REPUBLIQUE ALGERINNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE l'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIETFIQUE

UNIVERSITE Dr. YAHIA FARES DE MEDEA

FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE



Mémoire de fin d'étude

en vue d'obtention du diplôme de

Master

en **Génie Mécanique**

Option : Energétique et thermique des systèmes

Thème :

Etude de cycle de réfrigération magnétique de Brayton

Encadré par :

Dr. Chiba Younes

Réalisé par :

Ghaffar Hafidha

Promotion «2014-2015 »

REPUBLIQUE ALGERINNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE l'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIETFIQUE

UNIVERSITE Dr. YAHIA FARES DE MEDEA

FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE



Mémoire de fin d'étude

en vue d'obtention du diplôme de

Master

en **Génie Mécanique**

Option : Energétique et thermique des systèmes

Thème :

Etude de cycle de réfrigération magnétique de Brayton

Encadré par :

Dr. Chiba Younes

Réalisé par :

Ghaffar Hafidha

Promotion «2014-2015 »

Remerciements

Au terme de ce mémoire nous tenons à remercier tout naturellement en premier lieu ***ALLAH*** *le tout puissant, la source de toute connaissance qui nous a offert la volonté et la patience pour accomplir ce travail.*

Nos plus vifs remerciements iront également à notre promoteur ***Dr. Chiba Younes*** *qui a été pour nous un guide précieux, et qu'il nous apportés ainsi que ces conseils qui ont été très bénéfiques durant le déroulement de ce travail.*

Nous exprimons également à remercier les enseignants de génie de Mécanique.

Nous tenons à remercier les membres de jury qui nous a fait l'honneur d'examiner notre travail.

Le grand remerciement nous le gardons pour nos parents qui ont toujours veillés sur nous et sur notre avenir.

Enfin nous présentons aussi nos remerciements à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à…

Ma chère mère : Vous serez absente à jamais mais toujours présente dans nos cœurs;

Mon père: vous nous avez inculqué le sens de l'honneur;

Mes Chers frères: Ridha, Laid ;Nour Eldin

Mes Chères sœurs : Fatma, Allai, Hadjira, Karima, Wiam;

Mes frères et sœurs : Si je vous dois beaucoup c'est parce que vous m'avez tout donné…
Et toute la famille « Ghaffar, Betil »

Á mes amis : Nassira, Zineb, Rim, Farah…….

Spécialement à tous mes camarades de promotion pour l'ambiance sereine qui nous animé au cours de notre formation.

Soyez tous honorés.

Hafidha

Résumé :

ملخص

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

كلمات المفتاح

التبريد المغناطيسي ،تاثير المغناطو-الحراري، دورة برايتون ،المحاكاة العددية.

Résumé

Ce travail présente une étude thermodynamique du cycle de réfrigération magnétique de Brayton. Les propriétés magnétocaloriques des réfrigérants magnétiques solides (Gadolinium, 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 de Brayton. Les résultats de la simulation numérique incluant les différentes quantités de chaleur échangées et la performance énergétique de cycle de Brayton pour les matériaux magnétocaloriques proposées sont étudiés et analysées.

Mots clés

Réfrigération magnétique, Effet magnétocalorique, cycle de Brayton, Simulation numérique.

Abstract

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

Keywords

Magnetic refrigeration, Magnetocaloric effect, Brayton cycle, numerical simulation.

Table des matières

Remerciements

Résumé

Table des matières Liste des figures Liste des tableaux

Nomenclature et Symboles

Introduction générale.....**1**

Chapitre I : Etat de l'art sur la réfrigération magnétique.....**3**

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.....**8**

I.3.1.Définition.....**8**

I.3.2. Principe de la réfrigération magnétique.....**9**

I.3.3. Revue sur Démonstrateurs des réfrigérateurs magnétique.....**10**

I.3.3.1. La Réfrigérateur magnétique de Brown.....**10**

I.3.3.2. La Réfrigérateur magnétique de Steyert.....**11**

I.3.3.3. La Réfrigérateur magnétique de Kirol **12**

I.3.3.4. La Réfrigérateur magnétique de Green et al.....**13**

I.3.3.5. La Réfrigérateur magnétique de Zimm et al.....**14**

I.3.3.6. La Réfrigérateur magnétique de Chubu Electric/Toshiba.....**15**

I.3.3.7. La Réfrigérateur magnétique de Zimm (2003).....**16**

I.3.3.8. La Réfrigérateur magnétique de Rowe et al (2002-2006)..... .....**17**

I.3.3.9. La Réfrigérateur magnétique de Zimm et al (2007-2010).....**17**

I.3.3.10. La Réfrigérateur magnétique réalisé en Espagne **18**

I.3.3.11. La Réfrigérateur magnétique de Balli et al (2010).....**19**

I.3.3.12. Autre Réfrigérateur magnétique **20**

I.4. Approche thermodynamique **22**

I.4.1. Relation de Maxwell.....**22**

I.4.2. Expression de l'effet magnétocalorique.....**23**

I.5. Théorie du champ moléculaire.....**24**

I.6. Matériaux magnétocalorique(MMC).....**25**

Table des matières :

I.7. Conclusion.....**28**
Chapitre II : Modélisation de cycle Réfrigération magnétique de Brayton.....**29**
II.1. Introduction **29**
II.2. Les cycles des Réfrigérations magnétiques.....**29**
II.2.1. Présentation des cycles thermodynamiques applique à la RM.....**30**
II.2.1.1. Cycle Réfrigération magnétique de Carnot.....**30**
II.2.1.2. Cycle Réfrigération magnétique d'Ericsson.....**33**
II.2.1.3. Cycle Réfrigération magnétique active(AMRR).....**35**
II.3. Etude du cycle Réfrigération magnétique de Brayton **39**
II.3.1.Définition.....**39**
II.3.2.Décrispation du cycle Réfrigération magnétique de Brayton **39**
II.4.L'analyse Exergétique de la Réfrigération magnétique.....**42**
II.5. Un cycle de Réfrigération magnétique irréversible régénérative de Brayton.....**44**
II.6.conclusion.....**47**
Chapitre III : Résultats et Discussions.....**48**
III.1. Introduction.....**48**
III.2. Calcul les propriétés magnétique des matériaux magnétocaloriques.....**48**
III.2.1.Définition.....**48**
III.3. Etude du cycle réfrigération magnétique de Brayton.....**61**
III.4. Conclusion.....**66**
Conclusion Générale.....**67**
Références et bibliographiques
Annexes

Liste des Figures :

Chapitre I : Etat de L'art sur la réfrigération magnétique :

Figure I.1. Effet magnétocalorique.....**4**

Figure I.2. Principe de l'effet magnétocalorique.....**7**

Figure 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 ΔS_M (T_0, H_I - H_F) et ΔT_{ad} (T_0, H_I - H_F) sont indiquées par des flèches.....**8**

Figure I.4. Analogie entre le cycle compression-détente traditionnel et le cycle de réfrigération magnétique.....**9**

Figure I.5. Schéma du système de réfrigérateur magnétique de Brown **11**

Figure I.6. Principe du réfrigérateur magnétique de Steyert.....**12**

Figure I.7. Schéma de fonctionnement du système de réfrigérateur magnétique de Kirol.....**12**

Figure I.8. Schéma réfrigérateur magnétique de Green et al.....**14**

Figure I.9. Schéma de réfrigérateur magnétique de Zimm et al.....**15**

Figure I.10. Le dispositif japonais initial (gauche) et amélioré (droite).....**16**

Figure I.11. Photo et principe de fonctionnement du circuit de fluide réfrigérant du Réfrigérateur magnétique rotatif de Zimm et al (USA 2002).....**16**

Figure I.12. Schéma de réfrigérateur magnétique de Rowe et al.....**17**

Figure I.13. Photo et schéma du 3ème Réfrigérateur magnétique de Zimm et al.....**18**

Figure I.14. Réfrigérateur magnétique réalisé en Espagne.....**19**

Figure I.15. Schéma de réfrigération magnétique de Balli et al.....**19**

Figure I.16. Cycle élémentaire de Brayton pour un matériau avec une transition de phase du premier ordre. La transition de phase du premier ordre est délimitée par les deux lignes en pointillé.....**26**

Figure I.17. $|\Delta T_{ad}^{max}|$ En fonction de $|\Delta T^{max}|$ pour plusieurs compositions, un champ de 2 T et une température de curie autour de l'ambiant…….....**26**

Figure I.18. Composés LaFeCoSi : Réglage de la température de Curie en contrôlant le taux d'hydruration.....**27**

Chapitre II : Modélisation de cycle Réfrigération magnétique de Brayton :

Figure II.1. Analogie entre le cycle de la réfrigération conventionnel et le cycle de la réfrigération magnétique.....**30**

Figure II.2. Cycle Réfrigération magnétique de Carnot.....**31**

Figure II.3. Schématisation d'un système délivrant de la puissance froide et chaude à l'aide d'un travail fourni.....**32**

Liste des figures :

Figure II.4. Cycle Réfrigération magnétique d'Ericsson.....**34**
Figure II.5. Représentation schématique d'un système de réfrigération basé sur un cycle d'Ericsson.....**35**
Figure II.6. Description schématique d'un réfrigérateur AMRR.....**36**
Figure II.7. Profils de température associés au cycle AMRR.....**38**
Figure II.8. Cycle Réfrigération magnétique de Brayton.....**40**
Figure II.9. Le diagramme d'un cycle de réfrigération irréversible régénérateur magnétique Brayton température-entropie.....**45**
Chapitre IV. Résultat et Discussions
Figure IV.1: Evolution de la chaleur spécifique électronique et l'entropie électronique en fonction de Température.....**49**
Figure IV.2: Evolution de la chaleur spécifique magnétique et l'entropie magnétique en fonction de Température.....**50**
Figure IV.3: Evolution de la chaleur spécifique du réseau et l'entropie du réseau en fonction de Température. **51**
Figure IV.4: Evolution d'EMC et la variation d'entropie magnétique en fonction de Température.....**52**
Figure IV.5: Evolution de la chaleur spécifique total et l'entropie total en fonction de Température.....**53**
Figure IV.6: Evolution EMC et la ΔS_{mag} en fonction de Température et champ magnétique **54**
Figure IV.7: Evolution de la chaleur spécifique total et l'entropie total en fonction de Température. **55**
Figure IV.8: Evolution de la chaleur spécifique magnétique et l'entropie magnétique en fonction de Température. **56**
Figure IV.9: Evolution de la chaleur spécifique total en fonction de Température.....**57**
Figure IV.10: Evolution l'entropie total en fonction de la température.....**58**
Figure IV. 11 : La variation de l'entropie magnétique en fonction de la température.....**59**
Figure IV.12: Variation de l'effet magnétocalorique en fonction de la température.....**60**
Figure IV.13 : Evolution de coefficient de performance en fonction de la température.....**61**
Figure IV.14 : Variation de la quantité de chaleur dégagée au niveau de sources chaude en fonction de température.....**62**

Liste des figures :

Figure IV.15 : Variation de la quantité de chaleur dégagée au niveau de sources froide en fonction de température.....**63**
Figure IV.16 : Variation de la quantité de chaleur dégagée au niveau de sources chaude en fonction de température. **64**
Figure IV.17 : Variation de la quantité de chaleur dégagée au niveau de sources froide en fonction de température. **65**
Figure IV.18 : Evolution de coefficient de performance en fonction de la température. **66**

Liste des tableaux :

Chapitre I : Etat de L'art sur la réfrigération magnétique :

Table I.1. Principaux Démonstrateurs des réfrigérateurs magnétiques.....**21**

Chapitre III: Résultats et Discussions :

Table III.1. Les propriétés magnétiques des matériaux magnétiques..... .....**48**

Nomenclatures et Symboles:

Abréviations :

Abréviations	Signification
AMRR	La Réfrigération Magnétique Active à Régénération
EMC	Effet Magnétocalorique
Gd	Gadolinium
RM	Réfrigération magnétique
COP	Coefficient de Performance
MMC	Matériau magnétocalorique
MTF	Théorie de champ moléculaire
Dy	Dysprosium
Er	Erbium

Lettres romaines et grecques :

Symbole	Grandeur	Unité
Cp	Capacité Calorifique	[J/Kg.K]
ΔS	Variation de l'entropie	[J/Kg.K]
ΔT	Variation de température	[K]
H	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 Lande	[-]
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]
χ	susceptibilité magnétique	[-]
α	diffusivité thermique	[m^2/s]
μ	perméabilité magnétique	[H/m]
c	Chaleur spécifique	[J/Kg.K]
S_e	Entropie électronique	[J/K.mole]
S_l	Entropie du réseau	[J/K.mole]
S_M	Entropie magnétique	[J/K.mole]
h	Coefficient de convection	[W/K.m^2]

J	Nombre quantique du moment angulaire total	[-]
R	Constante universelle des gaz	[J.K/mole]
Q_c	Quantité de chaleur de la source chaude	[J]
Q_f	Quantité de chaleur de la source froide	[J]
γ	Coefficient de capacité calorifique électronique	[J/K.mole]
η	Efficacité	[-]
T_H, T_L	Les températures des hautes et basse de réservoir	[K]
Tm	Température moyenne	[K]

Constantes physiques :

Symbole	Grandeur	Valeur	Unité
K_B	constante de Boltzmann	$1{,}381.\ 10^{-23}$	[J/ K]
μ_0	perméabilité du vide	$4\pi.10^{-7}$	[H/m]
μ_B	magnéton de Bohr	$9{,}274.10^{-24}$	[A/m]

INTRODUCTION GENERALE

Les besoins en technologies du froid ne cessent d'augmenter jour après jour. Les recherches actuelles dans ce domaine portent essentiellement sur l'amélioration de l'efficacité des systèmes de production de froid. Ceux-ci sont aujourd'hui très performants. Cependant, cette technologie ne semble pas être adaptée au contexte actuel et le souci de limiter l'impact de la pollution sur l'environnement.

La production de froid est un procédé indispensable à bien des applications développées par l'homme. Ce besoin est en constante évolution et représente aujourd'hui une part très importante de la consommation d'électricité mondiale. Le froid est aujourd'hui un élément indispensable à la société moderne et à l'économie mondiale pour préserver la santé, assurer la sécurité et améliorer le confort. Sa production représente près de 15% de la consommation électrique mondiale (20% aux USA et jusqu'à 25 % Japon) et son utilisation ne cesse de croître **[36]**. Le fonctionnement de la quasi-totalité des systèmes actuels de production du froid est basé sur le principe thermodynamique de compression et de détente d'un fluide frigorigène. Cette technologie, datant des années 1920, a l'avantage d'être tout à fait mature. Elle s'accompagne cependant d'une consommation énergétique et d'une pollution qu'il faut aujourd'hui réduire en modifiant d'une part les habitudes pour une utilisation rationnelle de l'énergie et d'autre part en développant des technologies moins énergivores et plus respectueuses de l'environnement**. [1]**

Nous nous intéressons ici à la réfrigération magnétique qui semble être une des technologies les plus prometteuses. Cette technologie est basée sur l'effet magnétocalorique, une propriété intrinsèque de certains matériaux magnétiques, qui se traduit par un changement de température de ces matériaux lorsqu'ils sont soumis à une variation de champ magnétique. 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. **[17]**

Ces technologies sont hautement développées et optimisées et il est peu probable que leur efficacité soit améliorée significativement. Il devient donc très intéressant de développer une technologie alternative potentiellement plus efficace: la réfrigération magnétique. La réfrigération magnétique (RM) repose sur l'effet magnétocalorique (EMC) de certains matériaux ferromagnétiques. Ce phénomène, réversible pour certains matériaux, se manifeste par une augmentation de température suite à l'application d'un champ magnétique et un refroidissement lors de son retrait.

Introduction générale :

Donc le système de réfrigération magnétique a l'avantage de ne pas utiliser de gaz nocifs pour la couche d'ozone ou l'effet de serre. Alors la réfrigération magnétique (RM) figure parmi les technologies prometteuses à fort potentiel en efficacité énergétique.

L'étude que nous avons effectuée se déroule dans le cadre général des travaux de recherches entamés sur le cycle réfrigération magnétique de Brayton.

Le présent mémoire est structuré en trois chapitres.

On commence tout d'abord par une introduction générale.

Le premier chapitre de ce mémoire constitue 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 Brayton et présenté les caractéristique (COP, rendement exergétique.....).

Dans le troisième chapitre nous avons présenté les résultats et discussions.

Et enfin, va déterminer par une conclusion générale.

I.1. INTRODUCTION :

La réfrigération magnétique est une technologie émergente qui a suscité l'intérêt des chercheurs de part le monde. 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 et les systèmes basés sur la réfrigération magnétique.

I.2. L'EFFET MAGNETO-CALORIQUE :

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 **[6].** 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.

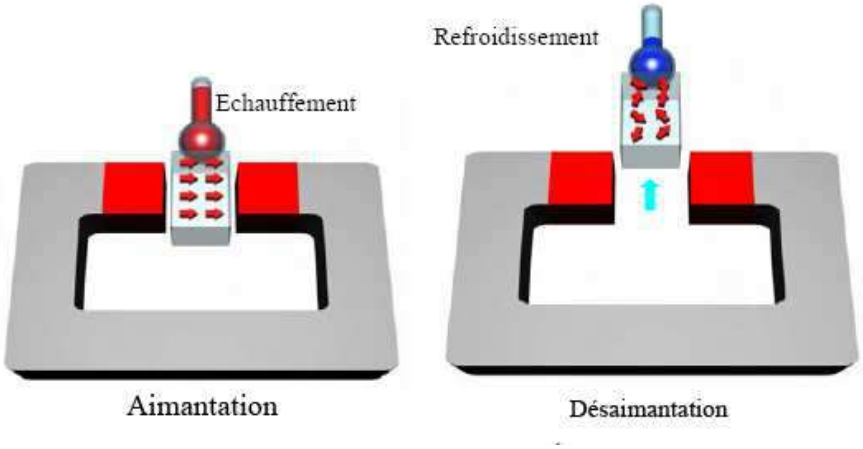


Figure I.1 : Effet magnétocalorique. **[19]**

I.2.2. Historique :

L'étude de la réfrigération magnétique a débuté avec la découverte de l'effet magnétocalorique(EMC) il y a de cela 120 ans. 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 **[16].**

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 **[31].** Le principe fondamental de l'effet magnétocalorique a été démontré indépendamment par Debye en 1926 et Giauque en 1927 **[37, 50],** qui suggérèrent que cet effet permettrait d'atteindre de très basses températures dans un processus de désaimantation adiabatique.

Peu après en 1933, Giauque et MacDougall ont pour la première fois proposée une démonstration expérimentale de la réfrigération magnétique **[51]** : en utilisant des sels de gadolinium ($Gd_2(SO4)_3,8H_2O$), ils ont obtenu des températures de 0,25 K en partant de 1,5 K sous un champ de 0,8 T. Pour ses travaux, Giauque se vit décerner le prix Nobel de chimie en 1949.

En 1954, un réfrigérateur magnétique fonctionnant en continu et fournissant 7 μW à 0,26 K est construit par Heer, Barnes et Daunt **[12].**

Van Geuns propose, en 1966, un cycle magnétique régénératif analogue à celui d'Ericsson opérant entre 4 et 15 K **[21].** Les performances théoriques de ce cycle sont supérieures à celles du cycle Carnot.

En 1976, Barclay et al. Ont construit un réfrigérateur magnétique tournant à régénération capable de produire 0; 9 W entre 4 et 15 K.

Un nouveau pas est franchi la même année quand un premier réfrigérateur magnétique travaillant à la température ambiante est construit par Brown au « Lewis Research Center of American National Aeronautics and Space Administration » **[19].** Le matériau frigorigène utilisé est le gadolinium et ce prototype a permis d'atteindre un abaissement de température de 47 K sous un champ magnétique de 7 T.

En 1989, le brevet de la réfrigération magnétique active à régénération (AMRR) est déposé par le laboratoire de « Los Alamos DOE ».

Ce n'est que depuis quelques années qu'une intense activité de recherche s'est développée autour de la réfrigération magnétique à température ambiante. La découverte en 1997 d'un effet magnétocalorique géant dans le composé Gd5Si2Ge2 **[47]** par Pecharsky et Gschneidner ayant ouvert de nouvelles perspectives dans la recherche de matériaux réfrigérants travaillant à température ambiante.

De plus, la construction par Zimm en 1996 **[13]** d'un réfrigérateur basé sur la réfrigération magnétique active produisant près de 600 W sous un champ de 5 T a permis de démontrer l'efficacité de cette technologie de production du froid.

Une nouvelle étape est franchie en 2001, quand les chercheurs du groupe « Astronautics Corporation of America » sont parvenus à faire fonctionner le premier prototype de réfrigérateur magnétique utilisant des aimants permanents (Nd2Fe14B) comme source de champ **[27].**

Actuellement, de nombreuses équipes travaillent au développement des différents aspects de la réfrigération magnétique afin de rendre viable une application à grande échelle. Le marché des unités réfrigérantes de petite taille représente 140 millions d'unités par an et les premiers réfrigérateurs magnétiques domestiques devraient voir le jour dans un avenir proche.

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 du 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 ΔS_M (T, ΔH), tandis que S_R et S_E restent constantes La quantité ΔS_M $(T, \Delta H)$ est appelée la variation de l'entropie isotherme. **[33]**

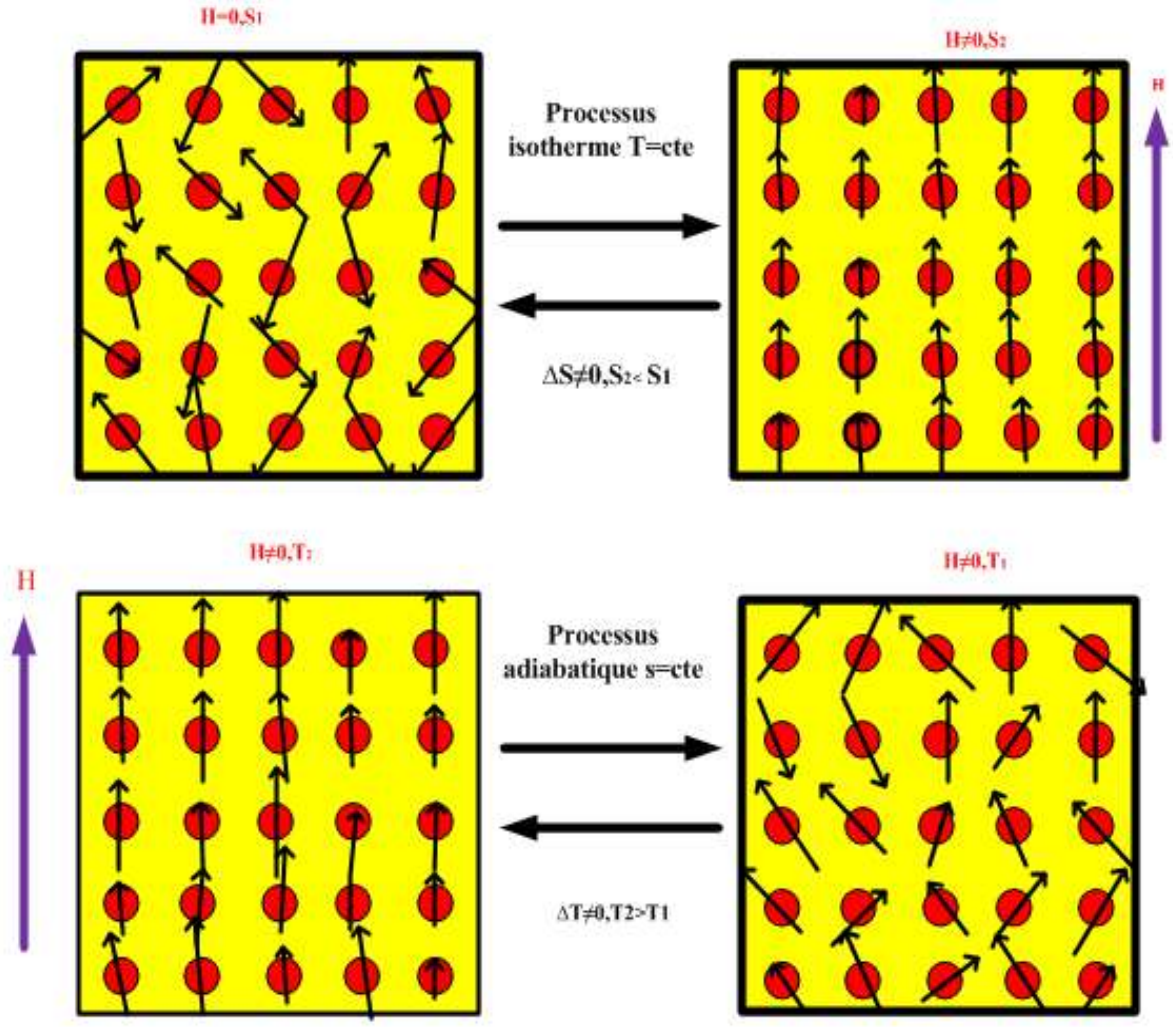


Figure I.2 : Principe de l'effet magnétocalorique.

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 ΔT_{ad} (T) ΔH. 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 ΔS_m $(T, \Delta H)$ et ΔT_{ad} $(T, \Delta H)$ sont données pour une température T et une variation du champ $\Delta H = H_F - H_I$. **[33]**

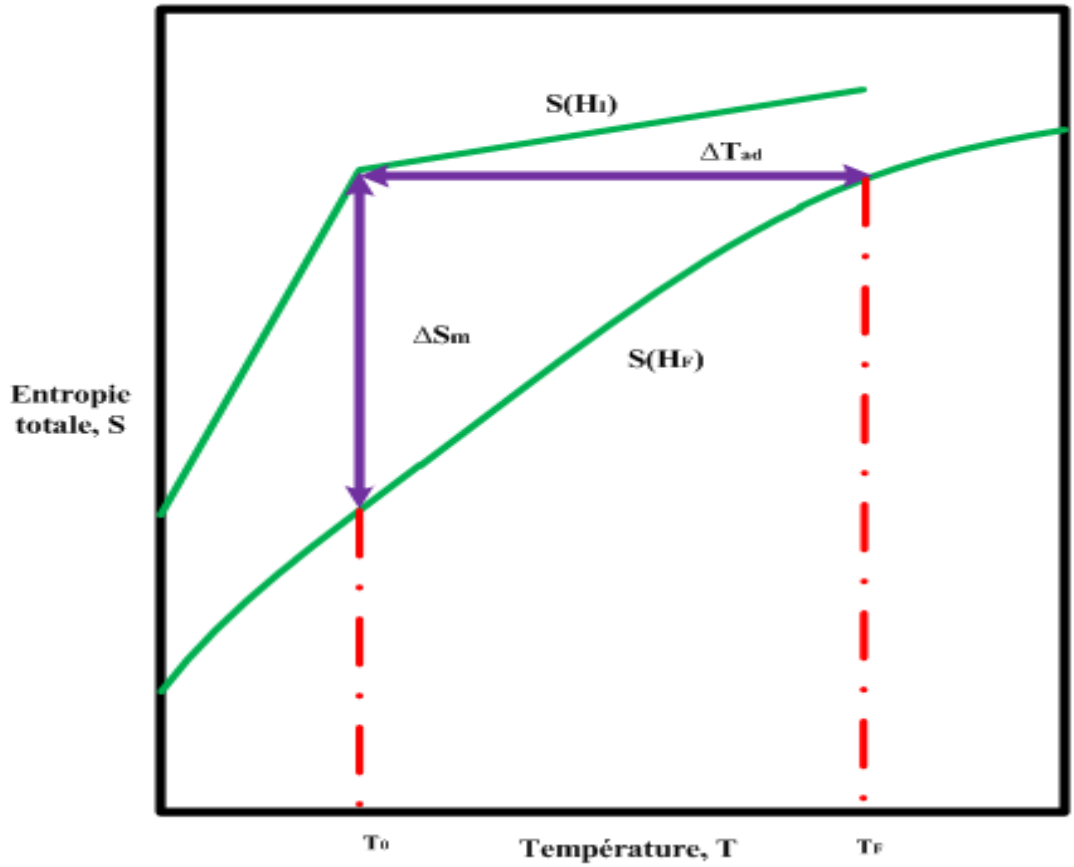


Figure I.3 : Diagramme *S-T* d'un matériau ferromagnétique, montrant l'entropie totale en fonction de la température sous des champs magnétiques H_I et H_F (avec $H_F > H_I$). Les quantités ΔS_M (T_0, H_I - H_F) et ΔT_{ad} (T_0, H_I - H_F) sont indiquées par des flèches**.**

I.3. LA REFRIGERATION MAGNETIQUE :

I.3.1.Définition :

La réfrigération magnétique est un système de « réduction d'entropie d'un matériau paramagnétique »**[38]**, reposant sur la propriété physique de certains matériaux magnétiques qui voient leur température intrinsèque s'élever quand ils sont soumis à un champ magnétique. Ce phénomène dénommé effet magnétocalorique « EMC »est maximum lorsque la température du matériau est proche de sa température de Curie. « Cet effet repose sur la transition critique paramagnétique/ferromagnétique du matériau, qui se traduit par une augmentation de la température lorsqu'on lui applique rapidement un champ magnétique ; inversement la désaimantation entraîne un refroidissement ».

Depuis au moins les années 1990, avec par exemple Ashley qui annonce « les frigos du futur »**[35]**, certains auteurs et prospectivistes estiment qu'il s'agit sans doute ou certainement d'une révolution pour le proche avenir dans le domaine des technologies vertes pour la production de froid et les systèmes de froid**[15]** avec un rendement meilleur que celui des systèmes à compression utilisant des fluides tous plus ou moins polluants et/ou inflammables.

I.3.2. Principe de la réfrigération magnétique :

Le fonctionnement des réfrigérateurs actuels repose sur un cycle répété de compression détente d'un gaz circulant autour d'un compartiment isolé.

La réfrigération magnétique quant à elle, est une nouvelle technologie basée sur un cycle aimantation-désaimantation d'un matériau possédant un pouvoir magnétocalorique important. La réponse d'un matériau magnétocalorique à l'application d'un champ magnétique est similaire à la réponse d'un gaz à une augmentation de pression dans les systèmes conventionnels **[14].** (La figure 1.4) décrit le fonctionnement d'un cycle de réfrigération magnétique et fait l'analogie avec son équivalent par compression-détente.

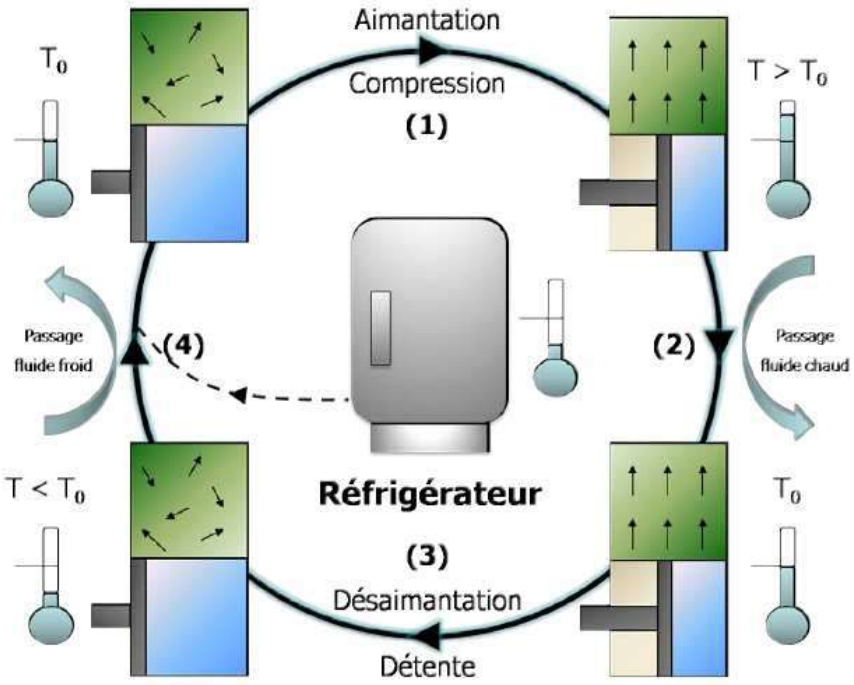


Figure I.4 : Analogie entre le cycle compression-détente traditionnel et le cycle de réfrigération magnétique **[38].**

En théorie, seuls certains matériaux magnétiques tel le gadolinium, l'arsenic ou certains alliages présentent un saut de température suffisant pour pouvoir être exploités dans le domaine du froid magnétique. Ces corps purs possèdent une température de Curie proche de la température ambiante (293 K = 20 °C) et un EMC géant, notamment le gadolinium. C'est pourquoi, ce dernier est souvent utilisé dans les démonstrateurs de « frigo magnétique ». Toutefois, ce matériau est rare et coûteux et l'arsenic, lui, est très toxique. La récente mise au point d'alliages à base de cobalt, manganèse**[3]**, silicium et germanium ou de céramiques et de terres rares présentant des propriétés analogues rendent désormais possible la réalisation et la mise sur le marché de réfrigérateurs magnétiques silencieux et écologiques destinés au grand public. Ils ne contiennent aucun de gaz destructeur de la couche d'ozone, gaz à effet de serre, ni dangereux ou toxique) et sont économiques (car à haut rendement) **[17]**. En 2009 le principal obstacle à une industrialisation est le besoin d'un champ magnétique très élevé (de l'ordre de 5 teslas) qu'il faut générer pour obtenir un rendement intéressant **[30]**.

I.3.3.Revue sur démonstrateurs des réfrigérateurs magnétiques :

Durant plus de la première moitié du XXème siècle, la réfrigération magnétique est restée cantonnée à des applications à très basse température.

En effet, les matériaux employés ne permettent pas de travailler à plus haute température et les recherches ne s'orientaient alors pas vers des matériaux et des cycles thermodynamiques susceptibles d'être utilisés à température ambiante. Ce n'est qu'au cours des années 1970, que l'emploi de gadolinium a permis la mise au point du premier réfrigérateur magnétique fonctionnant à température ambiante. Plusieurs prototypes ont été mis au point depuis **[8]**, 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 (1976):

Le système de Brown est un système tournant et emploie un cycle d'Ericsson **[9]**. Le champ magnétique est produit par un électroaimant (refroidi par eau) avec un champ maximal de 7T. Le matériau utilisé est du Gd en forme de plaques de 1 mm d'épaisseur, séparées par des fils d'acier inoxydable avec des intervalles de 1 mm pour permettre au fluide régénérateur de circuler verticalement. Le fluide est composé de 80% d'eau et de 20% d'alcool. Sans charge et après 50 cycles, les températures atteintes sont de 46 °C pour la source chaude et de -1 °C pour la source froide, donc un T de 47 °C.

Cependant, la puissance froide obtenue n'était pas importante, Ceci est dû au large T obtenu. De plus, le cycle ne pouvant fonctionner qu'avec des fréquences faibles, le gradient de température est réduit car les deux côtés chaud et froid ont le temps d'échanger entre eux.

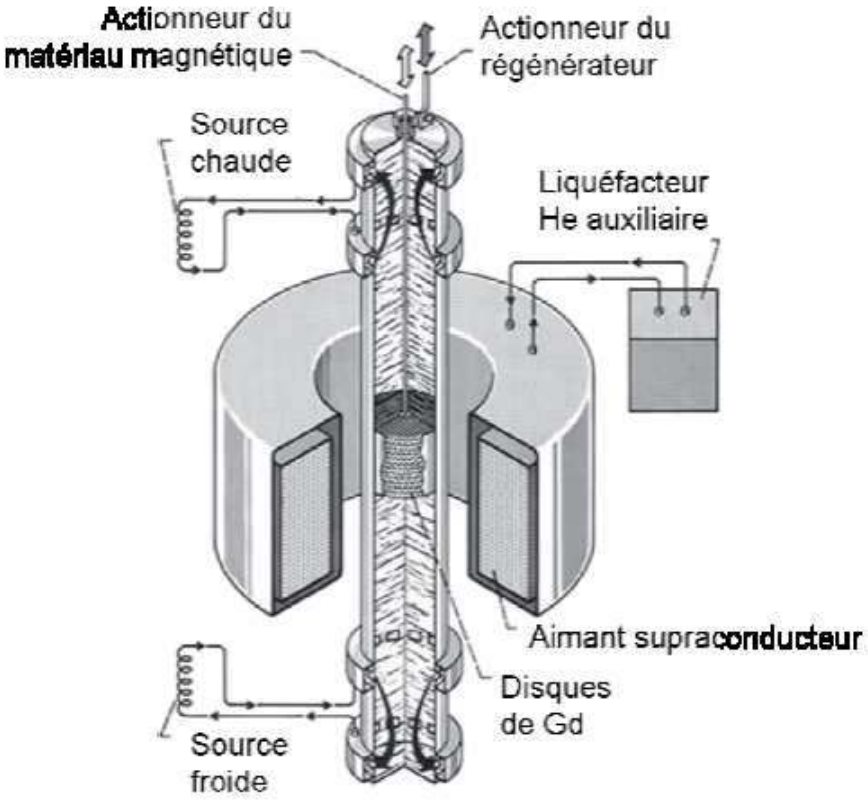


Figure I.5 : Schéma du système de réfrigération magnétique de Brown **[24].**

I.3.3.2.Le réfrigérateur magnétique de Steyert (1978-1983):

L'année suivant la mise au point du réfrigérateur de Brown, Steyert **[49]** 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 1.6). L'anneau traverse alors successivement une zone de champ magnétique faible puis une zone de champ magnétique fort.

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

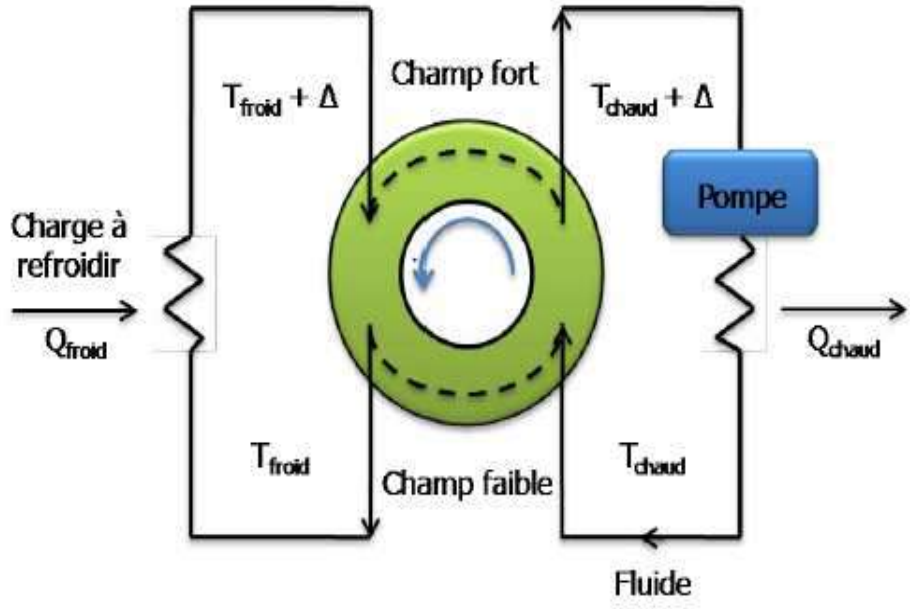


Figure I.6 : Principe du réfrigérateur magnétique de Steyert **[38].**

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 **[32]** ont construit et testé un appareil fonctionnant sur le principe d'une machine tournante et d'un cycle de type Ericsson (Figure I.7).

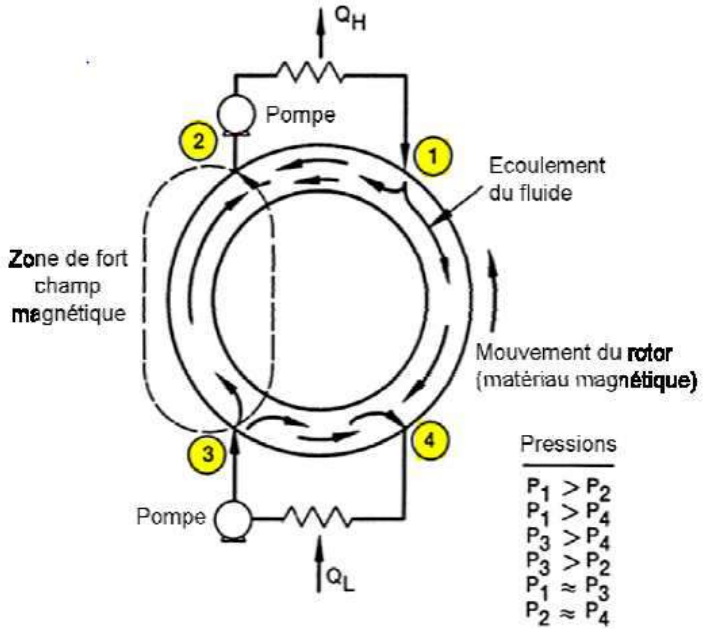


Figure 1.7 : Schéma de fonctionnement du système de réfrigération magnétique de Kirol **[24].**

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 **[18].** La première couche contient du Tb 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.

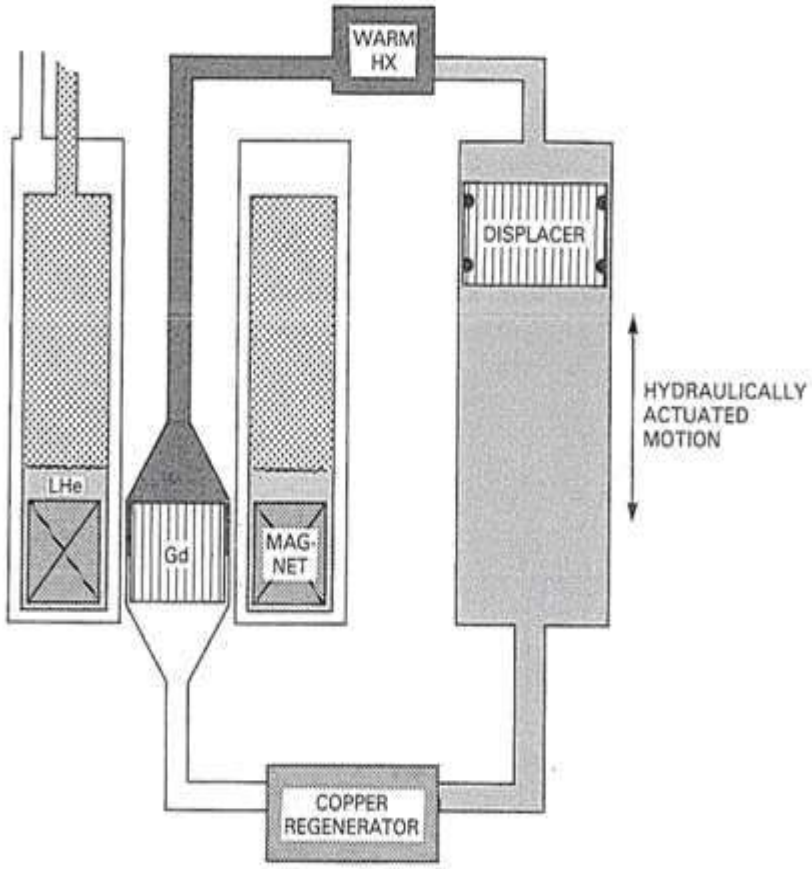


Figure. I.8 : Schéma réfrigération magnétique de Green et al **[18].**

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 **[54]**. C'est le premier dispositif qui a fourni une puissance suffisante pour des applications industrielles, grâce à l'utilisation d'une grande quantité de matériau magnétocalorique (3 kg de Gd) et à un champ magnétique élevé (5 T). Par ailleurs, le *COP* du dispositif varie entre 2 et 8, sans tenir compte de la puissance consommée pour refroidir la bobine supraconductrice, ce qui est une très bonne performance.

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

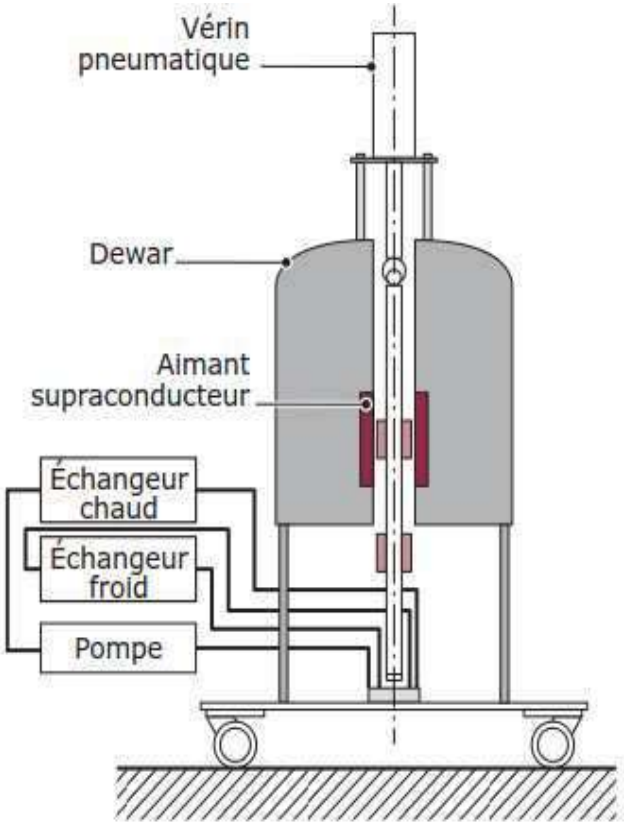


Figure. I.9 : Schéma de réfrigération magnétique de Zimm et al. **[54]**

I.3.3.6.Le réfrigérateur magnétique de Chubu Electric /Toshiba :

En2000,la collaboration de Chubu Electrics avec l'entreprise Toshiba **[30]**a permis de réaliser un réfrigération magnétique linéaire à base de gadolinium sous forme de sphères en utilisant des supraconducteurs pour générer un champ magnétique de 4T ; ils ont obtenu 100Wde puissance avec un écart de température de l'ordre de 21°C.par ailleurs , pendent les années 2002 ,2003 Hirano et son équipe ont réussi d'atteindre une puissance de 40à60W avec un écart de température de l'ordre de 10à27°C en utilisant des aimants permanents **[57,43]** .En 2006 , l'entreprise Chubu Electrics et Tokyo Institute of Technology ont conçu un autre réfrigération magnétique rotatif (figure I.10),et le système a été amélioré comme le montre la figure I.10 (droite)**[44].** La culasse statorique a été feuilletée et la source de champ améliorée (le champ maximal est de 0.9 T). Cela a permis d'atteindre une puissance de 100 W en utilisant le gadolinium comme matériau magnétocalorique.

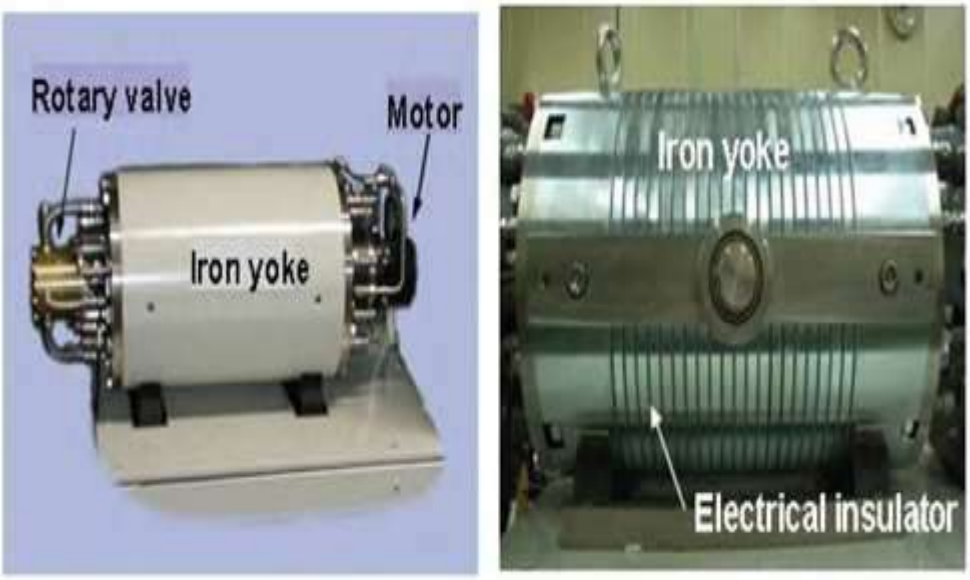


Figure I.10 : Le dispositif japonais initial (gauche) et amélioré (droite). **[20]**

I.3.3.7 Le réfrigérateur magnétique de Zimm :

En 2003, L'ACM (Astronautics Corporation in Madison) a conduit de nombreux travaux de recherche sur la réfrigération magnétique et déposé plusieurs brevets dans ce domaine **[28].** Dans cette corporation, un système d'AMRR a été conçu, celui-ci est composé d'une roue avec 6 lits régénérateurs, eux-mêmes composés de gadolinium en poudre. Cette roue est en rotation à travers une zone de fort champ magnétique de 1.5 T. Les lits régénérateurs échangent avec le fluide dont la circulation est correctement réglée en fonction de la position relative de chaque lit par rapport au champ magnétique.

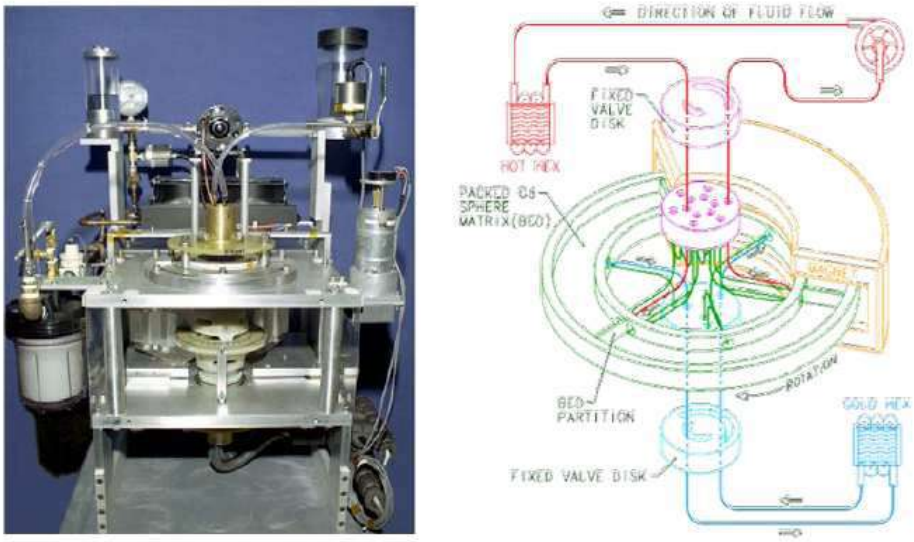


Figure I.11. Photo et principe de fonctionnement du circuit de fluide réfrigérant du Réfrigérateur magnétique rotatif de Zimm et al **[14].**

I.3.3.8.La Réfrigérateur magnétique de Rowe *et al.* (2002-2006) :

Rowe (University of Victoria) et Barclay (Cryofuel Systems) ont conçu et réalisé un prototype de réfrigération magnétique en 2002 **[41]**. Par la suite, Richard (Université du Québec à Trois Rivières) et al. Y ont apporté des améliorations et testé différents matériaux **[39] [40].** Seule la configuration la plus récente est décrite ici. La particularité de ce prototype est son mode d'entraînement. Le prototype est entraîné par un moteur rotatif, relié à un système bielle manivelle pour convertir la rotation du moteur en un mouvement linéaire du régénérateur. Le fluide caloporteur - de l'hélium gazeux - est soumis à un mouvement oscillant dans le régénérateur pour réaliser un cycle AMRR. Le prototype utilise un régénérateur multicouche composé de trois matériaux : Gd (TC = 294 K), Gd0, 74Tb0, 26 (TC = 278 K) et Gd0, 85Er0.15 (TC = 265 K). Cela lui permet d'atteindre un écart de température important (50K avec un champ de 2 T).

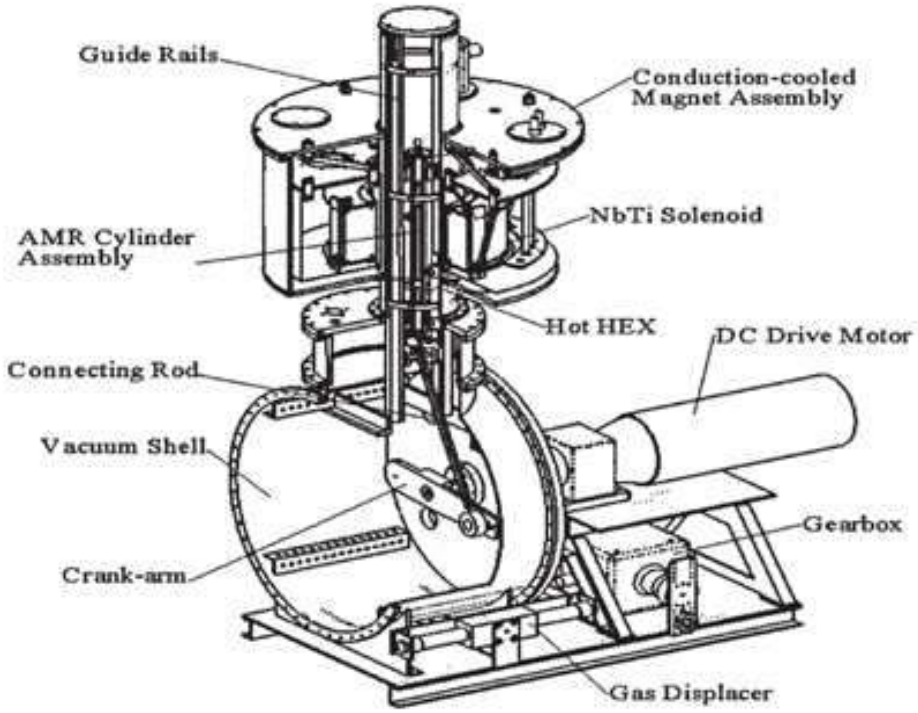


Figure. I.12 : Schéma de réfrigération magnétique de Rowe et al. **[40]**

I.3.3.9.La réfrigérateur magnétique de Zimm *et al.* (2007-2010) :

Astraunotics a réalisé un troisième prototype de réfrigération magnétique en 2007 **[53]**. Le prototype rotatif contient deux sources de champ, constituées d'aimants permanents associés à des pièces polaires à concentration de flux, et qui génèrent chacune un champ de 1,4 T.

Le rotor est un disque composé de 12 segments de matériaux magnétocaloriques. Suite aux résultats décevants lors des premiers essais, Russek *et al.* Ont modifié les régénérateurs et remplacé les plaques parallèles de gadolinium par des empilements de sphères de gadolinium ou de LaFeSiH **[42].** Les résultats obtenus avec le gadolinium sont meilleurs qu'avec le LaFeSiH. Ce prototype atteint des fréquences de fonctionnement élevées et produit des puissances et des écarts de température importants. Il confirme la faisabilité technique de la réfrigération magnétique à température ambiante pour des applications industrielles.

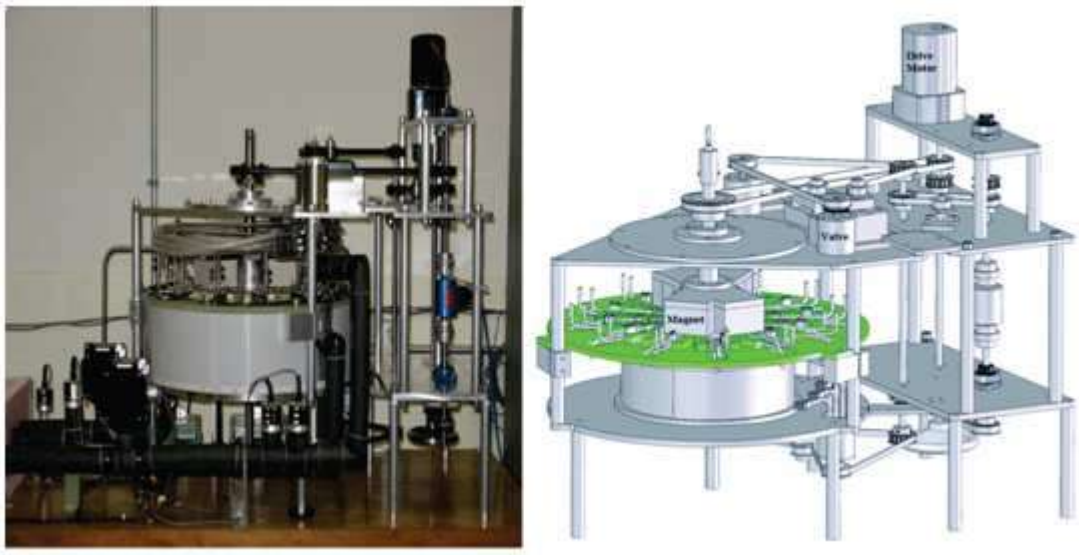


Figure. I.13 : Photo et schéma du 3ème Réfrigérateur magnétique de Zimm et al. **[53]**

I.3.3.10.Réfrigération magnétique réalisé en Espagne :

Le dispositif représenté en (figure I.14) a été développé par l'équipe de l'Université Polytechnique de Catalogne à Barcelone **[4].** Le matériau magnétocalorique est un ruban de gadolinium (Gd 99.9%) fixé sur un disque en plastique et plongé dans un fluide caloporteur (huile d'olive). Le cycle magnétique d'aimantation / désaimantation est assuré par la rotation du disque en plastique et son passage devant un aimant. L'écart de température obtenu est respectivement de 1.6 et 5 K pour un champ de 0.3 T et 0.95 T. Ceci correspond à 2.5 fois l'EMC du Gd. Même si les performances obtenues sont faibles, ce dispositif est le premier qui a montré la faisabilité de la réfrigération magnétique avec des champs accessibles par des aimants permanents.

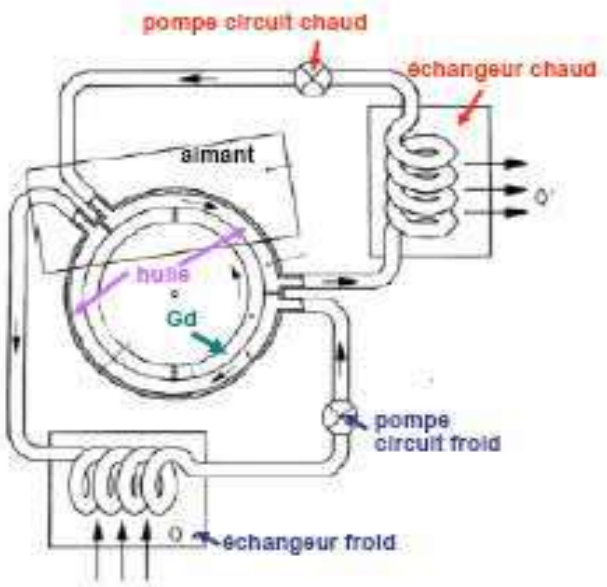


Figure I.14 : réfrigérateur magnétique réalisé en Espagne. **[4]**

I.3.3.11.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.

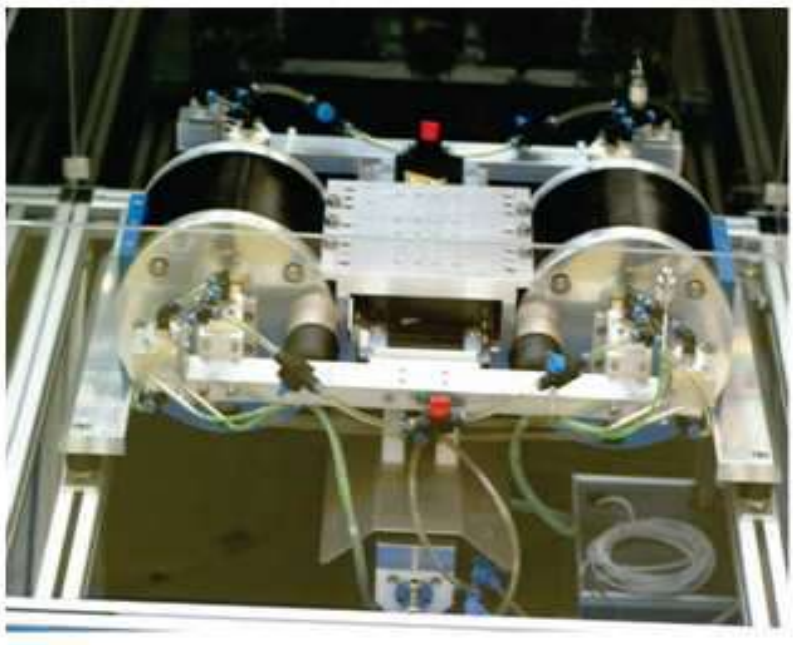


Figure. I.15 : Schéma de réfrigération magnétique de Balli et al. **[7]**

I.3.3.12.Autres Réfrigérateur magnétique :

Parmi les démonstrateurs qui sont construits récemment, on cite celui de Riso en Danemark par l'équipe de Riso DTU **[25].** 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 prés de la température ambiante en septembre 2012 à Grenoble, Thermag V puis récemment publié **[11].** 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 **[24],** Yu et al.2010 **[8],** Romero Gomez et al.2013 **[22]** et Aprea et al.2013 **[10].** Le Tableau (1.1) présente un résumé de nombreux démonstrateurs construits dans le monde.

Laboratoire et lieu	Annone-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	Rotatif	–	1(p)	Gd	–	1	Granulés cylindriques
								Plaques
	2010	Linéaire	–	1.45(p)	Gd	–	–	plaques
	2014	Linéaire	–	1.45(p)	Gd	–	–	
Victoria University, Victoria, Canada	2001	Linéaire	_	2(s)	Gd, Gd-Td	2	14	Multicouches
	2004	Linéaire	1	2(s)	Gd, Gd-Td	10	50	Multicouches
	2007	Linéaire	–	1.4(A)	Gd	–	13	Sphères
	2011	Linéaire	0-5	1.4(AI)	Gd	50	29	Sphères
Chubu Electric/Toshiba, Japon	2000	Linéaire	_	4(S)	Gd	100	21	Sphères
	2002-2003	Rotatif	0.4	0.77(A)	Gd-Dy	40-60	27-10	Multicouches, sphères
								Multicouches, sphères
	2006	Rotatif	_		Gd-Dy	540		
Astronautics, Madison, Wisconsin, USA	1997	Linéaire	_	5(S)	Gd	600	38	Sphères
	2001-2005	Rotatif	4	1.5(A)	Gd, Gd-Er, LaFeSiH	50	20-25	Sphères
							11	
	2007	Rotatif	4	1.4(AI)	Gd	220	–	Plaques
	2012	Rotatif	–	1.44(A)	LaFeSiH	3042		Multicouches
Cooltech Applications, Strasbourg	2005	Rotatif	_	2.4(A)	Gd	360	14	Plaques
	2012	Rotatif	2	0.85(A)	Gd, Gd-Tb	_	39	Plaques, deux étages
G2Elab, Grenoble	2003	Linéaire	0.5	0.8(AI)	Gd	8.8	4_7.8	Lames
	2012	Linéaire	_	0.8(AI)	Gd, LaFeCoSi, PrSrMnO	_	10.5	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

Table. I.1 : Principaux Démonstrateurs des réfrigérateurs magnétiques. **[52]**

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 : **[23]**

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 :

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

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 :

$$dG = Vdp - SdT - \mu_0 VMdH \tag{I.4}$$

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

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

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

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

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

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

En dérivant les équations (I,5),(I,6) et (I,7) respectivement par rapport à T,M et Ton obtient les relation de Maxwall**[27]** :

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

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

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

I.4.2.Expression de l'effet magnétocalorique :

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

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

La différentielle de l'entropie s'écrit alors :

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

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

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

En utilisant les Équations (1.11) et (1.14), l'Équation (1.13) devient

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

Dans le cas d'un système adiabatique **(d*S* = 0)** et isobare, l'Équation (1.15) s'écrit :

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

On voit donc qu'il est possible d'exprimer l'EMC causé par une variation de champ magnétique, en intégrant l'Équation (1.16). De la même façon, si on utilise ***M*** comme variable intensive au lieu de **H**, on obtient :

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

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), soit de façon théorique (il faut alors expliciter les fonctions thermodynamiques caractéristiques du matériau par des considérations sur sa structure microscopique).

I.5.THEORIE DU CHAMP MOLECULAIRE :

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 thermomagnétique 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) que peut être modifiée par la variation du champ magnétiquep.les relations suivantes décrivent les propriétés thermomagnétiques d'un matériau magnétocalorique de seconde **[5 ,6]**

$$S(H, T) = S_M(H, T) + S_r(H, T) + S_e(T) \quad (I.19)$$

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 :

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

Avec

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

Où, μ_B est la magnéto de Bohr, g_J est le facteur de Landé, **J** est le nombre quantique du moment angulaire total et k_B est la constante de Boltzmann.

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

Est la fonction de Brillouin

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

Ou, T_D est la température de Debye.

$$S_e(T) = \gamma T \quad (I.24)$$

Ou,γ est le coefficient de capacité calorifique électronique.

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

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

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

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

I.6. MATERIAUX MAGNETOCALORIQUES (MMC) :

Les MMC sont classés par l'ordre de la transition, soit le degré de continuité de l'enthalpie libre. Les matériaux du second ordre présentent une transition ferromagnétique à paramagnétique « classique » à la température de Curie. Les matériaux du premier ordre ont une aimantation qui varie de façon discontinue à une certaine température. Cette transition présente une chaleur latente et elle souvent associée à des phénomènes d'hystérésis et des états métastables. Les transitions du premier ordre peuvent faire intervenir différents types de transitions comme par exemple une transition de phase structurale. La chaleur latente augmente la variation d'entropie, comme on le voit sur Figure(I.16) (zone entre les lignes en pointillé).

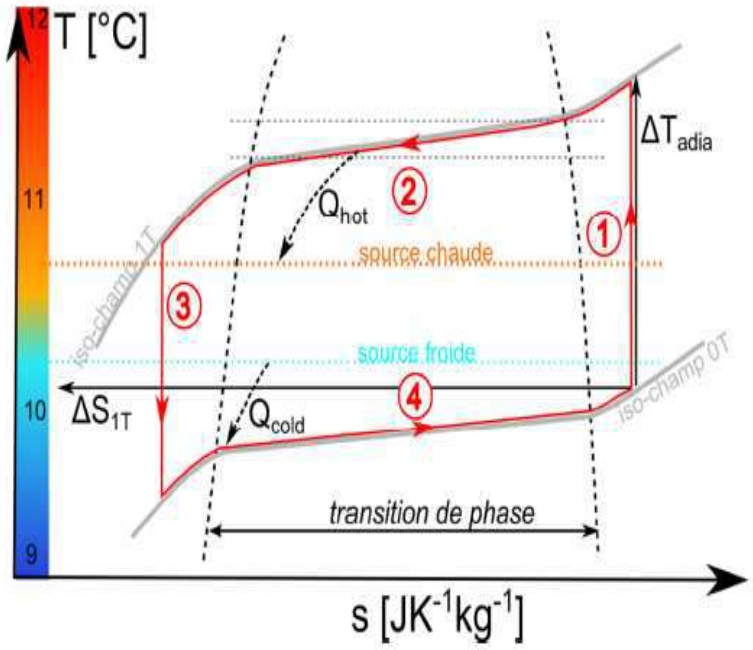


Figure. I.16. Cycle élémentaire de Brayton pour un matériau avec une transition de phase du premier ordre. La transition de phase du premier ordre est délimitée par les deux lignes en pointillé. **[1]**

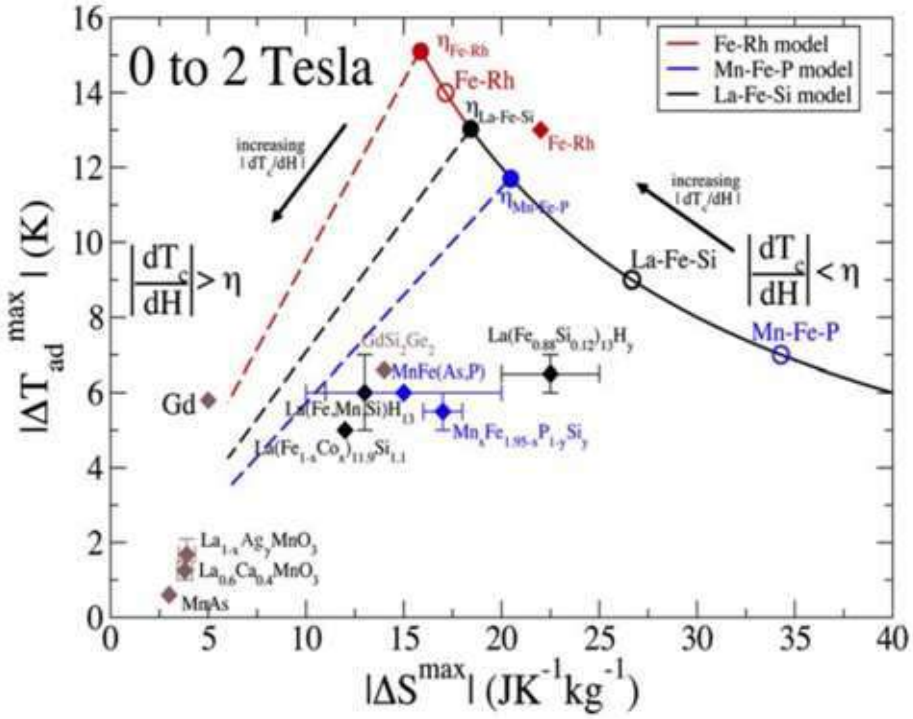


Figure. I.17 : | ΔT_{ad}^{max}| En fonction de |ΔT^{max} | pour plusieurs compositions, un champ de 2 T et une température de Curie autour de l'ambiant. **[34]**

Les losanges représentent les valeurs expérimentales et les bars d'erreurs les variations en fonction de la composition. Les points représentent les valeurs théoriques, extrait de Sur les matériaux la littérature est extrêmement riche, nous n'avons pas l'intention de présenter tous les matériaux mais seulement les plus prometteurs en terme d'application pour la réfrigération. Il s'agit des composés à base de LaFe ou de MnFe comme représenté sur la Figure(I.17). La transition de ces matériaux étant très brutale, on joue sur la composition pour ajuster sa température de transition (Figure. I.18). Ces composés font l'objet de travaux importants pour les obtenir à une échelle industrielle **[26].**

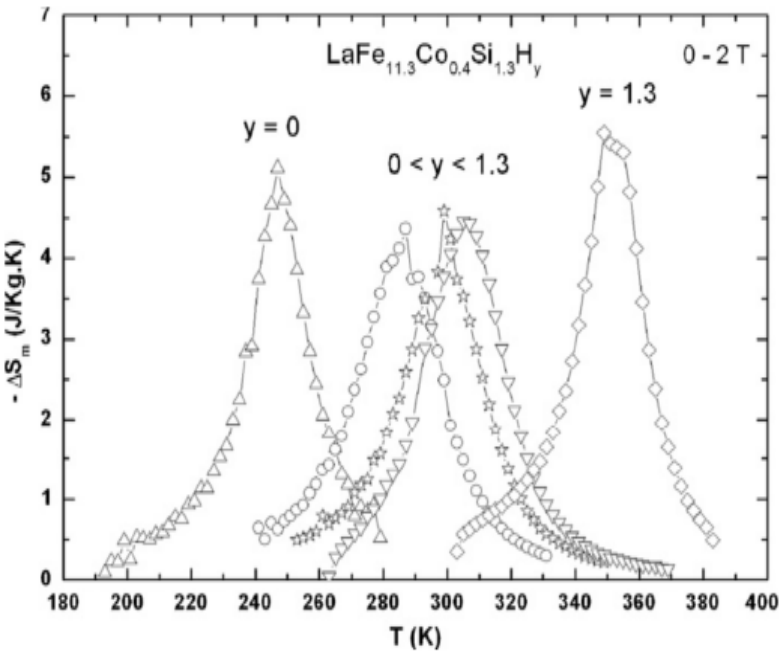


Figure. I.18. Composés LaFeCoSi : Réglage de la température de Curie en contrôlant le taux d'hydruration **[2].**

I.7. CONCLUSION :

Ce chapitre a permis de présenter le potentiel de la réfrigération magnétique. D'abord très utilisée pour les applications à basses températures, la réfrigération magnétique est aujourd'hui prometteuse pour un fonctionnement à température ambiante. Les machines actuelles, encore à l'état de prototype, sont encore difficiles à faire fonctionner convenablement. Indispensable car source de l'effet magnétocalorique (et des performances), de nombreux laboratoires et industriels spécialisés dans ce domaine orientent leurs travaux vers l'optimisation de matériaux à EMC géant. Il est exploitation fonctionnel de l'EMC. De plus en plus de prototypes se construisent dans les laboratoires de recherche. Malgré un coût élevé et une réalisation difficile, ces machines sont nécessaires à l'étude expérimentale de la réfrigération magnétique.

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. Les étapes sont :

1. Le compresseur qui presse le gaz de l'évaporateur au condenseur

2. Un condenseur où la chaleur est transmise à l'espace donc le fluide refroidis de nouveau pour qu'il puisse prendre assez de chaleur dans l'évaporateur.

3. Un papillon des gaz ou le fluide s'expend isenthalp et donc le fluide devient un mixe de fluide et gaz à basse pression.

4. L'évaporateur ou la chaleur est absorbée par le fluide et l'intérieure refroidis.

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

II.2.LES CYCLES DES REFRIGERATIONS MAGNETIQUES :

La réfrigération magnétique exploite l'EMC en mettant en œuvre un cycle magnétothermique équivalent à celui de la réfrigération conventionnelle. 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. **[45]**

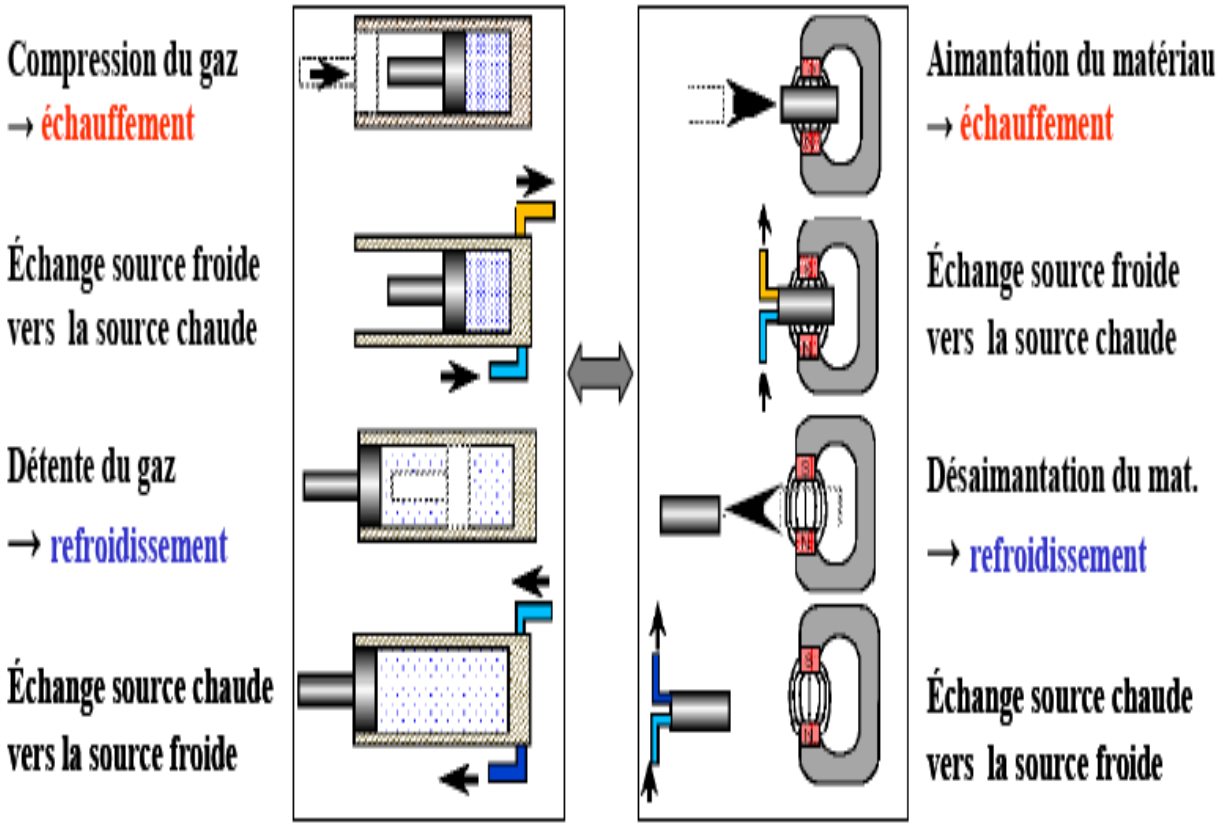


Figure II.1 : Analogie entre le cycle de la réfrigération conventionnel et le cycle de la réfrigération magnétique **[4].**

II.2.1 : Présentation des cycles thermodynamiques appliqués à la RM:

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

La réfrigération magnétique utilise des cycles thermodynamiques du diagramme S-T (entropie - température). Les principaux cycles de réfrigération sont : le cycle magnétique de Carnot, le cycle d'Ericsson, et le cycle de réfrigération magnétique active(AMR).

II.2.1.1.Cycle réfrigération magnétique de Carnot :

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

- ✓ **Aimantation adiabatique** (1→2).

Le MMC est aimanté et sa température augmente.

- ✓ **Aimantation isotherme** (2→3).

Le champ appliqué au MMC est augmenté tout en maintenant la température du MMC fixe. La diminution de l'entropie magnétique est compensée par un rejet de chaleur à la source chaude.

- ✓ **Désaimantation adiabatique** (3→4).

Le champ appliqué au MMC diminue et la température du MMC diminue.

- ✓ **Désaimantation isotherme** (4→1).

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

La mise en œuvre pratique du cycle de Carnot magnétique est complexe car elle nécessite l'utilisation d'au moins quatre amplitudes différentes de champ magnétique. **[29]**

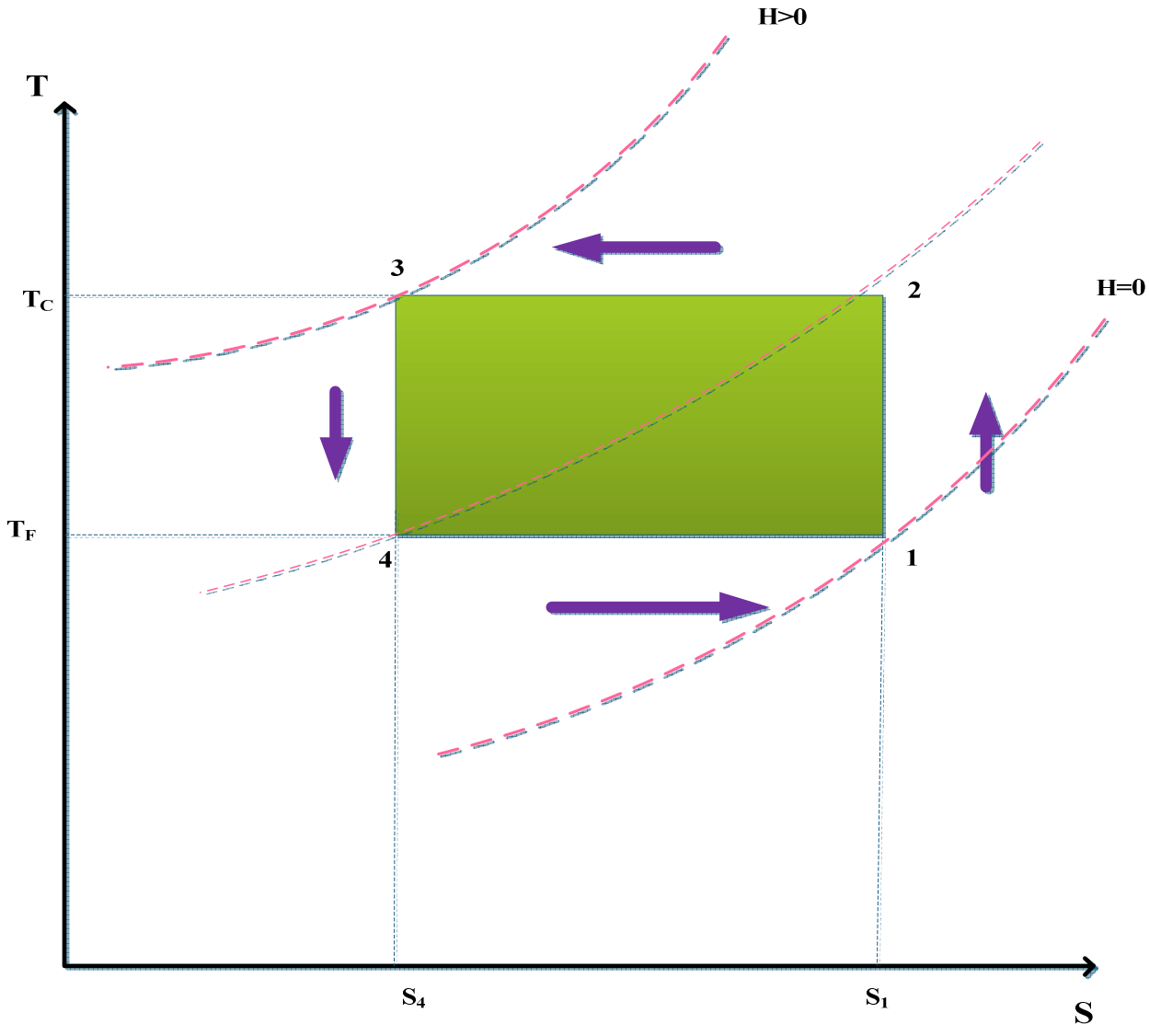


Figure II.2 : Cycle Réfrigération magnétique de Carnot**.**

***Coefficient de performance (COP) :**

Pour définir et évaluer l'efficacité des cycles présentés ci-dessus, il est nécessaire d'introduire un coefficient de performance, le COP. Il est équivalent à la quantité d'énergie récupérée par rapport à la quantité d'énergie fournie (Figure II.3).

Dans cette configuration, W est le travail magnétique, Q_F et Q_C les quantités de chaleur récupérées aux sources froide et chaude, respectivement.

Le coefficient de performance prend en considération seulement ces transferts. Toutes les pertes du système sont négligées. Dans le cas de la réfrigération, le COP se décrit suivant l'équation suivante

$$\mathrm{COP_{froid}} = \frac{\mathrm{Q_{absorbée}}}{\mathrm{W_{fourni}}} = \frac{\mathrm{Q_f}}{\mathrm{W}} \qquad \text{(II.1)}$$

Dans le cas du chauffage, il se décrit suivant (II.3):

$$\mathrm{COP_{chaud}} = \frac{\mathrm{Q_{cédée}}}{\mathrm{W_{fourni}}} = \frac{\mathrm{Q_c}}{\mathrm{W}} \qquad \text{(II.2)}$$

Dans les cas où la variation d'entropie magnétique est constante en fonction de la température (matériau idéal décrit précédemment), le coefficient de performance est alors maximal. La chaleur cédée ou absorbée se définie comme le produit de la température par la variation d'entropie. On se retrouve dans la configuration du cycle de Carnot décrite précédemment, le COP est alors appelé coefficient de Carnot :η_{carnot}

$$\mathrm{COP_{froid-théorique}} = \frac{\mathrm{Q_{froid}}}{\mathrm{W_{fourni}}} = \frac{\mathrm{T_f \Delta S_m(T_f,\Delta B)}}{\mathrm{T_c \Delta S_m(T_c,\Delta B) - T_f \Delta S_m(T_f,\Delta B)}} = \frac{\mathrm{T_f}}{\mathrm{T_C - T_f}} = \eta_{\mathrm{carnot}} \qquad \text{(II.3)}$$

T_C : la température de chaud, T_F : la température de froid.

Ce rapport est utilisé pour tous les cycles thermodynamiques conventionnels.

.

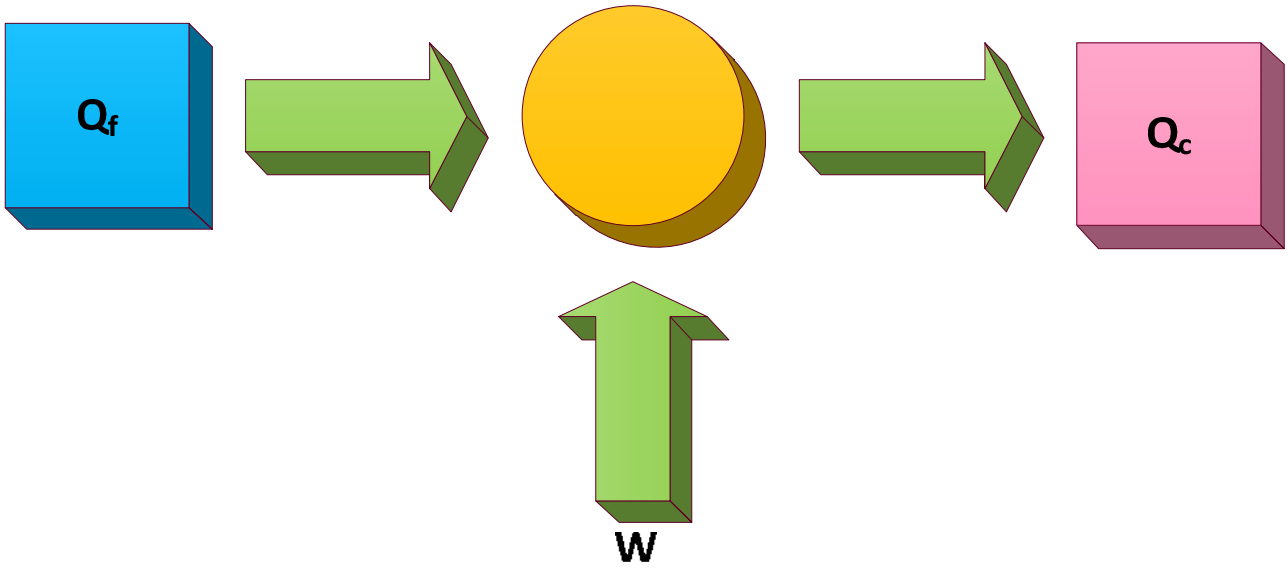


Figure II.3: Schématisation d'un système délivrant de la puissance froide et chaude à l'aide d'un travail fourni.

II.2.1.2. Le cycle réfrigération magnétique d'Ericsson :

Le cycle d'Ericsson est composé de deux isothermes et de deux isochamps (champ constant) comme la figure II.4. La figure II.5, quant à elle, décrit le fonctionnement d'un système de réfrigération reposant sur un cycle d'Ericsson **[6.9.44]**.

- ✓ **Aimantation isotherme** (A→B).

Le champ magnétique augmente de H = 0 à H, l'échange de la quantité de chaleur provenant du matériau réfrigérant avec le fluide régénérant circulant au dessus, entraine une élévation de la température de ce dernier.

$$Q_{AB} = T_{chaud}\,(S_A - S_B) \qquad \text{(II.4)}$$

- ✓ **Refroidissement isochamp** « champ constant » (B→C).

Alors que le champ magnétique reste constant, le matériau réfrigérant et l'électroaimant sont déplacés vers le bas et la quantité de chaleur est transférée ce qui donne naissance à un gradient de température dans le fluide régénérant.

$$Q_{BC} = \int_{S_C}^{S_B} T\,dS \qquad \text{(II.5)}$$

- ✓ **Désaimantation isotherme** (C→D).

Quand le matériau n'est plus soumis au champ magnétique, celui-ci absorbe la quantité de chaleur à partir du fluide régénérant. Le fluide circulant en bas est alors refroidi.

$$Q_{CD} = T_{froid} (S_C - S_D) \quad \text{(II.6)}$$

- ✓ **Réchauffement à champ nul** (D→A).

Toujours à champ nul, le matériau réfrigérant et l'électroaimant sont déplacés vers le haut et le fluide régénérant absorbe la quantité de chaleur

$$Q_{DA} = \int_{S_D}^{S_A} T dS. \quad \text{(II.7)}$$

Le COP d'Ericsson devient égale à celui de cycle de Carnot :

$$COP_{Ericsson} = \frac{T_F[S_D - S_A]}{-T_F[S_D - S_A] - T_C[S_B - S_C]} \quad \text{(II.8)}$$

$$\lim_{T_F \to T_C} COP_{Ericsson} = \frac{T_F}{T_C - T_F} = COP_{Carnot} \quad \text{(II.9)}$$

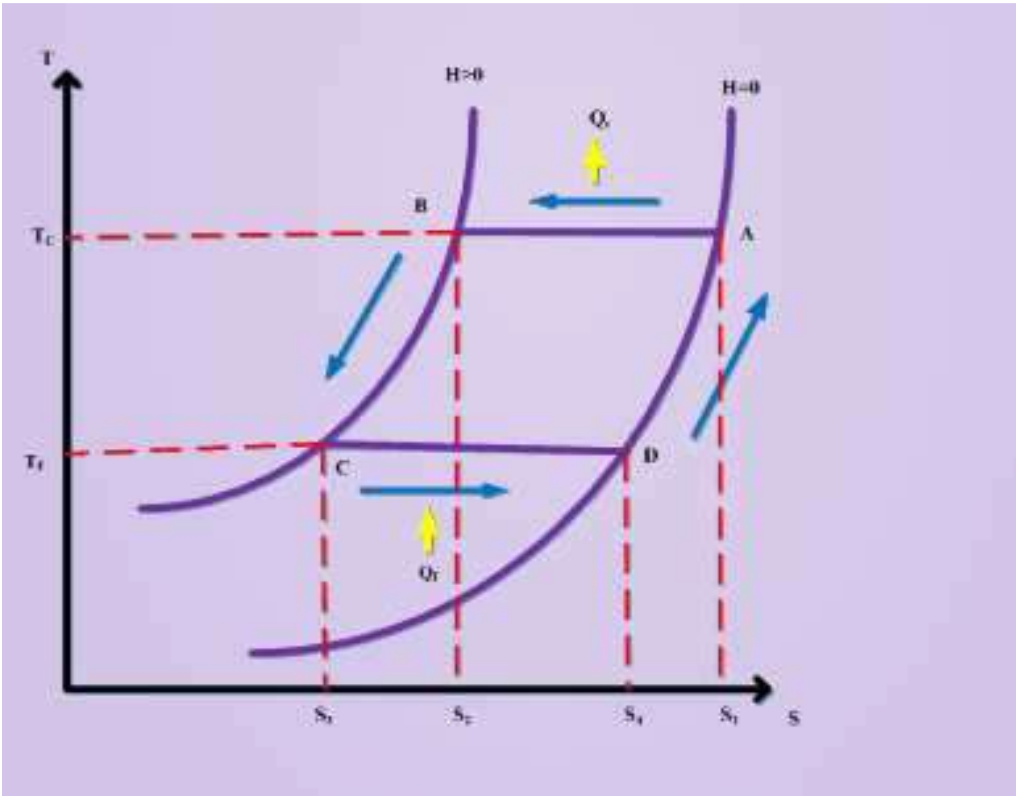


Figure II.4 : Cycle Réfrigération magnétique d'Ericsson.

Afin de rendre un cycle d'Ericsson aussi efficace que le cycle de Carnot, il est nécessaire que les quantités de chaleur échangées durant les deux processus isothermes Q_{AB} et Q_{CD} soient égales. Un cycle d'Ericsson optimal est obtenu si les courbes S(T;H) sont horizontales (ici DA//BC), c'est-à-dire si la variation d'entropie magnétique ΔS_M reste constante sur un large domaine de température.

Peu de matériaux présentent un tel palier sur leurs courbes de variation d'entropie magnétique, c'est pourquoi le cycle d'Ericsson est surtout employé avec des matériaux composites **[6, 55].**

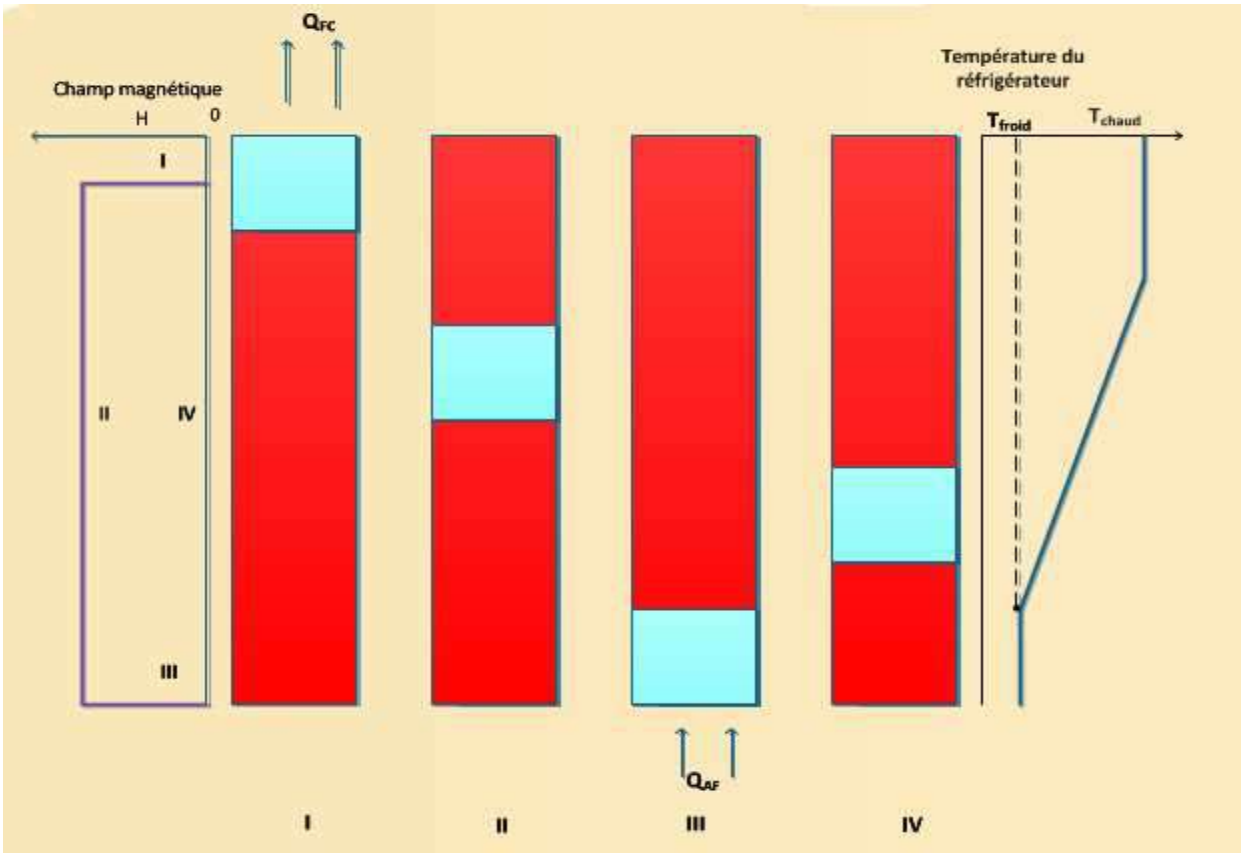


Figure II.5 : Représentation schématique d'un système de réfrigération basé sur un cycle d'Ericsson.

II.2.1.3. Le cycle réfrigération magnétique active(AMRR) :

La figure II.6, représente un cycle AMRR utilisant un lit de plaques perforées composées d'un élément magnétocalorique ayant un profil de température quasiment linéaire entre les réservoirs chaud et froid. La figure II.7, quant à elle, présente l'évolution du profil de température du système à chacune des quatre étapes d'un cycle AMRR,

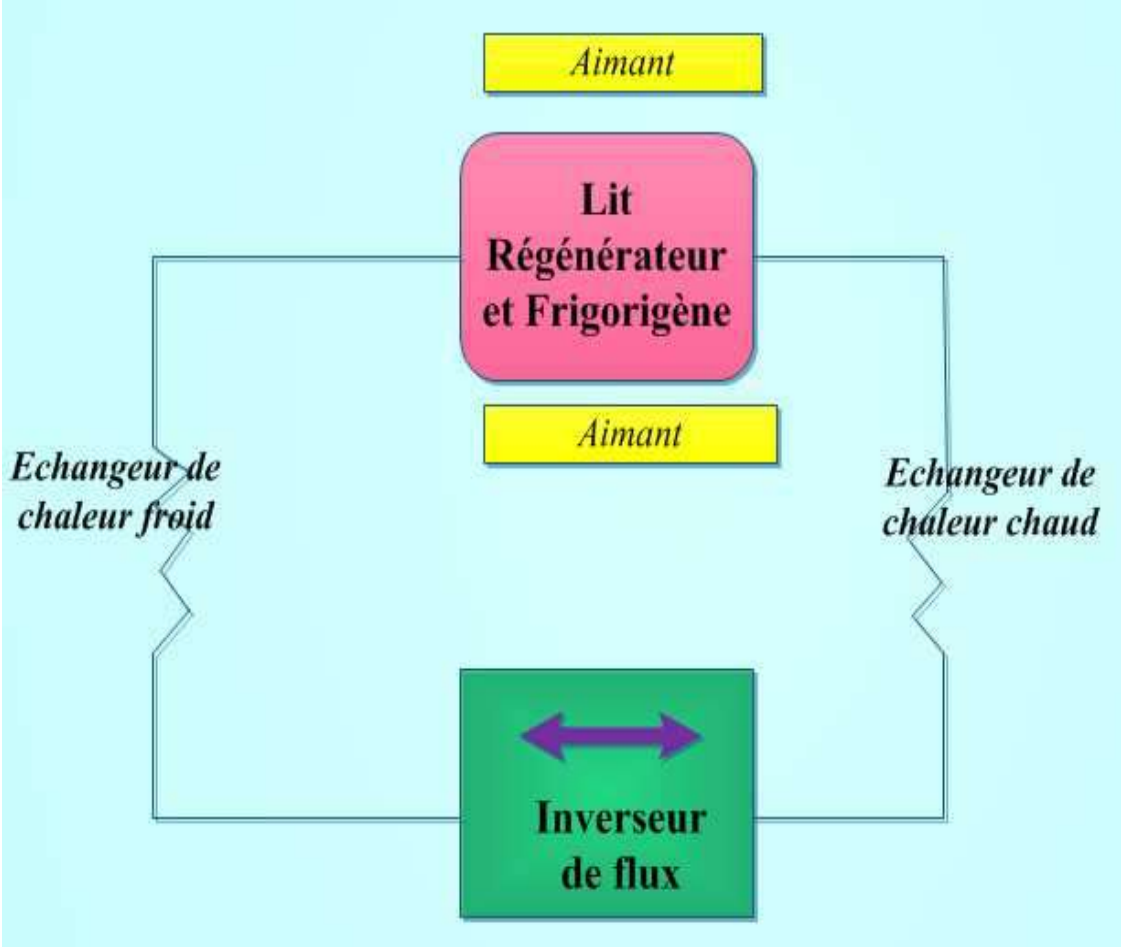


Figure II.6 : Description schématique d'un réfrigérateur AMRR**.**

L'exploitation directe de l'EMC géant autour de la température ambiante ne permet pas d'atteindre des écarts de température élevés, en particulier dans les systèmes à aimants permanents. Ces écarts de température peuvent être amplifiés grâce à des cycles magnétothermiques spécifiques appelés cycles à régénération AMRR **[5]** (Active Magnetic Regenerative Refrigeration). La plupart des prototypes réalisés dernièrement pour montrer la faisabilité de la réfrigération magnétique autour de l'ambiante utilisent ce type de cycle. Un cycle (AMRR) se décompose en 4 étapes comme montré sur les figures II.7, deux adiabatiques et deux isochamps.

- ✓ **Aimantation du matériau.**

L'effet magnétocalorique entraine une élévation de la température le long du lit régénérateur. Chaque point du matériau régénérateur voit sa température augmenter de ΔT.

- ✓ **Écoulement du fluide du réservoir froid vers le réservoir chaud.**

Le fluide, initialement froid, va abaisser la température du lit tout en se réchauffant durant sa traversée. La température du matériau coté chaud devient supérieure à celle coté froid, on crée un gradient de température.

- ✓ **Désaimantation du matériau.**

Celle-ci entraîne une baisse de la température en chaque point du frigorigène.

- ✓ **Écoulement en sens inverse du fluide du réservoir chaud vers le réservoir froid.**

Le fluide, initialement chaud, va échanger avec le lit ce qui va lui permettre de revenir à sa température initiale. Le gradient de température est ainsi amplifié.

Dans un cycle AMRR, le lit agit comme un régénérateur ; la chaleur n'est plus transférée entre deux solides séparés car le fluide baigne en permanence les parties solides du régénérateur.

De plus, chaque particule du lit subit un cycle de Brayton tandis que l'ensemble du lit subit une cascade de ***n*** cycles de Brayton. Ainsi, l'écart de température ΔT entre les sources chaudes et froides obtenu après ***n*** cycles, c'est-à-dire en régime permanent est considérablement supérieur à la variation de température adiabatique du matériau frigorigène**. [9]**

Enfin le domaine de température de travail peut encore être augmenté si l'on superpose des plaques perforées constituées de matériaux de compositions différentes.

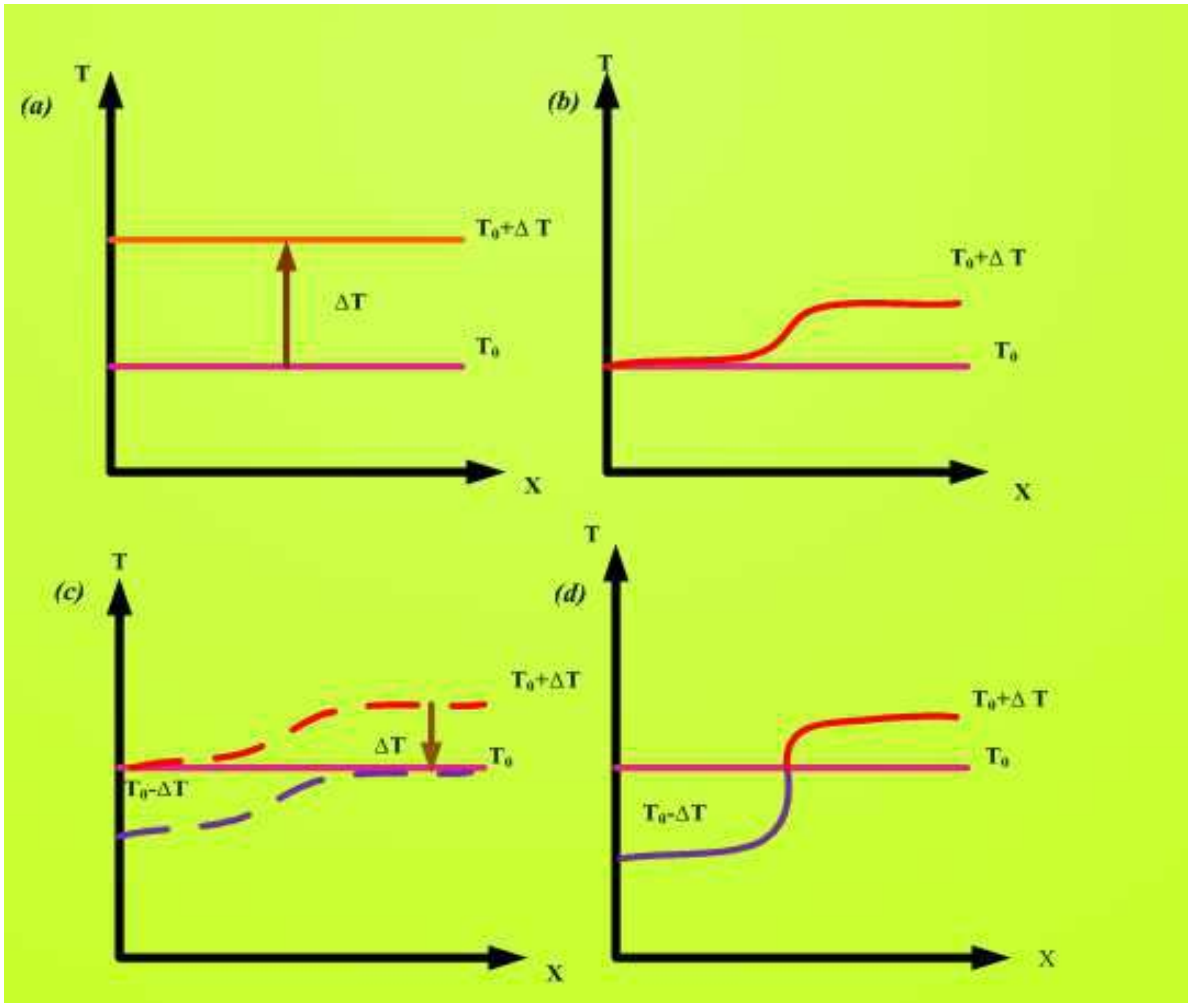


Figure II.7. : Profils de température associés au cycle AMRR.

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

$$COP = \frac{Q_c}{\dot{W}_{mag}+\dot{W}_p+\dot{W}_F} \quad \text{(II.10)}$$

Ou, $\dot{W}_{mag}, \dot{W}_{p,} \dot{W}_F et Q_c$représente le travail magnétique, travail fourni par la pompe les pertes dus aux courants de Foucault et la puissance frigorifique respectivement :

$$\dot{W}_{mag} = \int \vec{F}.\overrightarrow{dl} \quad \text{(II.11)}$$

$$\dot{W}_p = V\frac{\Delta P}{\eta p} \quad \text{(II.12)}$$

$$Q_c = \dot{m}_f c_f\left(T_c - \overline{T}_{f,c}\right) \quad \text{(II.13)}$$

$$\overline{T}_{f,c} = \frac{1}{t}\int_1^T T(x = L, t)\, dt \quad \text{(II.14)}$$

II.3.ETUDE DU CYCLE REFRIGERATION MAGNETIQUE DE BRAYTON :

Le cycle de Brayton réfrigération magnétique est l'un des cycles de réfrigération importants et présente certains avantages distincts qui sont à noter dans la recherche et la fabrication de réfrigérateurs magnétiques à température ambiante. Bien que l'analyse et la conception de certains cycles de réfrigération magnétique Brayton a été entrepris, la recherche sur la performance du cycle de réfrigération magnétique Brayton est relativement rare. En fait, le cycle de réfrigération magnétique Brayton est également un cycle de régénération significative. Par conséquent, il est nécessaire de considérer à la fois la régénération et d'autres effets irréversibles sur un cycle de réfrigération magnétique Brayton. Dans ce chapitre, nous examinons les principales caractéristiques d'un cycle de réfrigération magnétique irréversible régénérative Brayton. Le papier est organisé comme suit. Dans secte. 1, les principales propriétés thermodynamiques d'un sel paramagnétique sont analysés. Dans sectes. 2 et 3, un cycle de réfrigération magnétique irréversible régénérative Brayton est établi et les expressions de la Conférence des Parties, la vitesse de refroidissement et l'entrée d'alimentation sont dérivées. Les courbes caractéristiques entre ces trois paramètres de performances importantes et les températures de la substance de travail aux deux points d'état importants sont tracée. Dans secte. 4, par des moyens de calcul numérique, un peu de performance importants limites et les régions de fonctionnement optimales de la réfrigération magnétique cycle sont en outre analysé. **[48]**

II.3.1.Définition :

Le **cycle de Brayton** est un cycle thermodynamique à caloporteur gaz. Il tient son nom de l'ingénieur américain George Brayton (1830–1892) qui l'a développé, bien que son invention soit attribuée à Barber en 1791. Il est aussi connu sous le nom du **cycle de Joule**.

II.3.2.Description du cycle réfrigération magnétique de Brayton :

La figure II.8 représente le cycle de Brayton, qui est l'un des plus cycles de base de machine à réfrigération magnétique fondées sur ce cycle fonctionne entre deux processus à champ constant (champs magnétiques constants H_0) et deux courbes isentropiques (AB) et (CD) (total constant entropie spécifique de S). Quand un matériau magnétocalorique est déplacé dans un champ magnétique, l'entropie totale reste constante Le cycle de Brayton **[12]** est constitué de deux processus adiabatique (BC) et (DA) et deux processus à champ constant.

La Figure II.8 présente un matériau idéal soumis à ce type de cycle. Il se décrit de la façon suivante:

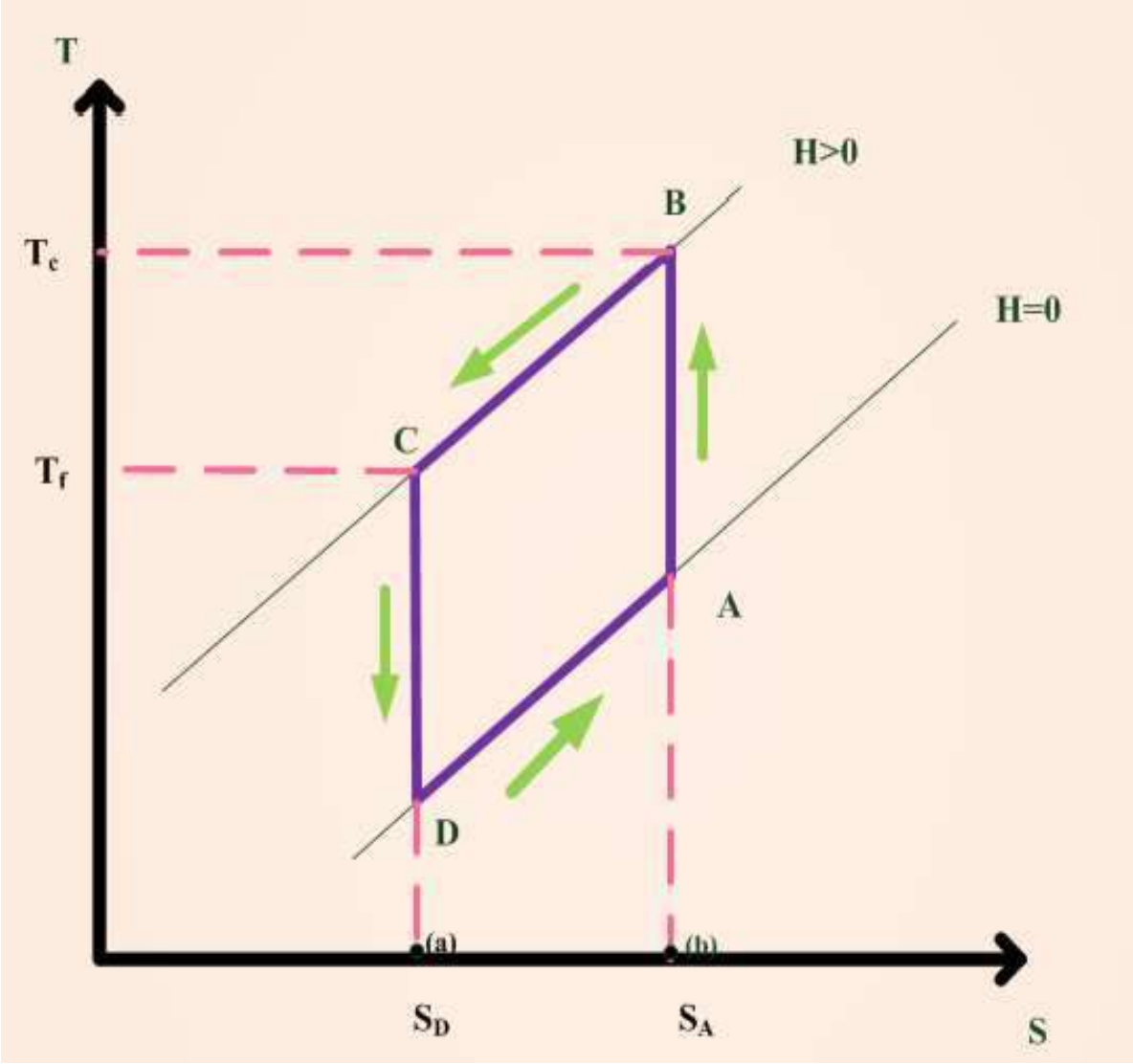


Figure II.8 : Cycle Réfrigération magnétique de Brayton.

La Figure II.8 présente un matériau idéal soumis à ce type de cycle. Il se décrit de la façon suivante:

- ✓ **Aimantation adiabatique** (entropie constant).

Le matériau s'échauffe instantanément sans échanger de chaleur avec l'extérieur.

- ✓ **Refroidissement isochamp** (champ constant).

Le matériau reste aimanté et cède de la chaleur à la source chaude, ce qui le refroidit.

- ✓ **Désaimantation adiabatique** (entropie constant).

Le matériau se refroidit instantanément sans échanger de chaleur avec l'extérieur.

- ✓ **Réchauffement isochamp (**champ constant).

Le matériau absorbe de la chaleur en provenance de la source froide.

Un critère, important pour évaluer les systèmes, est le coefficient de performance COP (Coefficient Of Performance) qui, dans une application de réfrigération, représente le ratio entre l'énergie froide $\mathbf{Q_F}$et le travail fournie **w**:

$$\left.\begin{aligned} W &= \oint dW = \mu_0 \oint M\, dH_0 \\ &= \mu_0 \int_A^B M\, dH_0 + \mu_0 \int_C^D M\, dH_0 \end{aligned}\right\} \quad \text{(II.15)}$$

. Dans le cas adiabatique (dS= 0) il résulte de l'équation:

$$\int dh_1 = \mu_0 \int M dH_0 \quad \text{(II.16)}$$

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

$$W = \int_A^B dh_1 + \int_C^D dh_1 = \left[h_1^{(B)} - h_1^{(A)}\right] + \left[h_1^{(D)} - h_1^{(C)}\right] \quad \text{(II.18)}$$

$$W = -\int_B^C Tds - \int_D^A Tds \quad \text{(II.19)}$$

$$ds = \left(\frac{\partial s}{\partial T}\right)_{H_0} dT \quad \text{(II.20)}$$

$$W = -\int_B^C c_{H_0} dT - \int_D^A c_{H_0} dT \quad \text{(II.21)}$$

$$W = -\int_B^C \left(\frac{\partial h_1}{\partial T}\right)_{H_0} dT - \int_D^A \left(\frac{\partial h_1}{\partial T}\right)_{H_0} dT \quad \text{(II.22)}$$

$$W = \left[h_1^{(B)} - h_1^{(C)}\right] - \left[h_1^{(A)} - h_1^{(D)}\right] = \left[h_1^{(B)} - h_1^{(A)}\right] + \left[h_1^{(D)} - h_1^{(C)}\right] \quad \text{(II.23)}$$

$$COP = \frac{Q_F}{W} \quad \text{(II.24)}$$

$$Q_F = \int_D^A Tds \quad \text{(II.25)}$$

$$Q_c = \int_B^C Tds \quad \text{(II.26)}$$

$$W = -Q_F - Q_C \quad \text{(II.27)}$$

L'application de la relation (II.24) pour le cycle de Brayton donne :

$$\mathrm{COP_{Brayton}} = \frac{\int_D^A \mathrm{TdS}}{-\int_D^A \mathrm{TdS} - \int_B^C \mathrm{TdS}} \quad \text{(II.28)}$$

$$COP_{Brayton} = \frac{\left[h_1^{(A)} - h_1^{(D)}\right]}{\left[h_1^{(B)} - h_1^{(A)}\right] + \left[h_1^{(D)} - h_1^{(C)}\right]} \quad \text{(II.29)}$$

Donc le rendement de cycle de Brayton :

$$\eta = \frac{\mathrm{COP_{Brayton}}}{\mathrm{COP_{Carnot}}} \quad \text{(II.30)}$$

Le cycle de Brayton est optimal lorsque les courbes {T – S} sont parallèles.

II.4.L'ANALYSE EXERGETIQUE DE LA REFRIGERATION MAGNETIQUE :

Le cycle de Brayton magnétique est considéré comme décrit précédemment. Pendant le processus de refroidissement iso domaine B, C (champ magnétique constant de H> 0), le réfrigérant magnétique expulse $\mathbf{Q_F}$ de chaleur égale à la surface de BCab sur la (figure II.8). Pendant le processus de chauffage de domaine iso C, D (magnétique constant champ H=0), le réfrigérant magnétique absorbe de la chaleur $\mathbf{Q_F}$ égale à l'aire de ADab. Non chaleur flux de et hors du réfrigérant magnétique chaleur pendant le processus d'aimantation adiabatique A, B et la démagnétisation adiabatique C, D processus. Pour développer l'analyse exergétique de ce cycle, il est nécessaire d'évaluer ces domaines, mais de le faire de la fonction S= S (T; H) doivent être connus**. [55]**

La chaleur est échangée:

$$\left.\begin{aligned} Q_F &= -\int_C^B Tds = aire(ADab) \\ Q_C &= \int_D^A Tds = aire(BCab) \end{aligned}\right\} \quad \text{(II.31)}$$

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

$$\left.\begin{aligned} Q_F &= \frac{T_D+T_A}{2}(S_A - S_D) \\ Q_C &= \frac{T_B+T_C}{2}(S_B - S_C) \end{aligned}\right\} \quad \text{(II.32)}$$

Où $\mathbf{T_{C\,m}} = (TA + TB) / 2$ est la valeur moyenne de la température entre T_B et T_C et $\mathbf{T_{Fm}} = (T_A + T_D) / 2$ est la valeur moyenne de la température entre T_D et T_A. Considérant que $(S_B - S_C) = (S_A - S_D) = \Delta S$ il se ensuit:

Par conséquent, il s'ensuit**:**

$$\left.\begin{aligned} Q_F &= T_{Fm}\Delta S \\ Q_C &= T_{Cm}\Delta s \end{aligned}\right\} \quad \text{(II.33)}$$

Ensuit :

$$H_0 = \left(1 - \frac{T_a}{T_{Fm}}\right) Q_F = \left(1 - \frac{T_a}{T_{Fm}}\right) T_{Fm}\Delta S \quad \text{(II.34)}$$

$$H_1 = \left(1 - \frac{T_a}{T_{Cm}}\right) Q_C = \left(1 - \frac{T_a}{T_{Cm}}\right) T_{Cm}\Delta S \quad \text{(II.35)}$$

$$W = Q_C - Q_F = T_{Cm}\Delta S - T_{Fm}\Delta S \quad \text{(II.36)}$$

$$COP = \frac{Q_F}{W} = \frac{T_{Fm}}{T_{Cm} - T_{Fm}} \quad \text{(II.37)}$$

Donc le Rendement exergetique :

$$\eta_{ex} = \frac{H_0}{H_0 + H_1} = \frac{T_{Fm} - T_a}{T_{Fm} + T_{Cm} - 2T_a} \quad \text{(II.38)}$$

II.5.UN CYCLE DE REFRIGERATION MAGNETIQUE IRREVERSIBLE REGENERATIVE BRAYTON :

Un cycle de réfrigération magnétique irréversible régénérative Brayton se compose de deux processus adiabatique et deux processus magnétiques à champ magnétique constant. Son diagramme température-entropie est illustré à la (figure II.9).2-4 et 5_S-1 sont les deux processus constant sur le terrain à des valeurs de champs H_1 et H_2 ($H_1 > H_2$), respectivement. 1-2s et 4-5s sont les deux processus adiabatiques réversibles; 1-2 et 4-5 sont les deux processus adiabatique irréversibles; la régénération est réalisée au cours des processus 4.3 et 1.6; $\mathbf{Q_H}$ et $\mathbf{Q_L}$ sont les quantités d'échange de chaleur entre des substances de travail et les accumulateurs de chaleur; $\mathbf{Q_R}$ est le montant de la régénération; $\mathbf{T_H}$ et $\mathbf{T_L}$ sont les températures des haute et basse température des réservoirs, et les températures des points de l'état 1, 2, 2s, 3, 4, 5 ,5s et6 sont représentés par $\mathbf{T_1}$, $\mathbf{T_2}$, $\mathbf{T_{2s}}$, $\mathbf{T_3}$, $\mathbf{T_4}$, $\mathbf{T_5}$, $\mathbf{T_{5s}}$ et $\mathbf{T_6}$, respectivement. Les températures de la substance de travail ont la relation suivante:**[57]**

$$T_{5S} < T_5 < T_6 < T_L < T_4 < T_H < T_3 < T_{2S} < T_2 \,. \qquad \text{(II.39)}$$

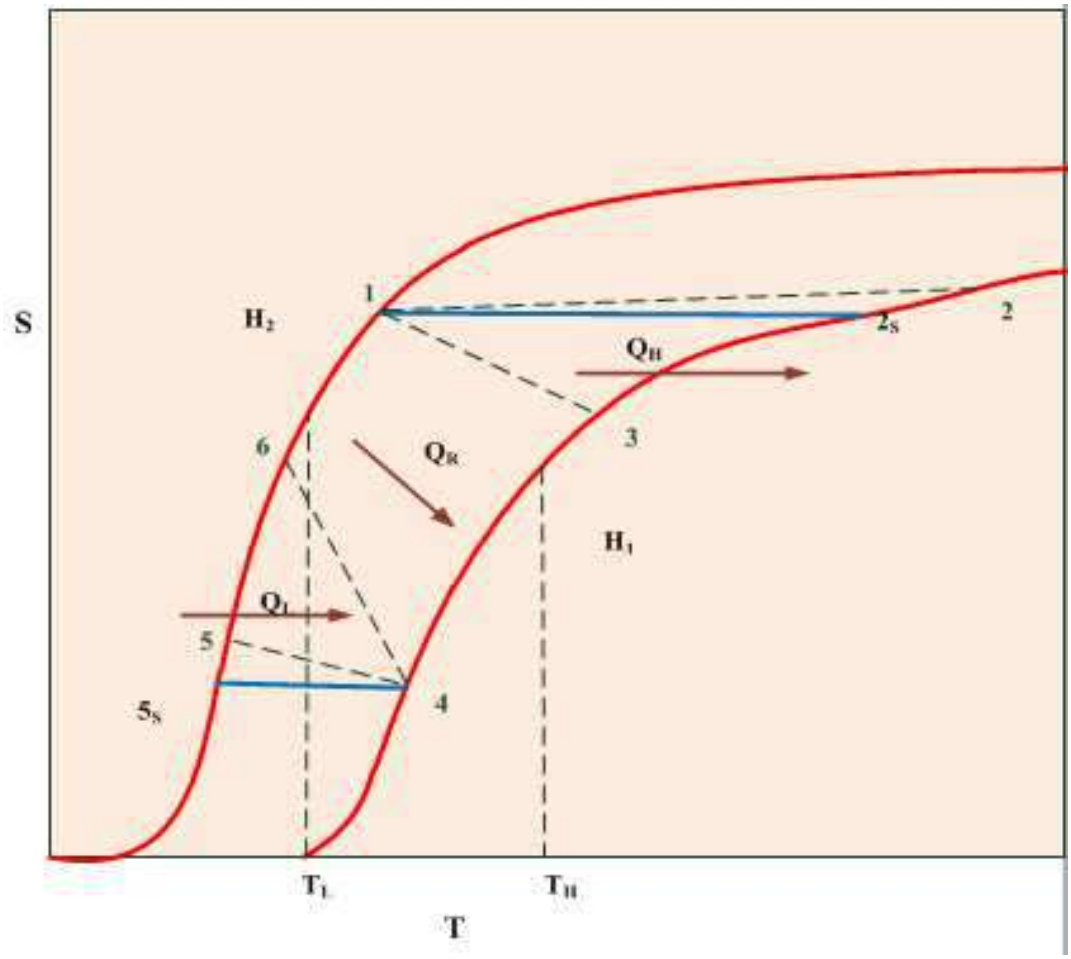


Figure II.9 : Le diagramme d'un cycle de réfrigération irréversible régénérateur magnétique Brayton température-entropie.

Selon le modèle de cycle mentionné, Q_R, Q_H et Q_L peuvent être exprimées, respectivement, en tant que:

$$Q_R = Q_{34} = Q_{61} = CH_2^2\chi^2\left(\frac{1}{T_4} - \frac{1}{T_3}\right) = CH_2^2\left(\frac{1}{T_6} - \frac{1}{T_1}\right) \quad \text{(II.40)}$$

$$Q_C = Q_{23} = CH_2^2\chi^2\left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_3}\right) \quad \text{(II.41)}$$

Et

$$Q_F = Q_{56} = CH_2^2\chi^2\left(\frac{1}{T_5} - \frac{1}{T_6}\right) \quad \text{(II.42)}$$

$$\frac{T_{2S}}{T_1} = \frac{T_4}{T_{5S}} = \frac{H_1}{H_2} \quad \text{(II.43)}$$

Où$\chi = H_1 / H_2 > 1$ est le rapport entre les deux champs magnétiques. Pour un vrai réfrigérateur magnétique, les processus connexes du cycle sont généralement irréversibles. Pour décrire l'irréversibilité dans les deux processus adiabatique, nous introduisons les compressions et d'expansion efficacité

$$\eta_e = \frac{T_4 - T_5}{T_4 - T_{5s}} \quad \text{(II.44)}$$

Et $$\eta_c = \frac{T_{2s} - T_1}{T_2 - T_1} \quad \text{(II.45)}$$

En utilisant les équations (II.42 ; II.44) les températures aux points de l'etat 1,2, 4 et 5 de la substance de travail peut être exprimé comme:

$$T_1 = \alpha T_H = \frac{\alpha}{\tau} T_L \quad \text{(II.46)}$$

$$T_{2=\frac{\alpha(\chi+\eta_c-1)}{\eta_c \tau}} T_L \quad \text{(II.47)}$$

$$T_4 = \frac{\alpha\chi^2}{\alpha+(\alpha\chi^2-1)\tau} T_L \quad \text{(II.48)}$$

Et $$T_5 = \frac{\alpha\chi(\eta_e+\chi-\chi\eta_e)}{\alpha+(\alpha\chi^2-1)\tau} T_L \quad \text{(II.49)}$$

Où $\tau = T_L / T_H$ est le rapport de la température des deux réservoirs et $\alpha = T_1 / T_H$ est un facteur de régénération.

Il est facile à trouver à partir de la figure II.9, que, lorsque α = 1, le cycle est actionné dans le cas d'une régénération maximale, c'est à dire, $Q_R = CH_2\ 2\ T_L\ -1T_H$; lorsque $\alpha = \tau$, le cycle est utilisé dans le cas sans régénération. Ainsi, la gamme de α est$\tau \leq \alpha \leq 1$. Équations suppléants. (II.45) - (II.48) dans les équations. (II.40) et (II.41) donne **[57]**

$$Q_C = C\chi^2 H_2^2 \left(\frac{1}{T_3} - \frac{\tau\eta_C}{\alpha(\chi+\eta_C-1)T_L}\right) \quad \text{(II.50)}$$

Et $$Q_F = CH_2^2 \left(\frac{\alpha + (\alpha\chi^2 - 1)\tau}{\alpha\chi(\eta_e + \chi - \chi\eta_e)T_L} - \frac{1}{T_6} \right) \quad \text{(II.51)}$$

II.6.CONCLUSION :

Dans ce chapitre nous avons défini les cycles réfrigération magnétique et quelques différents prototypes déjà réalisés. On retrouve les cycles de Carnot, Ericsson et le cycle magnétique à régénération active (AMR).Par la suite on a explique le cycle réfrigération magnétique de Brayton est reste le mois complique à étudier, il est nécessaire d'utiliser un cycle régénératif pour atteindre les écarts de température requis pour des applications industrielles .Et aussi en explique les Expressions du la COP, le travail ,la quntite de chaleur de source froid et chaud ,et en fin le rendement exergetique .

III.1.INTRODUCTION :

Dans ce chapitre, on présente les résultats des études numériques de la théorie du champ moléculaire appliquée sur les matériaux « Gadolinium ; Dysprosium ; Erbium », les courbe d'évolutions de l'effet magnétocalorique, la chaleur spécifique, l'entropie 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 à la fin étudier le cycle réfrigération magnétique de Brayton.

III.2.CALCUL PROPRIETES MAGNETIQUE DES MATERIAUX MAGNETOCALORIQUES :

La théorie du champ moléculaire présente une grande importance pour connaître l'influence des différents paramètres intervenant dans un système de réfrigération magnétique.

Dans cette section nous allons applique l'étude théorique basée sur la théorie de champ moléculaire (MTF) et développée précédemment (chapitre I) sur du Gd, 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	294	2	3.5	0.157	1.5	$1.380662\ 10^{-23}$	40	300
Dy	179	178	1.33	7.5	0.160	1.5	$1.380662\ 10^{-23}$	40	300
Er	192	85	1.2	7.5	0.167	1.5	$1.380662\ 10^{-23}$	40	300

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

III.2.1.Définition :

***Le gadolinium** (Gd) : est un élément chimique, de symbole Gd et de numéro atomique 64. Le gadolinium est un métal faisant partie des terres rares. Il est gris argent, malléable et ductile à la température ambiante.

***Le dysprosium** (Dy) : est un élément chimique, de symbole Dy et de numéro atomique 66. Et est un métal faisant partie des terres rares, d'aspect gris argenté. Comme les autres membres de la famille des lanthanides, il est malléable, ductile et assez mou pour être coupé avec un couteau. Il est assez stable dans l'air.

***L'erbium** (Er) : est un élément chimique de symbole Er et de numéro atomique 68. L'erbium constitue un métal du groupe des terres rares. 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.

1ere cas :

Dans le première cas nous allons applique l'étude théorique basée sur la théorie de champ moléculaire (MTF) 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.

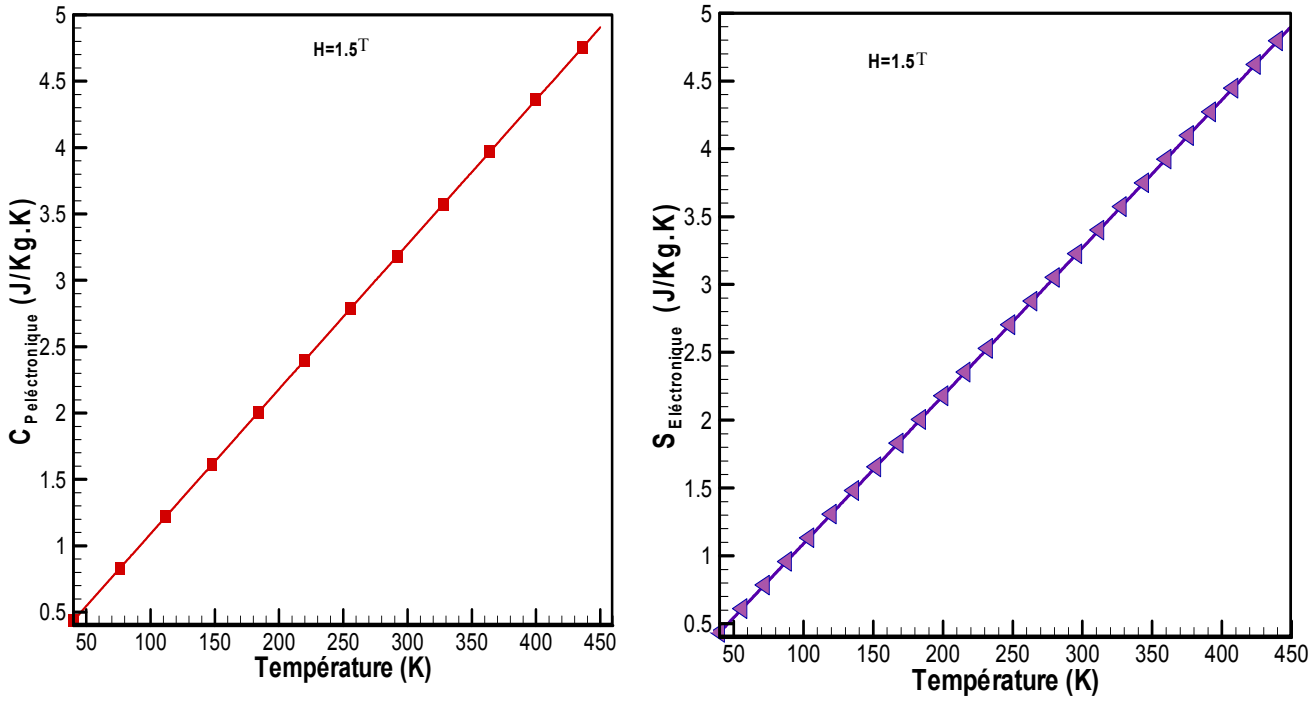


Figure III.1: Evolution de la chaleur spécifique électronique et l'entropie électronique en fonction de Température.

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 (MTF) 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 augmente linéairement avec l'augmentation de température.

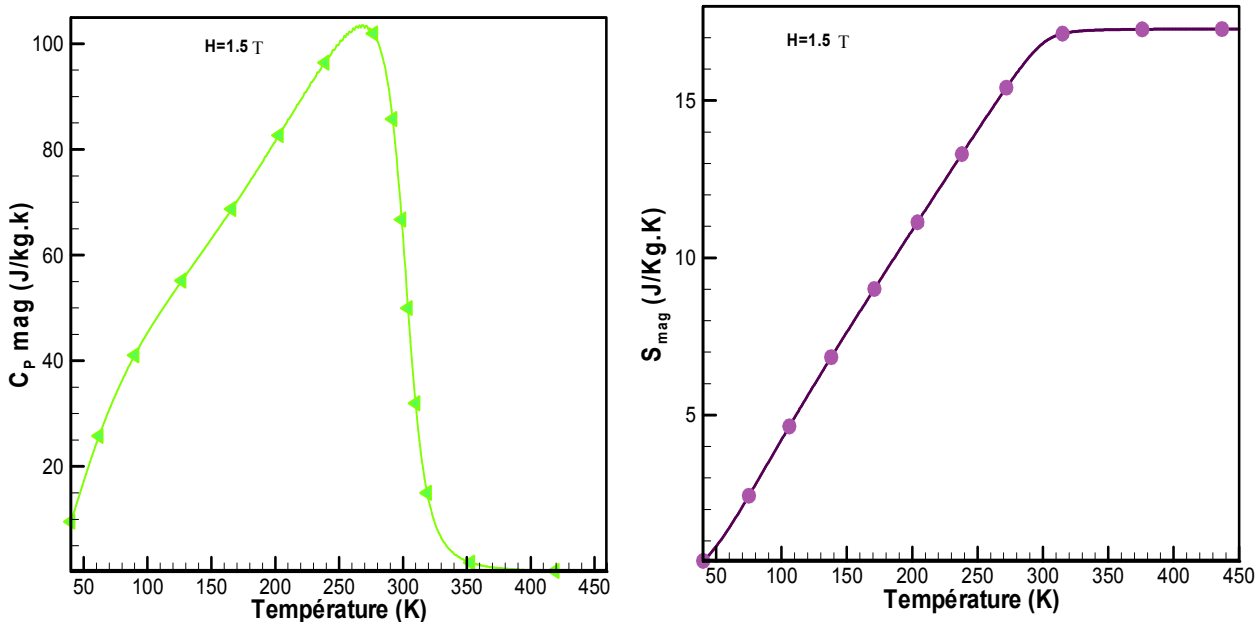


Figure III.2: Evolution de la chaleur spécifique magnétique et l'entropie magnétique en fonction de Température.

Les courbes représentées sur la figure III.2 montrent la chaleur spécifique magnétique et l'entropie magnétique prédites à l'aide de la théorie du champ moléculaire (MTF) 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 $_{magnétique}$ est augmente avec l'augmentation de température jusqu'à atteindre son maximum au voisinage de point de cuire T=294K et diminue avec l'augmentation de la température afin que Cp $_{magnétique}$ =0 J/Kg.K.Et le 2eme courbe S $_{magnétique}$ est augmente avec l'augmentation de température jusqu'à atteindre son maximum au voisinage de point de cuire T=294 K et a la fin le courbe est stable au voisinage de la S $_{magnétique}$ =17 J/Kg.K.

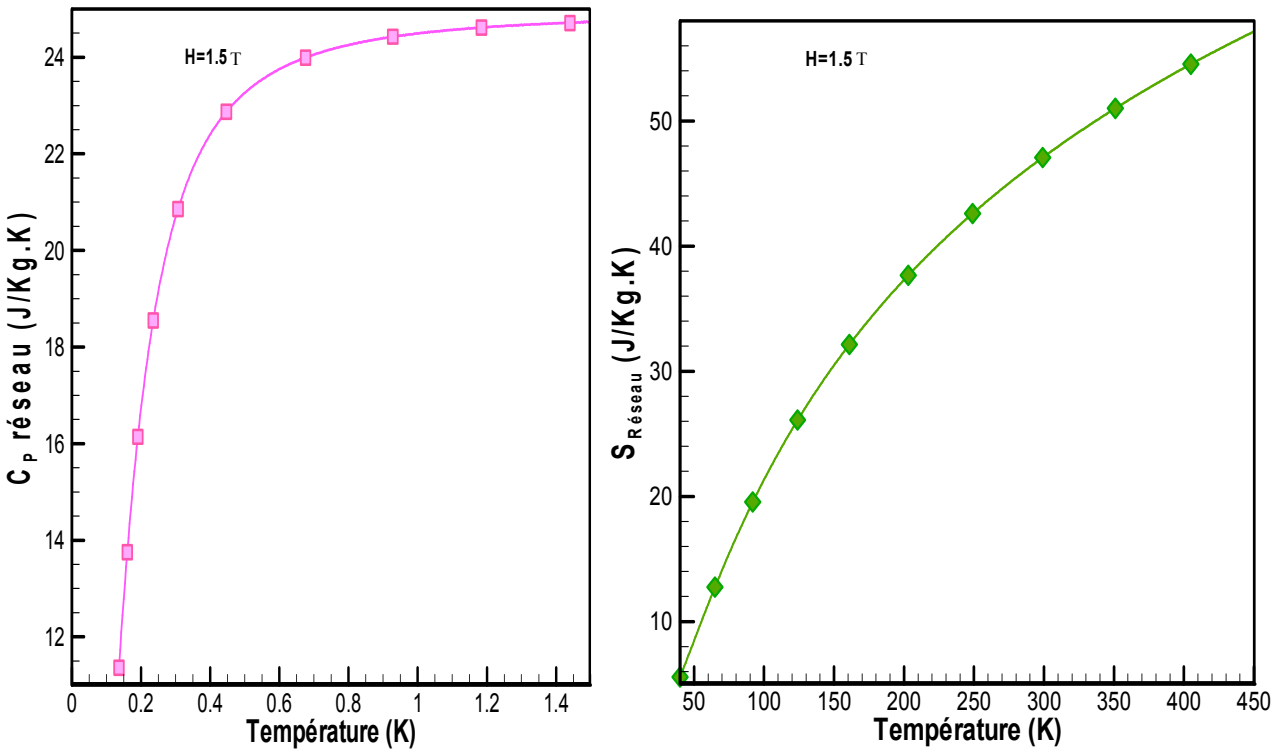


Figure III.3: Evolution de la chaleur spécifique du réseau et l'entropie du réseau en fonction de Température.

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 (MTF) 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 $_{Réseau}$ est augmente avec l'augmentation de température puis la courbe est presque stable. Et le 2eme courbe S $_{Réseau}$ est augmente avec l'augmentation de température.

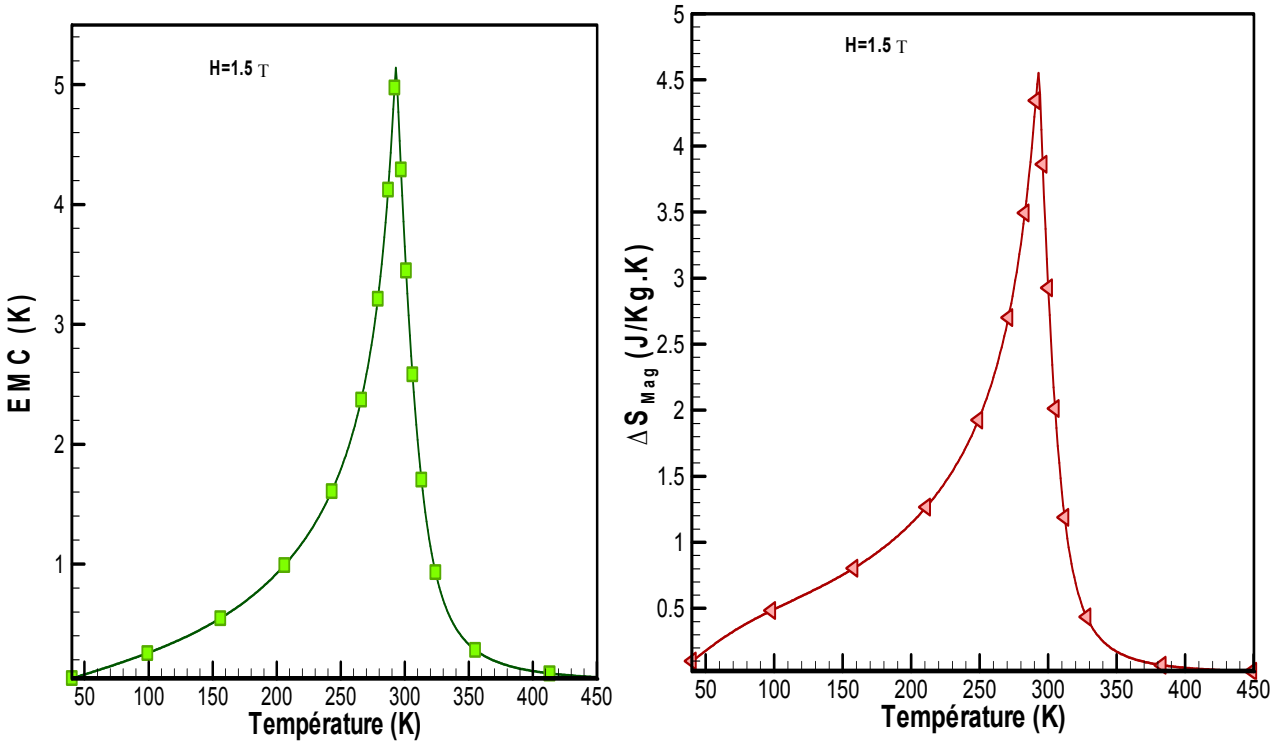


Figure III.4: Evolution d'EMC et la variation d'entropie magnétique en fonction de Température.

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 (MTF) 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 EMC est augmente avec l'augmentation de température jusqu'à atteindre son maximum au voisinage de point de cuire (T=294K ,EMC=5K) et diminue avec l'augmentation de la température. Et le 2eme courbe $\Delta S_{magnétique}$ est augmente avec l'augmentation de température jusqu'à atteindre son maximum au voisinage de point de cuire(T=294K, $\Delta S_{magnétique}$=4.5J/Kg.K).Et et diminue avec l'augmentation de la température.

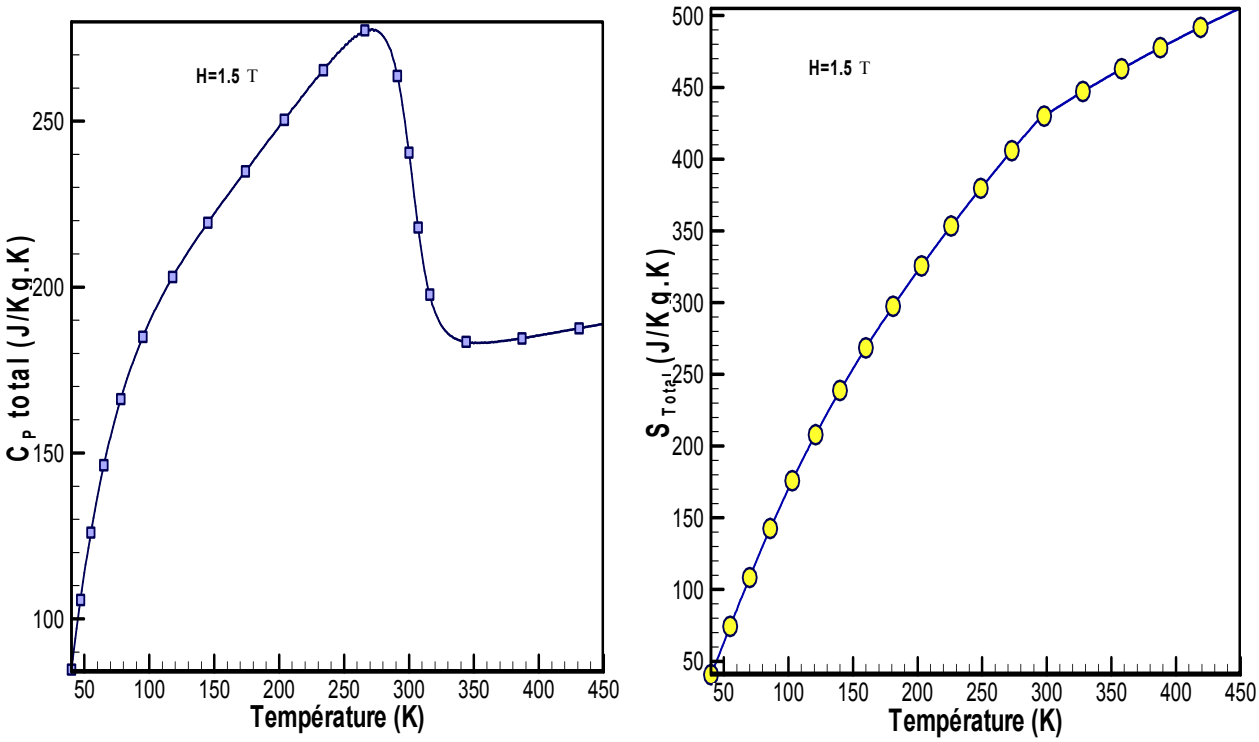


Figure III.5: Evolution de la chaleur spécifique total et l'entropie total en fonction de Température.

En remarque les courbes représentées sur la figure III.5 montrent la chaleur spécifique magnétique et l'entropie magnétique prédites à l'aide de la théorie du champ moléculaire (MTF) 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 augmente avec l'augmentation de température jusqu'à atteindre son maximum au voisinage de point de cuire (T=294K ,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 le 2eme courbe S $_{total}$ est augmente avec l'augmentation de température.

2eme cas :

Dans le douxime cas nous allons applique l'étude théorique basée sur la théorie de champ moléculaire (MTF) et développée précédemment (chapitre I) sur du Gd, 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 des différente valeurs de champ magnétique (0T<H<1.5T).

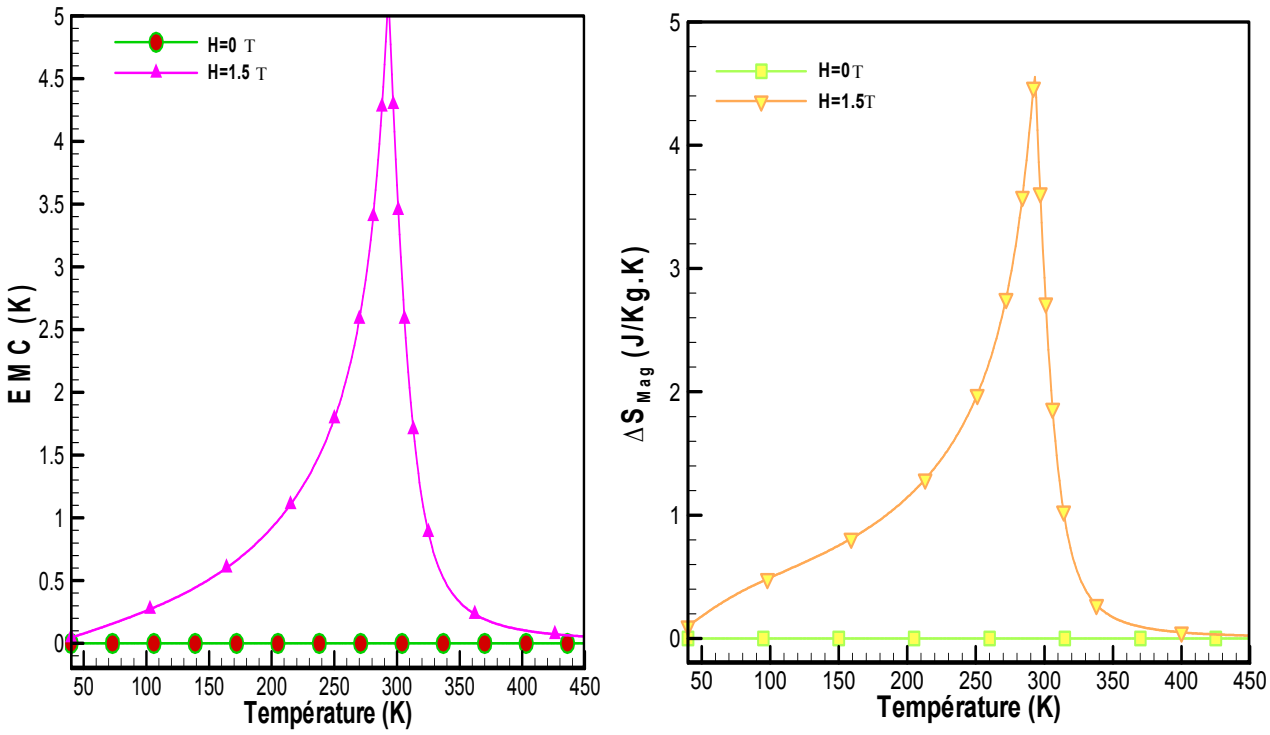


Figure III.6: Evolution EMC et la ΔS_{mag} en fonction de Température et champ magnétique.

Dans cette figure III.6 représentées les courbes de EMC et la variation de l'entropie magnétique 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 (MTF) décrite dans le première chapitre pour un matériau magnétocalorique (Gd).Donc en remarque la courbe EMC, $\Delta S_{magnétique}$ et(H=1.5) est augmente avec l'augmentation de température jusqu'à atteindre son maximum au voisinage de point de cuire(T=294K) .Et diminue avec l'augmentation de la température jusqu'à atteindre son maximum au voisinage .Et dans le champ magnétique est nul les courbes constate et stable dans la valeur EMC=0K,

$\Delta S_{magnétique}$=0J/Kg.k.

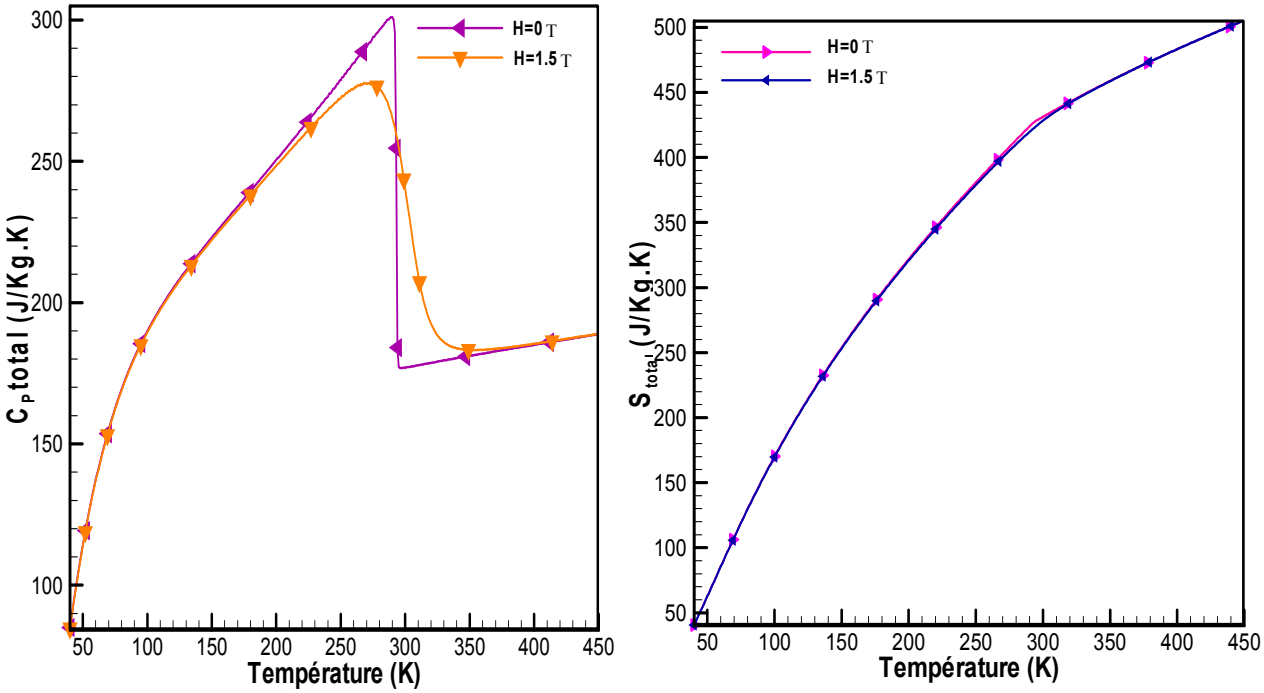


Figure III.7: Evolution de la chaleur spécifique total et l'entropie total en fonction de Température.

Dans cette figure III.7 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 (MTF) décrite dans le première chapitre pour un matériau magnétocalorique (Gd).Donc en remarque la courbe Cp $_{total}$ et (H=1.5) est augmente avec l'augmentation de température jusqu'à atteindre son maximum au voisinage de point de cuire(T=294K) ,et diminue avec l'augmentation de la température jusqu'à atteindre son maximum au voisinage de point de cuire(T=294K) , en puis est augmente la courbe. Et dans le 2eme courbe le S $_{total}$ dans le H=1.5T et H=0T est convergent et augmente avec l'augmentation de température.

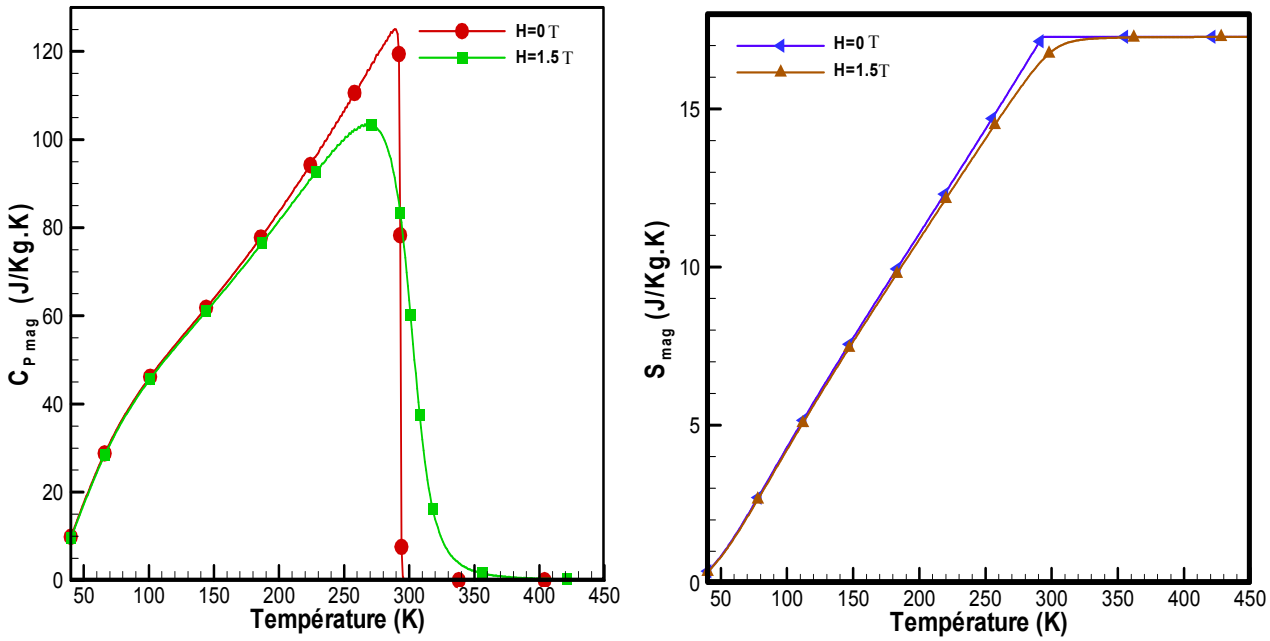


Figure III.8: Evolution de la chaleur spécifique magnétique et l'entropie magnétique en fonction de Température.

Dans cette figure III.8 représentées les courbes de Cp $_{magnétique}$ 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 (MTF) décrite dans le première chapitre pour un matériau magnétocalorique (Gd).Donc en remarque la courbe Cp $_{magnétique}$ et (H=1.5) est augmente avec l'augmentation de température jusqu'à atteindre son maximum au voisinage de point de cuire(T=294K) .Et diminue avec l'augmentation de la température jusqu'à atteindre son maximum au voisinage ,et H=0 est augmente avec l'augmentation de température jusqu'à atteindre son maximum au voisinage de point de cuire(T=294K) .Et diminue avec constante de la température. Et dans le 2eme courbe le S $_{magnétique}$ dans le H=1.5T et H=0T est convergent et augmente linéairement avec l'augmentation de température jusqu'à atteindre son maximum au voisinage de point de cuire(T=294K), et stable en T=294K jusqu'à T=450K.

3eme cas :

Dans le troisime cas nous allons applique l'étude théorique basée sur la théorie de champ moléculaire (MTF) et développée précédemment (chapitre I) sur du Gd,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).

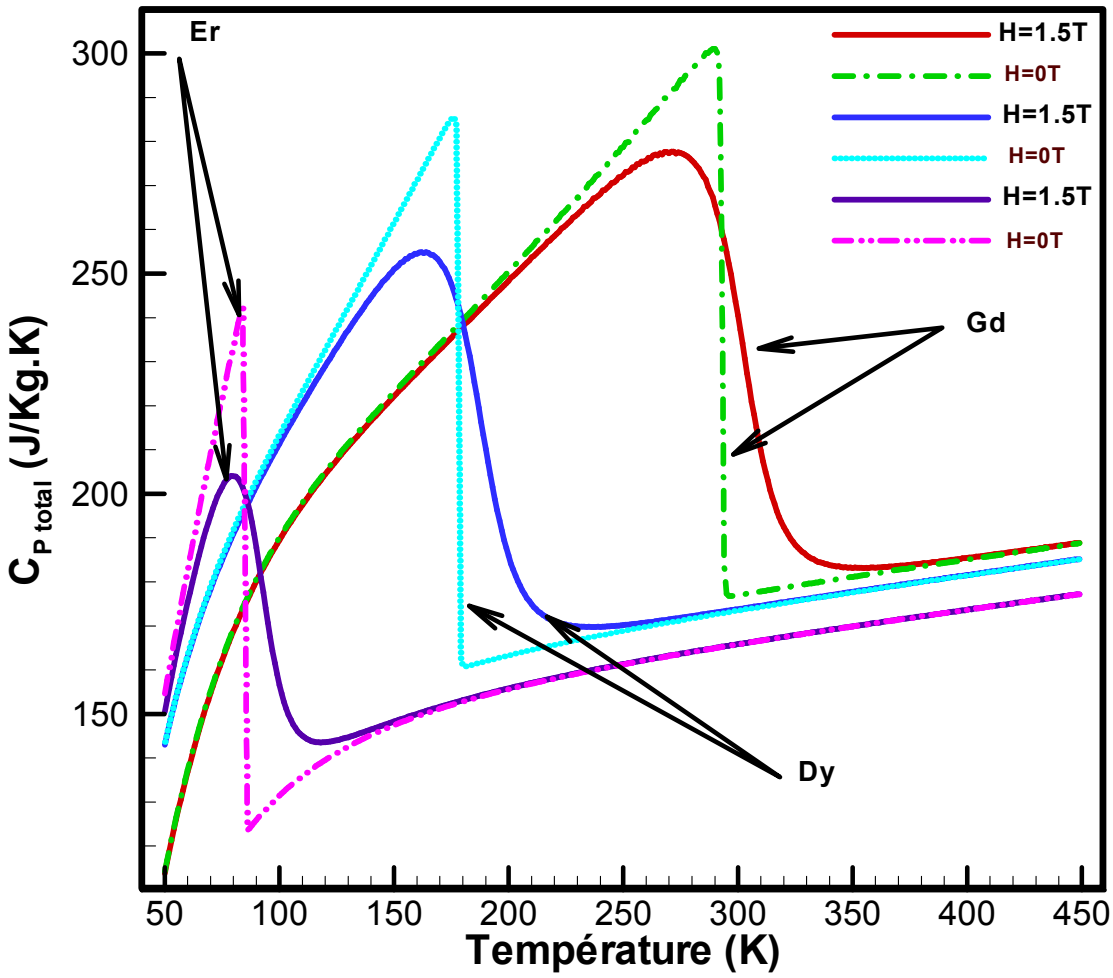


Figure III.9: Evolution de la chaleur spécifique total en fonction de Température.

On remarque sur la figure III.9, variation de Cp totale en fonction de la température en applique sur les trois matériaux (Gd, 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 cuire pour chaque matériaux, et diminue avec l'augmentation de la température, mais le matériau de Gadolinium est amélioré le Cp 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.

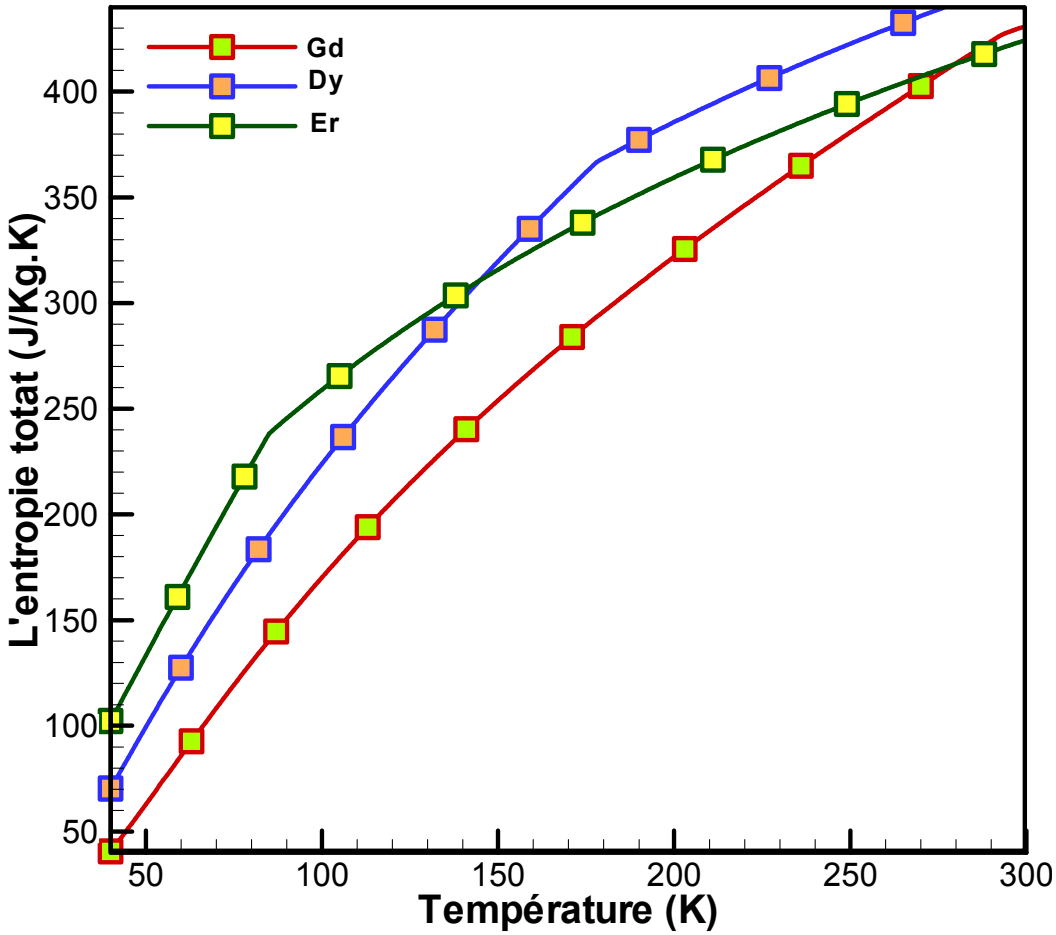


Figure III.10: Evolution l'entropie total en fonction de la température.

On remarque sur la figure III.10, variation de l'entropie totale en fonction de la température en applique sur les trois matériaux (Gd, Dy, Er) avec champ magnétique constant H=1.5T, l'entropie augmente avec l'augmentation de la température jusqu'à atteindre son maximum, le l'entropie observe une point croisement au voisinage de la température de (T=150K) pour les matériaux (Dy, Er) ,et dans le l'entropie observe une point croisement au voisinage de la température de (T=280K) pour les matériaux (Gd, Er) .

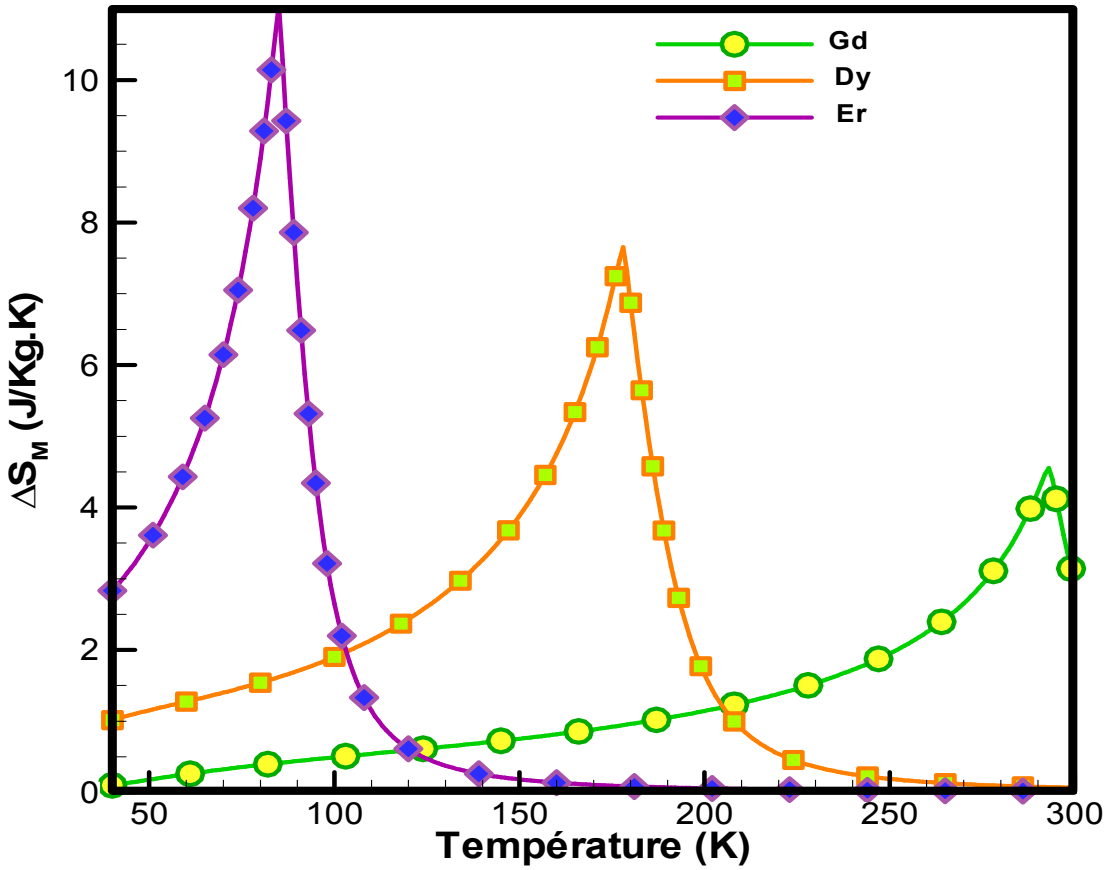


Figure III. 11 : La variation de l'entropie magnétique en fonction de la température.

Les courbes représentées sur les figures III.11, III.12 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, Dy, Er).nous avons remarque 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 cuire pour chaque matériaux , et diminue avec l'augmentation de la température.

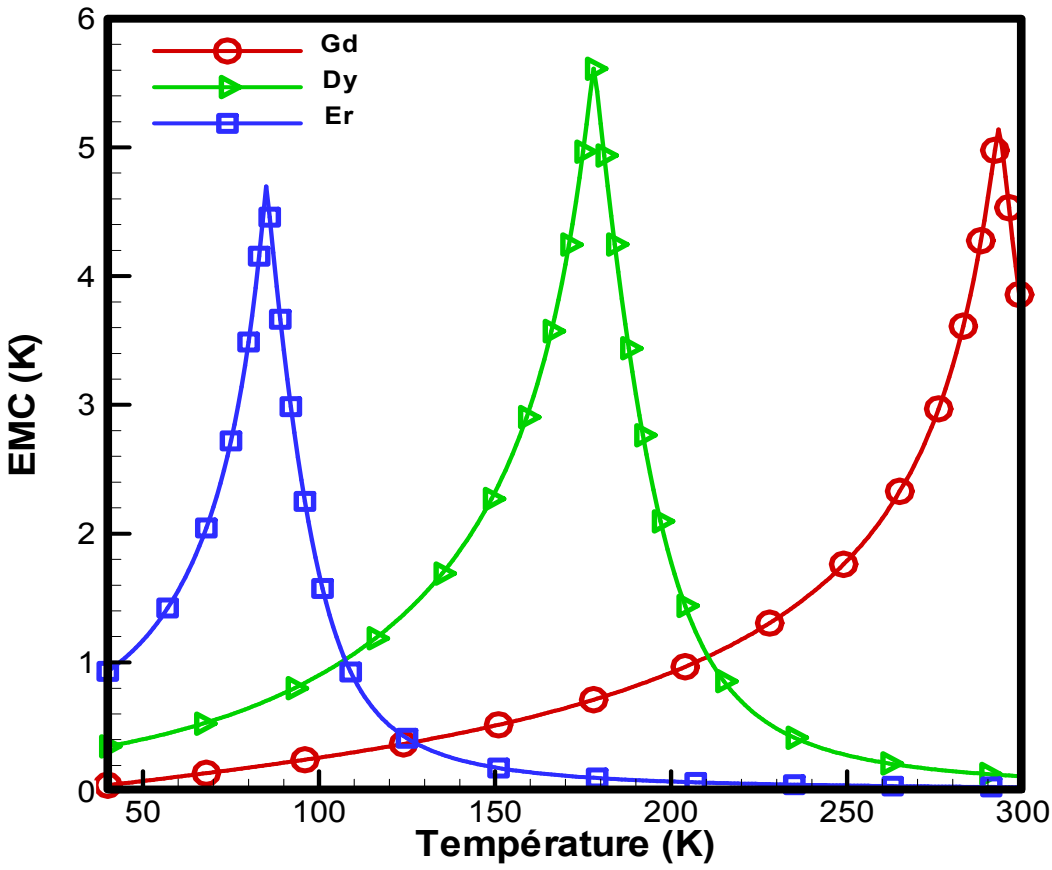


Figure III.12: Variation de l'effet magnétocalorique en fonction de la température.

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 cuire 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 cuire pour chaque matériaux, et diminue avec l'augmentation de la température. Et une plusieurs point intersection entre les courbes.

III.3.ETUDE DU CYCLE REFRIGERATION MAGNETIQUE DE BRAYTON :

1ere cas : en étudié sur le Gadolinium.

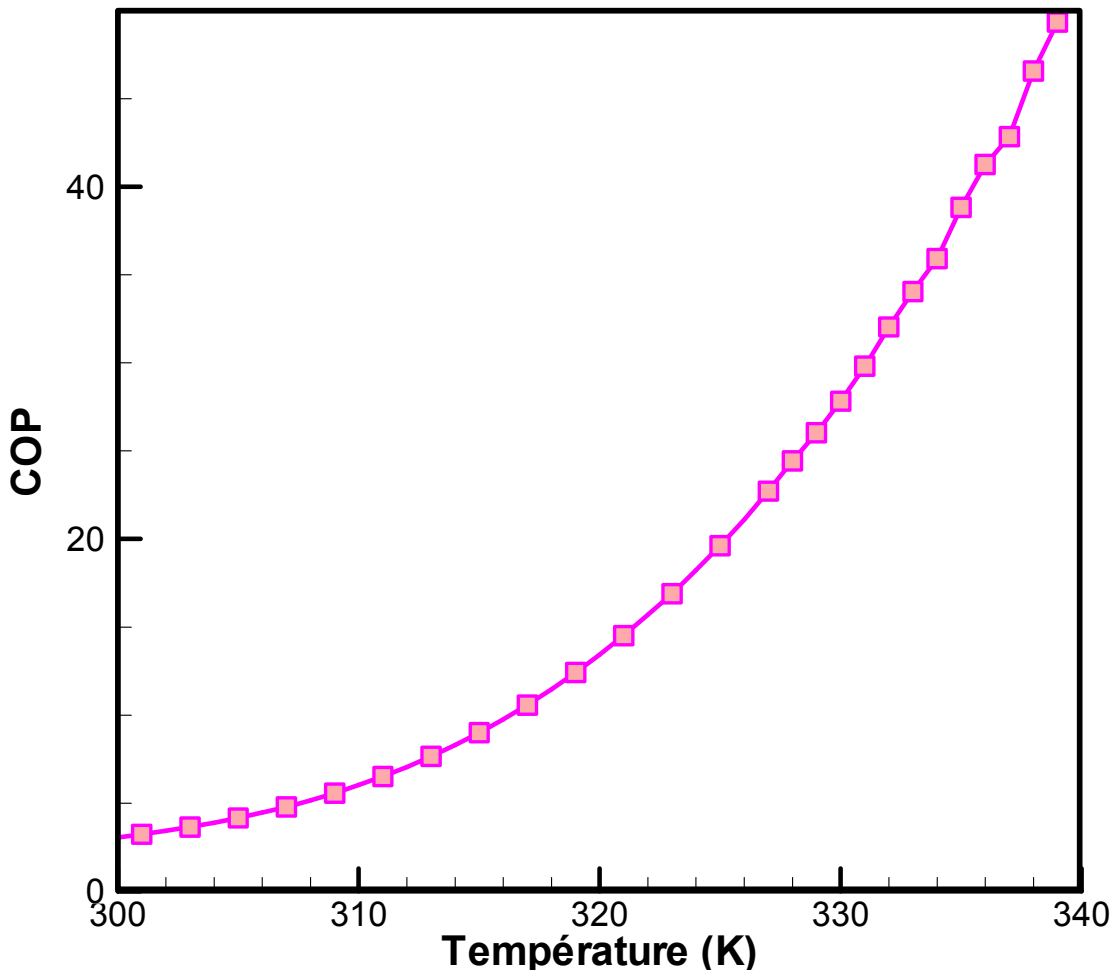


Figure III.13 : Evolution de coefficient de performance en fonction de la température.

La figure III.13 montre l'évolution du COP 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=340K.

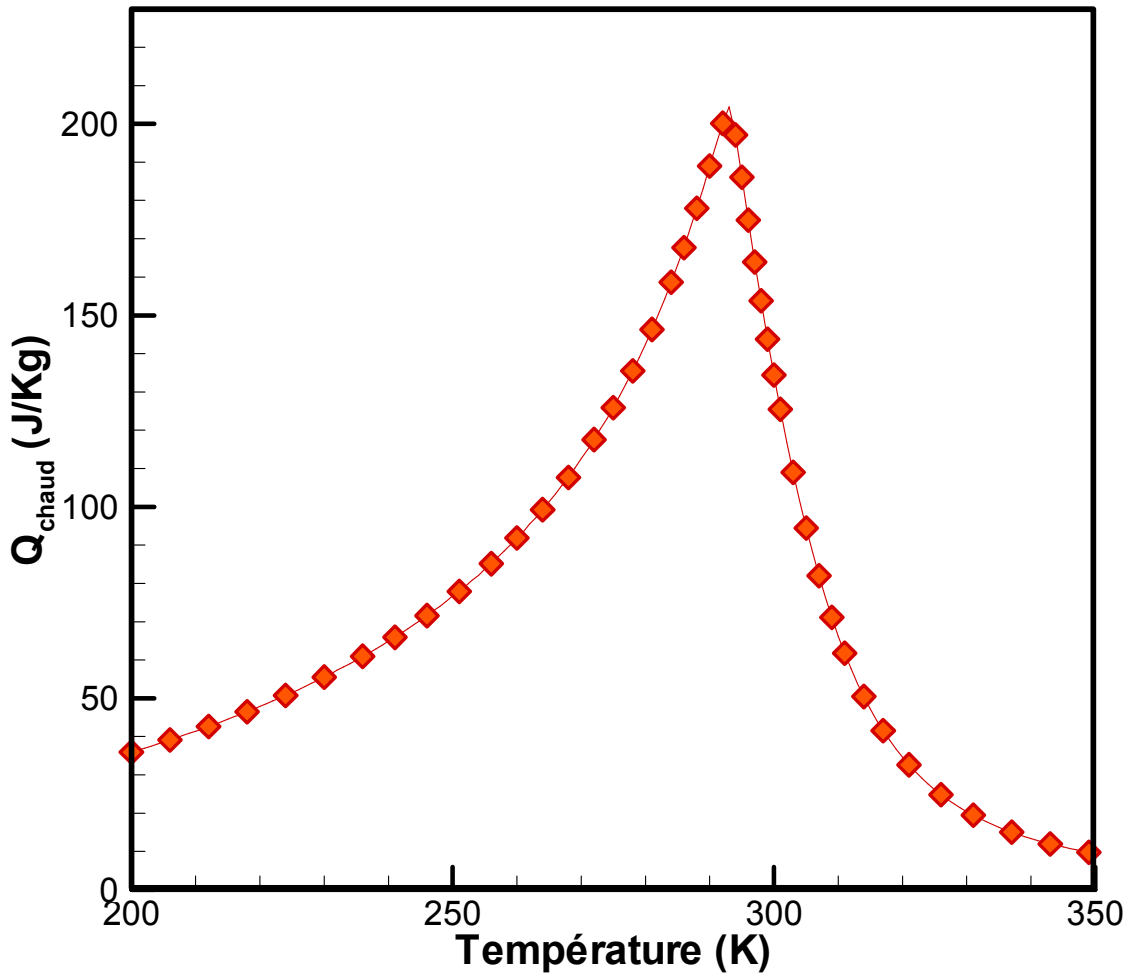


Figure III.14 : Variation de la quantité de chaleur dégagée au niveau de sources chaude en fonction de température.

La figure III.14 montre la courbe de quantité de chaleur de source chaude du matériau Gd en fonction de température, en remarque la courbe augmentée de 38J/Kg à 210J/Kg pour augmentation de la température de 200K jusqu'à au voisinage du température de cuire T_C= 294K, dans ce point atteigne le pic de210 J/Kg à la température de cuire, puis au-delà de 294K à 350K ,et la quantité de chaleur à la source chaude est diminue 210J/Kg à10J/Kg.

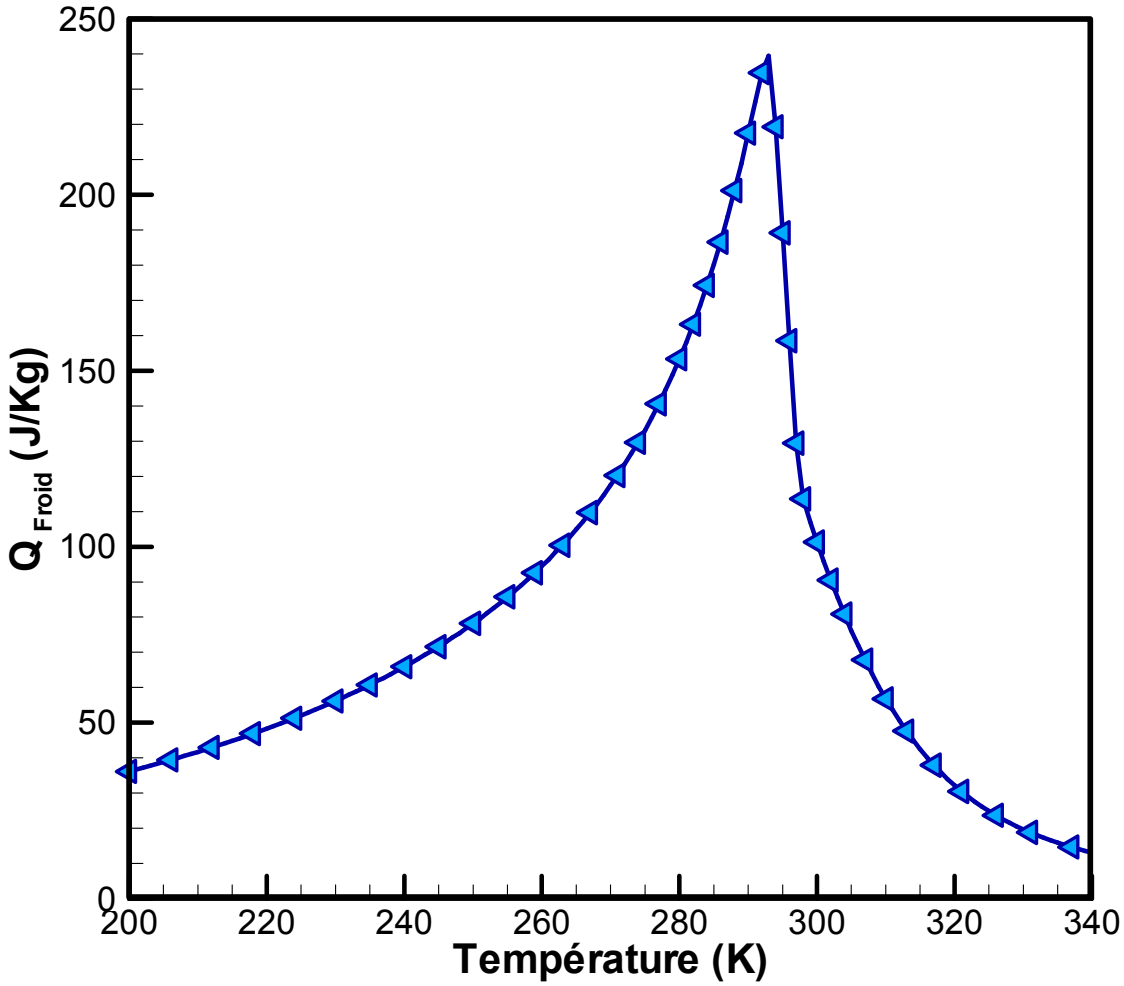


Figure III.15 : Variation de la quantité de chaleur dégagée au niveau de sources froide en fonction de température.

La figure III.15 montre la courbe de quantité de chaleur de source froide du matériau Gd en fonction de température, en remarque la courbe augmentée de 39J/Kg à 240J/Kg pour augmentation de la température de 200K jusqu'à température de cuire de gadolinium T_C =294K, dans ce point atteigne le pic de240 J/Kg à la température de cuire, puis au-delà de 294K à 340K la quantité de chaleur à la source froid est diminue 240J/Kg à15J/Kg.

2eme cas : étude sur les trois matériaux (Gd ; Er ; Dy)

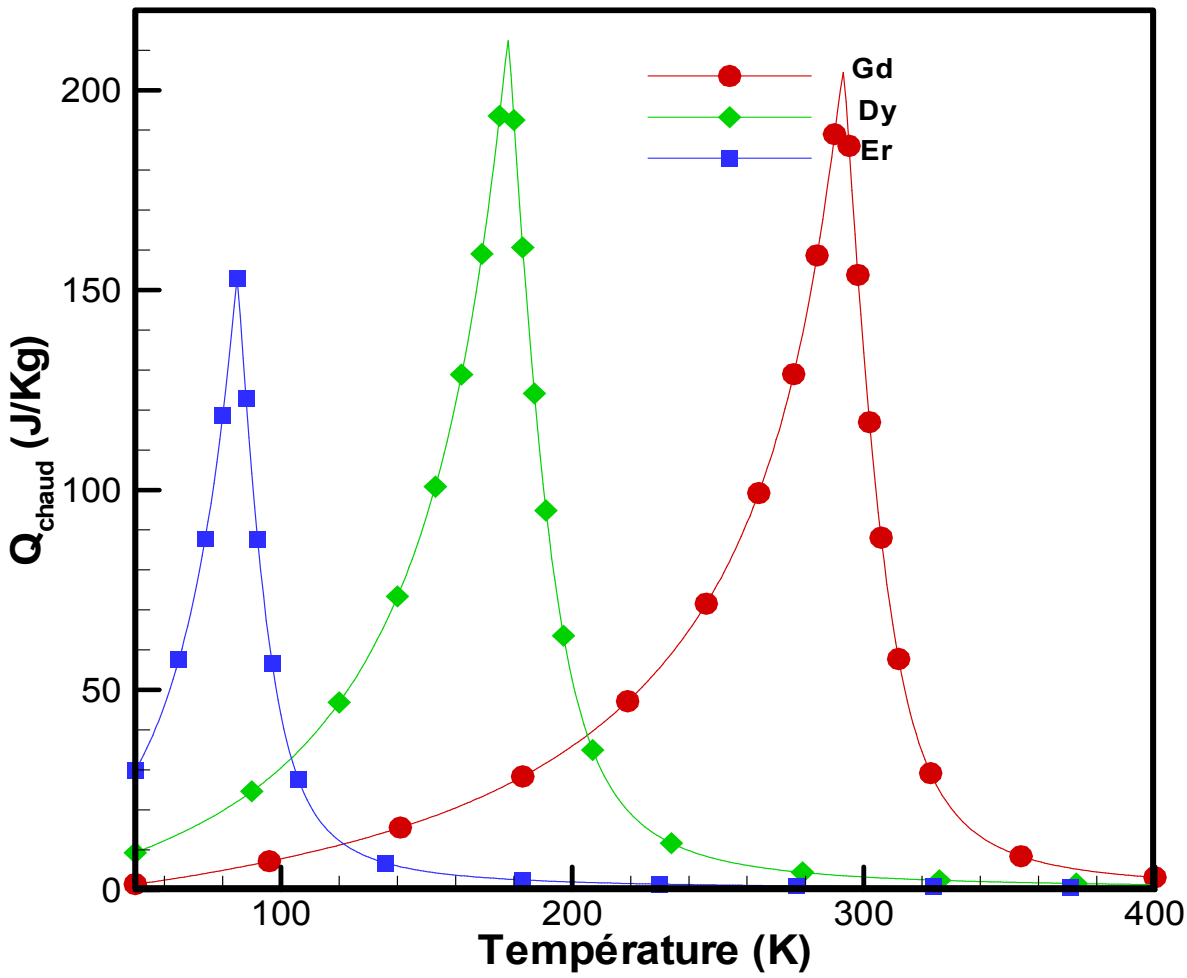


Figure III.16 : Variation de la quantité de chaleur dégagée au niveau de sources chaude en fonction de température.

La figure III.16 montre la courbe de quantité de chaleur de source chaude en fonction de température et différentes des matériaux(Gd,Dy,Er), en remarque la courbe augmentée en point $\mathbf{0J/Kg \leq Q_{Gd} \leq 200J/Kg}$;$\mathbf{10}J/Kg \leq \mathbf{Q_{Dy} \leq 210J/Kg}$;$\mathbf{30}J/Kg \leq Q_{Er} \leq \mathbf{150J/Kg}$,pour augmentation de la température de 50K jusqu'à température de cuire T_C a chaque matériaux , dans ce point atteigne le pic de chaque matériaux à la température de cuire, puis au-delà de point de cuire à la T=400K est la quantité de chaleur à la source chaude est diminue jusqu' à $C_P \simeq 0J/Kg$.

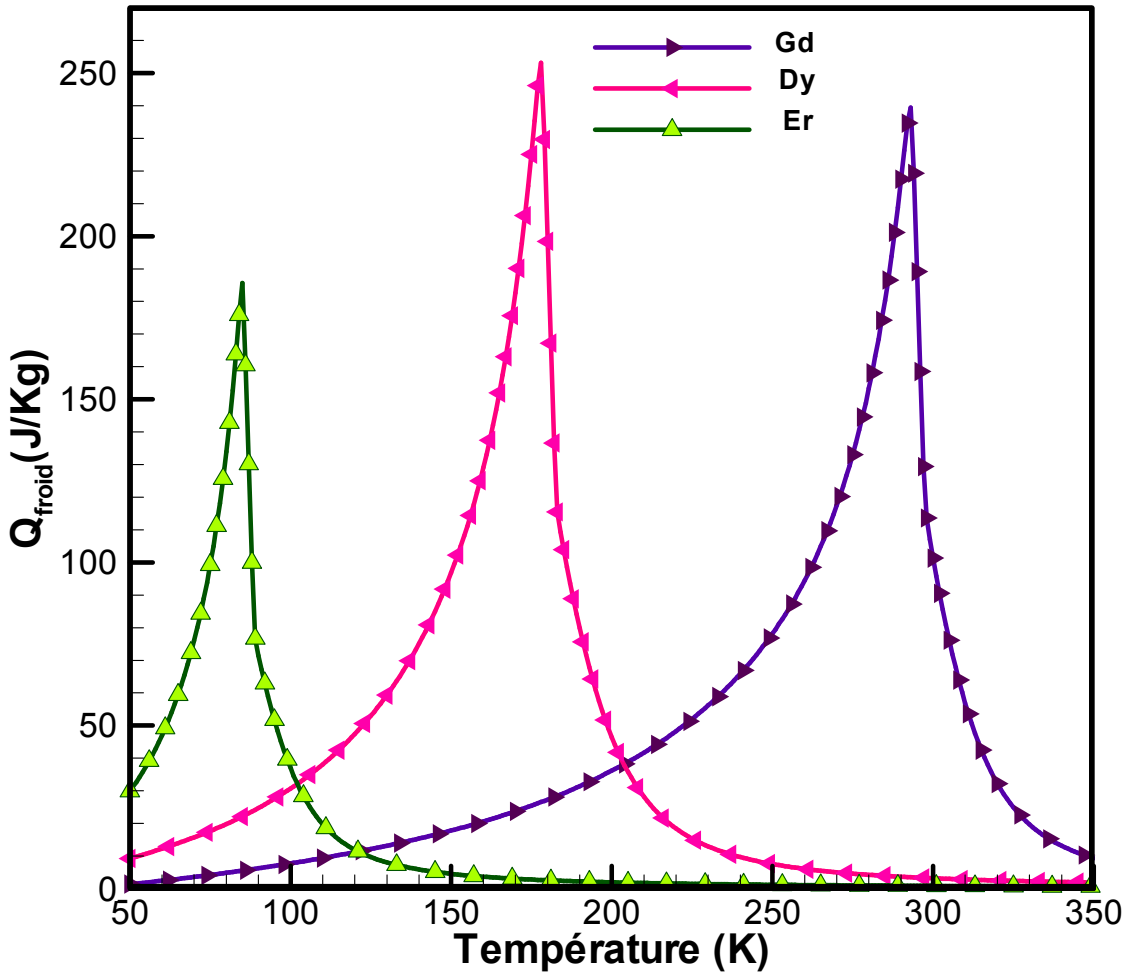


Figure III.17 : Variation de la quantité de chaleur dégagée au niveau de sources froide en fonction de température.

En remarque la figure III.17 montre la courbe de quantité de chaleur absorbée de source froide en fonction de température et différentes des matériaux(Gd,Dy,Er), les courbe est augmentée au point $\mathbf{0J/Kg \leq Q_{Gd} \leq 240J/Kg}$;$\mathbf{10}\boldsymbol{J/Kg} \leq \mathbf{Q_{Dy}} \leq \mathbf{260J/Kg}$;$\mathbf{30}\boldsymbol{J/Kg} \leq \boldsymbol{Q_{Er}} \leq \mathbf{190J/Kg}$,pour augmentation de la température de 50K jusqu'à température de cuire T_C a chaque matériaux , dans ce point atteigne le pic de chaque matériaux à la température de cuire, puis au-delà de point de cuire à la T=400K est la quantité de chaleur à la source froide est diminue jusqu' à $C_P \simeq 0J/Kg$.

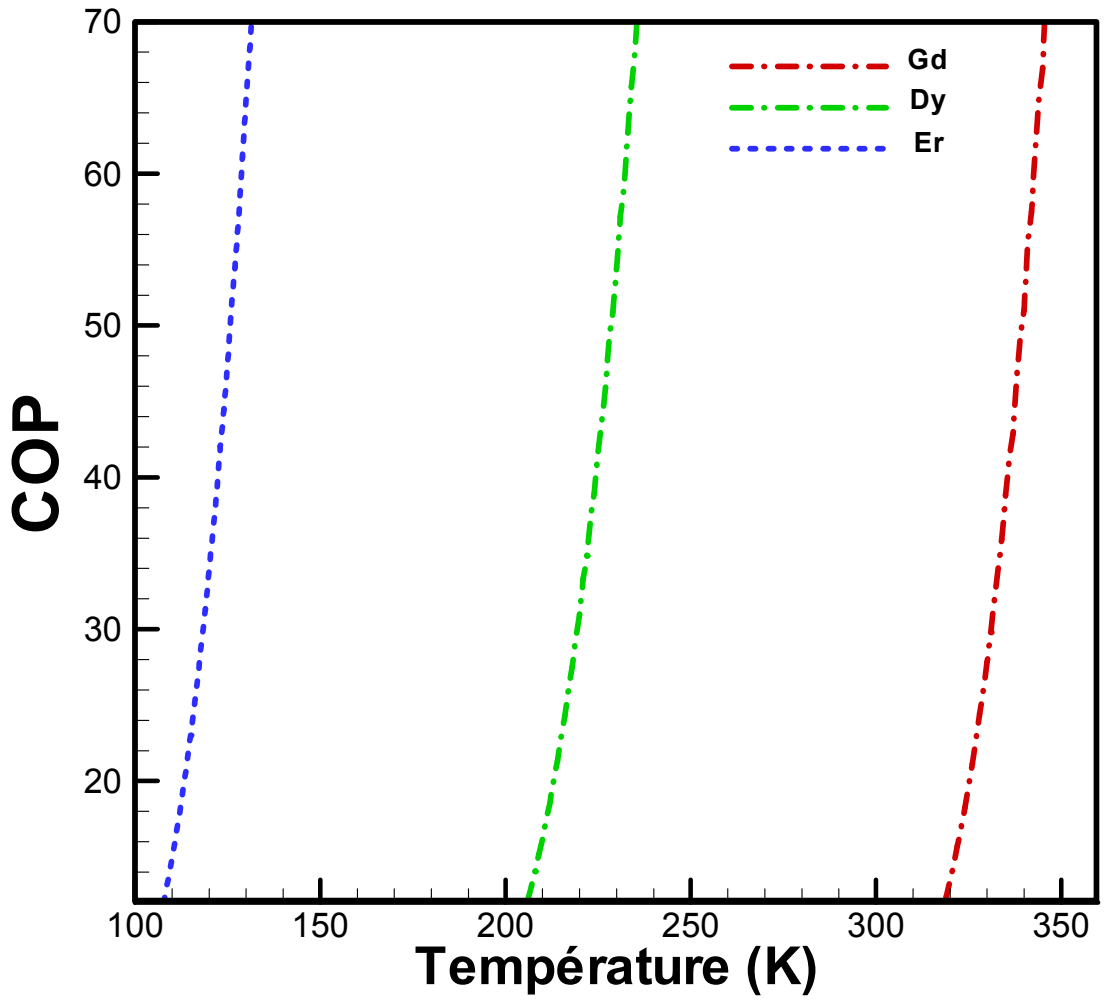


Figure III.18 : Evolution de coefficient de performance en fonction de la température.

La figure III.18, montre l'évolution du COP en fonction de la température et différentes des matériaux (Gd, Dy, Er), en remarque les courbe de COP est augmentée avec l'augmentation de température.

III.4.Conclusion :

En conclue dans ce chapitre, en alors applique la théorie du champ moléculaire en 1^{ere} partie sur les matériaux (Gd, Dy, Er), et remarque les courbe est changé selon chaque matériau et la valeur de champ magnétique .Dans le 2eme partie est étude le cycle réfrigération magnétique de Brayton, et utilise trois matériaux pour amélioré (Q_F, Q_C, COP), en fin est déduire le matériau de terre rare il est donne une meilleur résultat dans l'effet magnétocalorique et le cycle Brayton ; et amélioré les résultats par rapport les autre matériaux.

CONCLUSION GENERAL :

Ce travail consiste à étudier de cycle réfrigération magnétique de Brayton utilisés en réfrigération magnétique (RM).

Le travail réalisé dans le cadre de ce mémoire est une contribution à l'étude et la modélisation thermique et électromagnétique des systèmes de réfrigération magnétique. Il montre déjà clairement que la conception et l'optimisation de ces systèmes doivent faire appel à des outils de simulation numérique spécifiques, car les difficultés liées au comportement thermique, au comportement magnétique, aux contraintes mécaniques et surtout aux besoins de l'utilisateur sont souvent nombreuses.

Dans les chapitres, nous avons exposé l'effet magnétocalorique (EMC), matériaux magnétocaloriques et les cycles thermodynamiques en RM, principalement le cycle de Brayton. L'EMC décroît rapidement lorsque la température du matériau magnétique s'éloigne de sa température de transition. Afin de mémoire calculer l'effet magnétocalorique dans les matériaux Gadolinium 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 ou la température de *Curie* T_C des matériaux (GD, Dy, Er).

La juste évaluation de l'EMC est l'aspect central de la quantification exacte de l'efficacité d'un cycle de RM. En plus de dépendre du champ magnétique, la valeur de l'EMC est fonction de la température du matériau. Lorsque l'EMC d'un matériau ferromagnétique est quantifié théoriquement, le champ magnétique présent dans celui-ci est supposé égal au champ externe appliqué. La distribution du champ magnétique dépend plutôt de la forme du matériau ferromagnétique ainsi que de sa réponse en magnétisation modélisée par la perméabilité magnétique. Lorsque le matériau ferromagnétique se déplace entre la zone de champ nul et la zone de champ non nul, un échange de chaleur est possible entre la région chaude et la région froide du matériau modifiant la température au voisinage de l'interface magnétique. Le champ magnétique peut aussi entraîner une réduction de l'EMC à l'interface par sa diffusion dans le volume du matériau hors du champ. L'EMC peut ainsi posséder un caractère transitoire en plus d'une distribution spatiale non uniforme.

Conclusion Général :

Nous montrons qu'il est possible de trouver de nouvelles formules toujours plus performantes (composés et composites), mais également qu'il convient de «perfectionner» encore les modèles théoriques souvent basés sur des approximations de type champ moyen. Des mesures thermodynamiques et magnétiques plus précises et directes sont alors à mettre en œuvre à l'aide d'instrumentations spécifiques.

C'est dans ces quatre directions qu'il conviendrait de travailler :

- optimisation des formules connues et recherche de nouveaux matériaux à fort EMC,
- mesures thermodynamiques et mesures directes de l'EMC comme base de réflexion,
- amélioration des modèles et approximations pour écrire «une théorie» plus fidèle des couplages «réseau-magnétisme»,
- simulation de systèmes composites efficaces adaptés aux diverses applications de l'EMC.

Il faut dire que la magnétodynamique des systèmes, la problématique des échanges thermiques, la mise en forme ainsi que les aspects durabilité et corrosion des éléments EMC… restent autant de domaines importants à nourrir pour mettre en œuvre des machines.

Références et bibliographiques:

[1] : Afef Kedous-Lebouc, Morgan Almanza, Jean-Paul Yonnet, Ulrich Legait et Julien Roudaut. « Réfrigération magnétique Etat de l'art et développements récents », Université. Grenoble Alpes, G2Elab, F-38000 Grenoble, France CNRS.

[2] : Alexandra Dubrez, C. Mayer, M. Pierronet, et P. Vikner, « (LaCe) (Fe, Mn, Si) 13Hx Materials produced via gas atomization », Delft Days on Magnetocalorics DMM, (2013).

[3]: Alexander J. Shapiro, Robert D. Shull, Virgil Provenzano « Reduction of hysteresis losses in the magnetic refrigerant GdGeSi by the addition of iron », Nature 429, 853-857 (24 June 2004)

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

[5] : A Smaili and R .Chahine . « Themodynamic investigations of optimum active magnetic regeneraors » .Cryogenics ,38 :247 – 252, (1998).

[6]: A.M Tishin and Y. Spichkin, « the Magnetocaloric Effect and Its Applications » (Institute of Physics, Bristol, 2003).

[7]:Balli, M., Sari, O., Mehmed, C., Besson, C., Bonhote, P., Duc, D. et Forchelet, J. « A preindustrial magnetic cooling system for room- temperature applications ». In Proc. Fourth IIF-IIR International Conference on Magnetic Refrigeration at. Room Temperature, pages 313–322, Baotou, China. (2010).

[8] :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).

[9]: B.F.Yu, Q. Gao, B. Zhang, X.Z. Meng, Z. Chen, International journal of refrigeration, 26, 622, (2003)

[10]: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 » . Energy conversion and Management, 70 :40 - 55, (2013).

[11]: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 Refrigeration ,37 :78-83, (2014).

[12]:C. V. Heer, C. B. Barnes, and J. G. Daunt, Review of Scientific Instruments 25, 1088 (1954).

[13]:C. Zimm et al. Adv. Cryog. Eng. 43, 1759 (1998).

[14]:C. Zimm et al. International Journal of Refrigeration 29, 1302 (2006).

[15]: Daniel L Rocco, Alexandre Magnus G. Carvalho, Luana Caron, Adelino A. Coelho, Luzeli M. da Silva, FlÁvio C. G. Gandra, Adenilson O. dos Santos, Lisandro P. Cardoso, Pedro J. Von Ranke, « Ambient pressure colossal magnetocaloric effect tuned by composition in MnFeAs », Ariana de Campos Nature Materials 5, 802-804(2006).

[16] : E. Warburg, Ann. Phys. 249, 141 (1881).

[17] : F. Rief, Statistical and Thermal Physics, McGram-Hill éditions, ISBN, (1985).

[18]:Green, G., Chafe, J., Stevens, J. et Humphrey, J. « A gadolinium-terbium active regenerator ». Adv. Cryog. Eng., 35(B):1165–1174. (1990)

[19]: G. V. Brown. « Magnetic heat pumping near room temperature ». Journal of Applied Physics 47, (8) :3673-3680. (1976).

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

[21]: J. van Geuns, Philips Res. Rep. (Suppl.) 6, 1 (1966).

[22]:J.Romero Gomez, R. Ferreiro Garcia, Jcarbia carril, and M. Romrno Gomez. « Areview of room temperature linear reciprocating magnetic refigerators » .Renewable and sustainable Energy Reviews ,21 :1-12, (2013).

[23] : Julien Roudaut, « Modélisation et conception de systèmes de refrigeration magnétique autour de la temperature ambiante », Thèse de doctorat. Université de Grenoble.(2011).

[24] : 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)

[25]: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).

[26] : K. G. Sandeman, « Magnetocaloric materials: The search for new systems », Scr. Mater., vol. 67, no 6, p. 566‑571, (2012).

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

[28]:K.L. Engelbrecht, G.F Nellis, S.A. Klein, A.M. Boeder « Modeling Active Magnetic Regenerative Refrigeration Systems », International Conference on Magnetic Refrigeration at Room Temperature, Montreux, Switzerland, (2005).

[29]: Kitanovski, A., Egolf, P. W. et Sari, O. « Method and device for the generation of cold and heat by magnetocalorific effect ». U.S. Patent No.0080979 A1, (2006)

[30]: Lacaze A. « Contribution à l'étude de la réfrigération magnétique aux températures de l'hélium liquide » (Doctoral dissertation) (résumé/fiche Inist-CNRS [archive]). (1985).

[31]: L. D. Kirol and J. I. Mills, Journal of Applied Physics 56, 824 (1984).

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

[33] : 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).

[34] : M. Rosca, « Matériaux de type LaFe13-xSix à fort pouvoir magnétocalorique-Synthèse et optimisation de composés massifs et hypertrempés-Caractérisations fondamentales », Université de Grenoble, (2010).

[35] : O. Tegus, K. H. J. Buschow, F. R. de Boer, E. BrÜck, « Transition-metal-based magnetic refrigerants for room-temperature applications », Nature 415, 150-152 (2002)

[36] : Peter W. EGOLF, Andrej. KITANOVSKI, Didier VUARNOZ, Marc DIEBOLD, Christophe BESSON, « AN INTRODUCTION TO MAGNETIC REFRIGERATION ». University of Applied Sciences of Western Switzerland.

[37] : P. Debye, Ann. Phys. 386, 1154 (1926).

[38] : Quentin Recour. « Etude des propriétés structurales, magnétiques et magnétocaloriques de Mn3Sn2 et ses dérivés ».Thèse de doctorat, de l'Université de Lorraine, Spécialité : Chimie, 2012

[39] : Richard, M. A., Rowe, A. M. et Chahine, R. « Magnetic Refrigeration : Single and multimaterial active magnetic regenerator experiments ». J. Appl. Phys., 95(4):2146–2150,(2004).

[40]: Rowe, A. et Tura, A. « Experimental investigation of a three material layered active magnetic regenerator ». Int. J. Refrigeration, 29(8):1286– 1293. 2006.

[41] : Rowe, A. M. et Barclay, J. A. « Design of an active magnetic regenerator test apparatus ». Adv. Cryog. Eng., 47:995–1002. (2002)

[42] : Russek, S. L., J. Auringer, J., Boeder, A., Chell, J., Jacobs, S. et Zimm, C. « The performance of a rotary magnet magnetic refrigerator with layered beds ». In Proc. Fourth IIF-IIR International Conference on Magnetic Refrigeration at Room Temperature, pages 339 – 349, Baotou, China (2010)

[43] : T.Okamura, K.Yamada, N.Hirano, and S. Nagay. « Performance of a room-tempetature rotary magnetic refrigerator ». International Journal of Refrigeration, 29(8) :1327_1331, (2006).

[44] :T. Okamura, K. Yamada, N. Hirano, S. Nagaya « Improvement of 100W class room temperature magnetic refrigerator »Second IIF-IIR International Conference on Magnetic Refrigeration at. Room Temperature Portoroz, Slovenia, (2007).

[45] : 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 », Thés de doctorat, (2011).

[46] : Umberto Lucia, Exergy analysis of magnetic refrigeration, Spalto Marengo 42, 15121 Alessandria, Italy.

[47] : V. K. Pecharsky and K. A. Gschneidner Jr., Phys. Rev. Lett. 78, 4494 (1997).

[48]: WANG Hao, WU GuoXing, « Optimization of the performance characteristics in an irreversible regeneration magnetic Brayton refrigeration cycle », Tianhua College, Shanghai Normal University, Shanghai 201815, China, (2012).

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

[50] :W. F. Giauque, Journal of the American Chemical Society 49, 1864 (1927).

[51] : W. Giauque and D. McDougall, Phys. Rev. 43, 768, (1933).

[52]: Younes Chiba. « Contribution à l'étude d'un réfrigérateur à régénération magnétique active opérant près de la température ambiante : considération thermo fluide ». Thèse de doctorat, Génie mécanique ,École nationale polytechnique, Algérie, (2014).

[53] : Zimm, C. B., Auringer, J., Boeder, A., Chell, J., Russek, S. L. et Sternberg, A. « Design and initial performance of a magnetic refrigerator with a rotating permanent magnet. In Proc. Second IIF-IIR International Conference on Magnetic Refrigeration at Room Temperature », pages 341–347, Portoroz, Slovenia, (2007).

[54] : 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)

[55] :Z. Yan and J. Chen, Journal of Applied Physics 72, 1 (1992).

[56] : K. A. Gschneidner Jr., V. K. Pecharsky, and A. O. Tsokol, Reports on Progress in Physics 68, 1479 (2005).

[57]: J. A. Barclay and S. Sarangi « Selection of regenerator geometry for magnetic refrigerator applications » (ASME winter annual meeting, New Orleans, 1984).

- Métallurgie
- Lanthanide
- Alliages



	s^1	s^2	g	f^1	f^2	f^3	f^4	f^5	f^6	f^7	f^8	f^9	f^{10}	f^{11}	f^{12}	f^{13}	f^{14}	d^1	d^2	d^3	d^4	d^5	d^6	d^7	d^8	d^9	d^{10}	p^1	p^2	p^3	p^4	p^5	p^6
1	H																																He
2	Li	Be																										B	C	N	O	F	Ne
3	Na	Mg																										Al	Si	P	S	Cl	Ar
4	K	Ca																Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
5	Rb	Sr																Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
6	Cs	Ba		La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
7	Fr	Ra		Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	Uut	Fl	Uup	Lv	Uus	Uuo
8	Uue	Ubn	*	Ute	Uqn	Uqu	Uqb	Uqt	Uqq	Uqp	Uqh	Uqs	Uqo	Uqe	Upn	Upu	Upb	Upt	Upq	Upp	Uph	Ups	Upo	Upe	Uhn	Uhu	Uhb	Uht	Uhq	Uhp	Uhh	Uhs	Uho

	g^1	g^2	g^3	g^4	g^5	g^6	g^7	g^8	g^9	g^{10}	g^{11}	g^{12}	g^{13}	g^{14}	g^{15}	g^{16}	g^{17}	g^{18}
*	Ubu	Ubb	Ubt	Ubq	Ubp	Ubh	Ubs	Ubo	Ube	Utn	Utu	Utb	Utt	Utq	Utp	Uth	Uts	Uto

Métalloïdes	Non-métaux	Halogènes	Gaz rares
Métaux alcalins	Métaux alcalino-terreux	Métaux de transition	Métaux pauvres
Lanthanides	Actinides	Superactinides	Éléments non classés

-Table périodique-