du COP du cycle de réfrigération magnétique d'Ericsson on utilise le Gd comme matériau constitutif du réfrigérant en fonction de la température, en remarque la courbe de COP est augmentée avec l'augmentation de température jusqu'à atteindre au voisinage de T=310K.

La figure III.16 montre la courbe de quantité de chaleur de source chaude du cycle de réfrigération magnétique d'Ericsson avec le Gd comme matériau constitutif du réfrigérant en fonction de température. En remarque la courbe augmentée de 8105 J/Kg à 25131 J/Kg pour augmentation de la température de 260K jusqu'à au voisinage de la température de curie T_C= 293K, dans ce point atteigne le pic de 25131 J/Kg à la température de curie, puis au-delà de 293K à 340K, et la quantité de chaleur à la source chaude est diminué 25131 J/Kg à 2700 J/Kg.

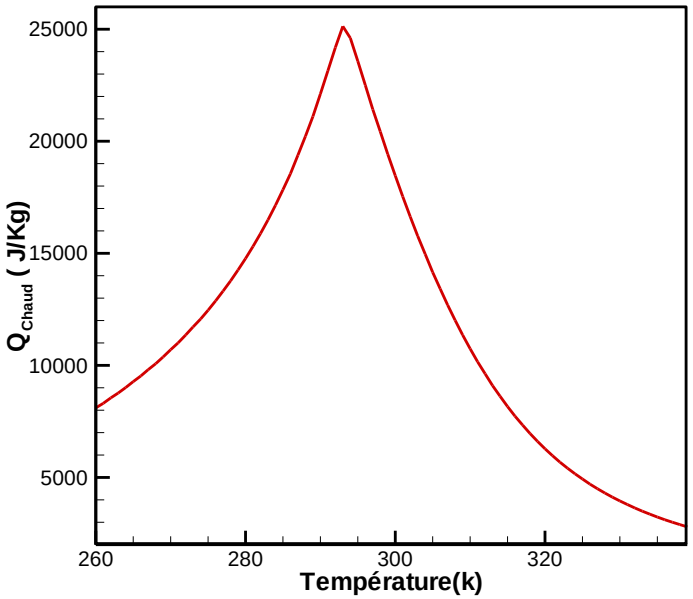


Fig. III.16 Variation de la quantité de chaleur dégagée au niveau de sources chaude en fonction de température.

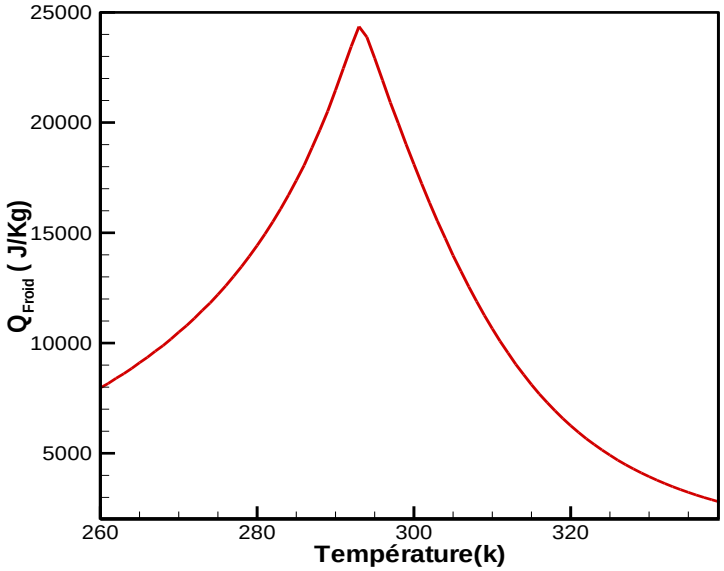


Fig. III.17 Variation de la quantité de chaleur dégagée au niveau de sources froide en fonction de température.

La figure III.17 montre la courbe de quantité de chaleur de source froide du cycle de réfrigération magnétique d'Ericsson avec le Gd comme matériau constitutif du réfrigérant en fonction de température. En remarque la courbe augmentée de 7968 J/Kg à 24355 J/Kg pour augmentation de la température de 260K jusqu'à température de curie de gadolinium T_C =293K, dans ce point atteigne le pic de 24355 J/Kg à la température de curie, puis au-delà de 293K à 340K la quantité de chaleur à la source froid est diminué 24355 J/Kg à 2697 J/Kg.

- **Etude sur les quatre matériaux (Gd ; Tb ; Dy ; Er) :**

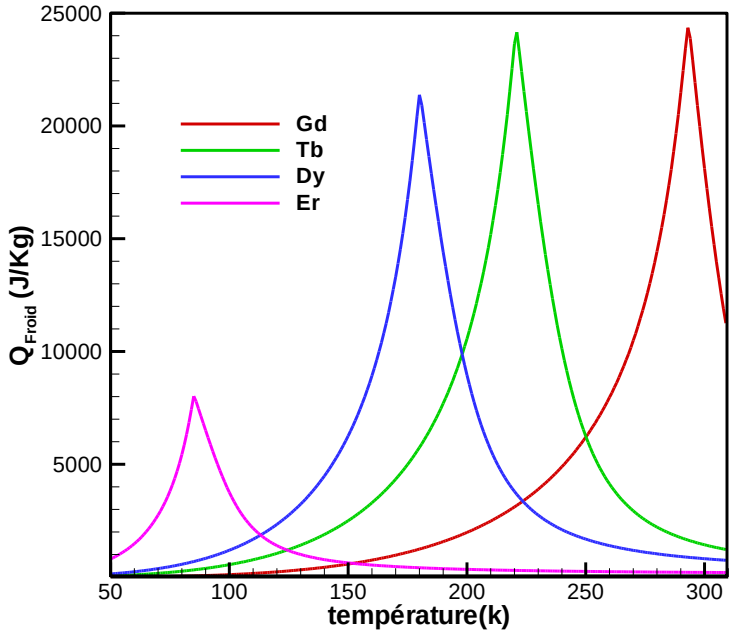


Fig. III.18 Variation de la quantité de chaleur dégagée au niveau de sources froide en fonction de température.

la figure III.18 montre la courbe de quantité de chaleur absorbée de source froide en fonction de température avec (Gd, Tb, Dy, Er) comme matériaux constitutifs du réfrigérant, les courbe est augmentée au point :

$3\text{J/Kg} \leq \text{Q}_{\text{Gd}} \leq 24355$ J/Kg ; $53J/Kg \leq \text{Q}_{\text{Tb}} \leq 24154$ J/Kg ;

$139J/Kg \leq Q_{Dy} \leq 21379$ J/Kg ; $803J/Kg \leq Q_{Er} \leq 8022$ J/Kg. Pour augmentation de la température de 50K jusqu'à température de curie T_C à chaque matériaux, dans ce point atteigne le pic de chaque matériaux à la température de curie, puis au-delà de point de curie à la T=310K.

La figure III.19 montre l'évolution du COP du cycle de réfrigération magnétique d'Ericsson en fonction de la température avec (Gd, Tb, Dy, Er) comme matériaux constitutifs du réfrigérant en remarque les courbes de COP sont augmentées avec l'augmentation de température.

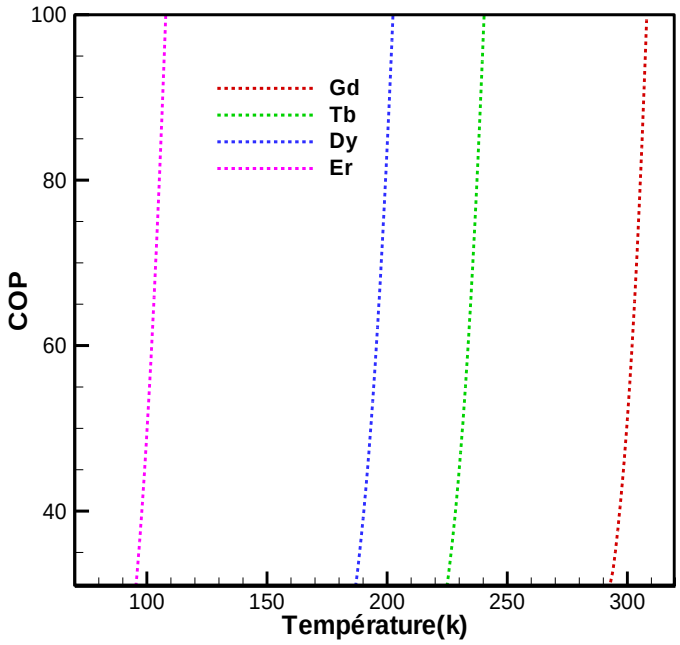


Fig. III.19 Evolution de coefficient de performance en fonction de la température.

- **Etude sur les trois alliages ($Gd_{0,6}Tb_{0,4}$, $Gd_{0,6}Dy_{0,4}$, $Gd_{0,6}Er_{0,4}$)**

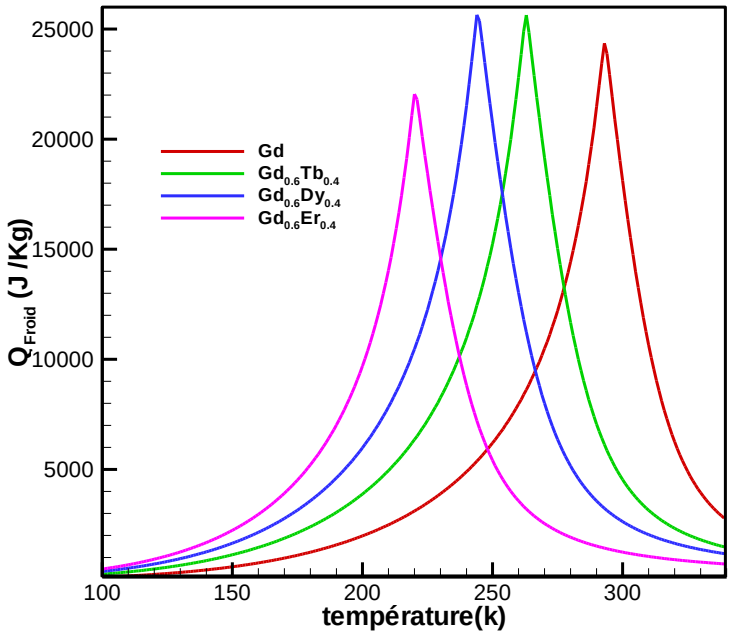


Fig. III.20 Variation de la quantité de chaleur dégagée au niveau de sources froide en fonction de température.

La figure III.20 montre la courbe de quantité de chaleur absorbée de source froide en fonction de température avec (Gd ; $Gd_{0,6}Tb_{0,4}$; $Gd_{0,6}Dy_{0,4}$; $Gd_{0,6}Er_{0,4}$) comme matériaux constitutifs du réfrigérant, les courbe est augmentée au point :

$108\text{J/Kg} \leq Q_{Gd} \leq 24355\ \text{J/Kg}$; $242J/Kg \leq Q_{Gd0,6Tb0,4} \leq 25633\ \text{J/Kg}$;

$366J/Kg \leq Q_{Gd0,6Dy0,4} \leq 25644$ J/Kg ; $475J/Kg \leq Q_{Gd0,6Er0,4} \leq 22046$ J/Kg. Pour augmentation de la température de 100K jusqu'à température de curie T_C à chaque matériaux, dans ce point atteigne le pic de chaque matériaux à la température de curie, puis au-delà de point de curie à la T=310K.

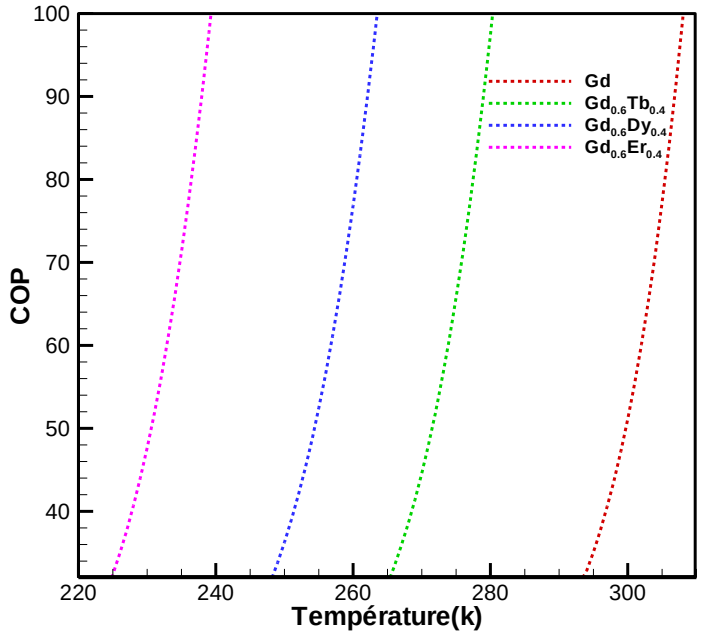


Fig. III.21 Evolution de coefficient de performance en fonction de la température.

La figure III.21 montre l'évolution du COP du cycle de réfrigération magnétique d'Ericsson en fonction de la température avec (Gd ; $Gd_{0,6}Tb_{0,4}$; $Gd_{0,6}Dy_{0,4}$; $Gd0,_6Er_{0,}$) comme matériaux constitutifs du réfrigérant en remarque les courbes de COP sont augmentées avec l'augmentation de température.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Conclusion générale

De ce travail le cycle thermomagnétique d'Ericsson a été étudié d'une part et d'autre part, la précision des conditions d'opération a été effectuée.

L'effet magnétocalorique (EMC), matériaux magnétocaloriques et les cycles thermodynamiques en RM, principalement le cycle d'Ericsson ont été présentés et discutés. Afin de ce mémoire calculer l'effet magnétocalorique dans les matériaux Gadolinium ; Terbium ; Dysprosium ; Erbium ; 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 et le modèle de Gennes pour calculer la température de Curie des matériaux et les alliages ($Gd_{1-x}Tb_x$; $Gd_{1-x}Dy_x$; $Gd_{1-x}Er_x$). En utilisent Gd ; Tb ; Dy ; Er et les alliages ($Gd_{0.6}Tb_{0.4}$; $Gd_{0.6}Dy_{0.4}$; $Gd_{0.6}Er_{0.4}$) comme matériaux constitutifs du réfrigérant pour améliorer Q_F, Q_C, COP, Nous avons démontré que les alliages $Gd_{1-x}Tb_x$ constituent de très bons candidats pour la réfrigération magnétique au voisinage de l'ambiante. Par rapport au les alliages $Gd_{1-x}Dy_x$; $Gd_{1-x}Er_x$ qui constituent de très bons candidats pour la réfrigération magnétique inferieur à la température ambiante. En particulier dans les systèmes de refroidissement où le cycle d'*Ericsso*n est appliqué. Les mesures magnétiques ont montré que la température de *Curie* peut être diminuée de 293K à 263 K ; 244K et 220 K en substituant 40 % de gadolinium par le terbium ; le dysprosium et le erbium successivement.

La réfrigération magnétique est une technologie émergente pour produire du froid qui exploite l'effet magnétocalorique. Cette technologie possède plusieurs du froid avantages par rapport aux autres technologies existantes comme : grande efficacité thermodynamique ; impact environnemental très réduit ; faible niveau du bruit et des vibrations ; longue durée de vie et grande fiabilité ; poids et encombrement faibles ; recyclabilité total des systèmes après leur usage.

RÉFÉRANCES

REFERENCES

[1] HoussemRafikEl-Hana BOUCHEKARA, Recherche sur les systèmes de réfrigération magnétique, modélisation numérique, conception et optimisation, thèse doctorat, Institut polytechnique de Grenoble.2008.

[2] Farid ALLAB, Etude et conception d'un dispositif de réfrigération magnétique base sur l'effet magnétocalorique géant, thèse doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble. 2008.

[3] Etude et analyse de cycle de réfrigération magnétique MF.2011.

[4] Quentin Recour, Étude des propriétés structurales, magnétiques et magnétocaloriques de Mn3Sn2 et ses dérivés, thèse doctorat, université Lorraine ,2012.

[5] Cédric Dupuis, Matériaux à effet magnétocalorique géant et Systèmes de réfrigération magnétique, thèse doctorat, Grenoble INP.2009.

[6] 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).

[7] Julien Roudaut, Modélisation et conception de systèmes de réfrigération Magnétique autour de la température ambiante, thèse doctorat, Université de Grenoble ,2006.

[8] François Guillou, Différents matériaux à effet magnétocalorique : Aspects fondamentaux et applicatif, thèse doctorat, Université de Caen 2011.

[9] Charlotte MAYER, Nouveaux matériaux magnétocaloriques pour la réfrigération magnétique, thèse doctorat, Université de Bordeaux 29.09.2011.

[10] K. A. Jr Gschneidner and V. K. Pecharsky ; Thiry years of near room temperature magnetic cooling ; Where we are today and future prospects.Int. J. Refrigeration 31-945–961, (2008).

[11] W. A. Steyert, Journal of Applied Physics 49, 1216 (1978).

[12] L. D. Kirol and M. W. Dacus, Adv. Cryog. Eng. 33- 757–765. (1988)

[13] Green, G., Chafe, J., Stevens, J.etHumphrey, J; A gadolinium-terbium active regenerator ; Adv. Cryog. Eng., 35(B):1165–1174. (1990)

[14] Zimm, C. B.Jastrab, A.Sternberg, A.Pecharsky, V.Gschneidner Jr., K., Osborne, M. ET Anderson, I; Description and performance of a near room temperature magnetic refrigerator; Adv. Cryog. Eng., 43(B):1759–1766. (1998).

[15]:K.Engelbrecht,D.Eriksen,C.R.H.Bahl,R.Bjørk,J.Geyti,J.A.Lozano,K.K.Nielsen,F .Saxild,A.Smith, and N.Pryds ; Experimental results for a novel rotary active magnetic regenerator ; International Journal of Refrigeration,35(6) :1498-1505,(2012).

[16] C.R.H.Bahl, K. Engelbrecht, D.Eriksen, J A.Lozano, R. Bjørk, J. Geyti, K.K.Nielsen, A.Smith, and N Pryds .Development and experimental results from a 1KW prototype {AMR} ; International Journal of Réfrigération, 37:78-83, (2014).

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

[18] J.Romero Gomez, R. Ferreiro Garcia, Jcarbiacarril, and M. Romrno Gomez ; Areview of room temperature linear reciprocating magnetic refigerators ; Renewable and sustainable EnergyReviews, 21:1-12, (2013).

[19] C.Aprea, A.Greco and A.Maiorino ; The use of the first and of the second order phase magnetic transition alloys for an {AMR} refrigerator at room temperature: A numerical analysis of the Energy performances ; Energies conversion and Management, 70 :40 - 55, (2013).

[20] Younes Chiba ; Contribution à l'étude d'un réfrigérateur à régénération magnétique active opérant près de la température ambiante : considération thermo fluide, thèse doctorat, École nationale polytechnique, Algérie, (2014).

[21] K. Gschneidner Jr. and V. Pecharsky, International Journal of Refrigeration 31, 945 (2008).

[22] Voraksmy BAN ; Matériaux magnéto réfrigérants à large zone de travail Université Henri Poincaré, Nancy, 2011

[23] Ulrich legait ; Caractérisation et modélisation magnétothermique appliquée a la réfrigération magnétique ; Laboratoire de Génie Electrique de Grenoble et à l'Institut Néel dans l'École Doctorale EEATS ; Electronique, Electrotechnique, Automatique et Traitement du Signal ; Thèse de doctorat, (2011).

[24] AREZKI SMAILI ; Développement De Matériaux Composites Pour La Réfrigération Magnétique ; UNIVERSITÉ DU QUÉBEC ; Avril 1998.

[25] A M TISHIN, Y I SPICHKIN; the Magnetocaloric Effect and its Application, livre

[26] Peter W. Egolf, Le froid magnétique à température ambiante, INSTITUT INTERNATIONAL DU FROID, France, Octobre 2007.

[27] http://www.Wikipédia.net