REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA

RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA

Faculté de Technologie

Département de Génie Mécanique

Mémoire de fin d'études de Master

Filière : Génie mécanique

Spécialité : Energétique

Thème

Contribution à l'étude de faisabilité des nouveaux matériaux pour la réfrigération magnétique

Présenté par :

Chaimaa SAFIR

Proposé et Dirigé par :

Prof. Younes CHIBA

Dr. Malika AMARI

Dr. Boualam BENDOUHA

2023-2024

Remerciements

El hamdoulillah, je remercie Dieu, le Miséricordieux, le Tout-Puissant, de m'avoir donné le courage, la volonté et la patience de mener à terme ce travail.

Et à mon superviseur, Prof. Chiba Younes, je vous remercie pour l'honneur d'avoir dirigé ce travail sans ménager aucun effort pour me guider dans le chemin sinueux de la recherche. Votre compétence et votre sens du devoir ont laissé une grande impression sur moi.

Je tiens à exprimer ma sincère gratitude à tous ceux qui m'ont aidé à accomplir ce travail et à terminer mes études universitaires avec succès, en particulier le co-encadreur, Mr Bendouha Boualam. Sans oublier Dr Malika Amari.

Je remercie également les membres du jury pour avoir accepté d'examiner et de juger mon travail.

Dédicaces

Je dédie ce travail à ma famille, avec une gratitude particulière envers mon cher père Safir Laïd et ma chère mère Dif Fatiha. Leurs paroles d'encouragement et de soutien au fil des années resteront à jamais un cadeau inestimable de leur part. Je vous remercie du fond du cœur pour tout ce que vous avez fait pour moi. ✵

À mon cher frère, Sfir Mohamed, je te remercie infiniment pour ton soutien à chaque instant, et sa femme Saliha. À mes chères sœurs, Safir Ahlam et Safir Asma, qui ne m'ont jamais abandonné et sont restées à mes côtés jusqu'à la fin, je vous remercie du fond du cœur pour votre soutien et votre amour. Vous avez une place spéciale dans mon cœur, et je resterai reconnaissant envers vous pour toujours. ✵

Mon cher oncle, Safir Saïd, et sa femme, Mekide Fatiha, je vous remercie pour votre encouragement et votre soutien constants, que je n'oublierai jamais. Et également, je remercie le mari de ma sœur, Kellali Mohamed, que je considère comme mon grand frère, pour votre soutien constant. De même, je remercie le mari de ma sœur, Bouzair Saber.

À mes chers petits, Ines, Djawed, Ikhlas et Maram. ✵

Je dédie aussi mon travail à mes amis dont le soutien incessant m'a été inestimable tout au long de ma vie, j'apprécierai toujours tout ce qu'ils ont fait.

ملخص

تستكشف مذ كرة الماستر هذه إمكانية استخدام مادة هيسلر NiMnIn في تطبيقات التبريد المغناطيسي بالقرب من درجة حرارة الغرفة، وهي تقنية حديثة تعتمد على التأثير المغناطيسي الحراري الذي يسمح بتغيير درجة حرارة المادة عندما تتعرض للمجالات المغناطيسية. في الجزء الأول تم حساب الخواص التركيبية والإلكترونية للمادة باستخدام برنامج CASTEP. وفي الجزء الثاني تم تطوير برنامج حسابي عددي لمحاكاة دورة التبريد المغناطيسي النشط (AMR) عبر برنامج Matlab. ركز النموذج على تحليل الاقتران المغنطيسي الحراري بين مائع نقل الحرارة والمادة الصلبة المغنطيسية الحرارية المطورة مسبقًا. وللقيام بذلك تم أخذ معادلات الطاقة الخاصة بسائل نقل الحرارة والمادة الصلبة في الاعتبار لتقييم قدرة التبريد وفرق درجات الحرارة ومعامل الأداء. ويتم تحليل النتائج التي تم الحصول عليها ومناقشتها.

الكلمات المفتاحية: التبريد المغناطيسي، المحاكاة العددية، برنامج CASTEP – مادة هيسلر، دورة التبريد المغناطيسي النشط (AMR)، السعرات الحرارية المغناطيسية.

Résumé

Ce travail de Master explore le potentiel de l'utilisation du matériau Heusler NiMnIn dans les applications de réfrigération magnétique près de la température ambiante, une technologie récente basée sur l'effet magnétocalorique qui permet de modifier la température d'un matériau lorsqu'il est exposé à des champs magnétiques. Dans la première partie, les propriétés structurales et électroniques du matériau ont été calculées à l'aide du logiciel CASTEP. Dans la deuxième partie, un code de calcul numérique pour simuler le cycle de réfrigération magnétique active (AMR) a été développé via Matlab. Le modèle s'est concentré sur l'analyse du couplage magnétocalorique entre le fluide caloporteur et le matériau solide magnétocalorique développé précédemment. Pour ce faire, les équations de l'énergie pour le fluide caloporteur et le matériau solide sont considérées pour évaluer la puissance frigorifique, l'écart de température et le coefficient de performance. Les résultats obtenus sont analysés et discutés.

Mots-clés : Réfrigération magnétique, Simulation numérique, Logiciel CASTEP – Matériau Heusler, Cycle AMR, Magnétocalorique.

Abstract

This Master's memory explores the potential of using the Heusler NiMnIn material in magnetic refrigeration applications near room temperature, a recent technology based on the magnetocaloric effect, which allows the temperature of a material to be changed when exposed to magnetic fields. In the first part, the structural and electronic properties of the material were calculated using the CASTEP software. In the second part, a numerical calculation code to simulate the active magnetic refrigeration (AMR) cycle was developed using Matlab. The model focused on analyzing the magnetocaloric coupling between the heat transfer fluid and the previously developed magnetocaloric solid material. To achieve this, the energy equations for the heat transfer fluid and the solid material were considered to evaluate the cooling capacity, the temperature difference, and the coefficient of performance. The results obtained are analyzed and discussed.

Keywords: Magnetic refrigeration, Numerical simulation, CASTEP, Heusler material, AMR cycle, Magnetocaloric

LISTE DES FIGURES

N° Figure		N° Page
	CHAPITRE I : Généralité sur la réfrigération magnétique	
I.1	Comparaison des performances de différentes technologies de réfrigération	**5**
I.2	Comparaison entre Réfrigération magnétique et Réfrigération conventionnelle	**7**
I.3	Variation de la température adiabatique et de l'entropie magnétique pour un champ Variant de $B = 0$ à $B > 0$	**8**
I.4	Schéma du démonstrateur de réfrigération magnétique à régénération active de HES-SO	**9**
I.5	Cycle magnétique de Brayton	**10**
I.6	Cycle magnétique d'Ericsson	
I.7	Système multi-étage basé sur le cycle de Brayton. Dans la configuration (a) chaque étage utilise un matériau optimal alors que pour la configuration (b) c'est le même matériau qui est utilisé pour tous les étages	**11**
I.8	Cycle à régénération magnétique active (AMR)	**12**
I.9	Démonstrateur de NASA réalisé par Brown et son équipe	**13**
I.10	Démonstrateur de RM développé par Chubu electric/Toshiba	**14**
I.11	Schéma du prototype de Rowe et al	**15**
I.12	Démonstrateur de RM linéaire développé par HES-SO en 2010 : Cristal-1	**16**
I.13	Démonstrateur de RM linéaire développé par HES-SO en 2012 : Cristal-2	**17**
I.14	Évolution des écarts de température entre la source chaude et froide de démonstrateurs de HE-ESO par rapport aux autres démonstrateurs conçus dans le monde	**17**
	Chapitre II : Modélisation de cycle de réfrigération magnétique active (AMR)	
II.1	Bilan énergétique dans un élément solide	**23**
II.2	Bilan énergétique dans un élément fluide	**25**

Chapitre III : Matériaux magnétocalorique

III .1 Transition de phase et variation de l'entropie en fonction du type de matériau **29**

III .2 Structure cristalline des alliages Half-Heusler **35**

Chapitre IV : Résultats et discussions

IV.1 Tableau périodique des éléments **38**

IV.2 Structure Heusler ternaire **39**

IV.3 La structure Heusler Ternaire NiMnIn **39**

IV.4 Optimisation de l'énergie totale en fonction du volume obtenu par Les **41**

approximations LSDA. **42**

IV.5 La structure de bandes du composé NiMnIn **44**

IV.6 Évolution de la température adiabatique ΔTad (b) et de l'entropie magnétique

ΔS T (a) en fonction de température pour le NiMnIn sous le champ magnétique 2T. **46**

IV.7 Évolution de la puissance froide Q_C en fonction de span de température **47**

IV.8 Variation de la puissance frigorifique en fonction de l'écart de température

pour différents valeurs de la fréquence. **48**

IV.9 Variation de la puissance de la source chaude en fonction de l'écart de température **49**

IV.10 Variation de la puissance de la source chaude en fonction du span pour des

différentes valeurs de la fréquence du cycle. **50**

IV.11 Évolution temporelle des températures aux extrémités du solide. **51**

IV.12 Evolution temporelle des températures aux extrémités du solide pour

la fréquence f=1.25Hz. **52**

IV.13 Evolution temporelle des températures aux extrémités du solide pour

la fréquence f=0.8333Hz. **52**

IV.14 Evolution temporelle des températures aux extrémités du solide pour

la fréquence f=0.625Hz. **53**

IV.15 Évolution de *COP* en fonction de span de température. **54**

LISTE DES TABLEAUX

N° Tableau		N° Page
	CHAPITRE I : APERCU SUR LE CADRE BIBLIOGRAPFIQUE	
I.1	Principaux démonstrateurs de réfrigération magnétique	**18**
	Chapitre III : Matériaux magnétocalorique	
III.1	Propriétés de certains matériaux magnétocaloriques	**31**
	***Chapitre IV :* Résultats et discussions**	
IV.1	paramètres d'entrée pour le composé NiMnIn: Constante de la maille, groupe d'espace, numéro atomique et l'état de valence	**40**
IV.2	Variation de l'énergie totale en fonction du volume	**41**
IV.3	La constante de réseau d'équilibre $a0$, volume$V0$, l'énergie$E0$, le module structure B du composé full Heusler NiMnIn	**43**
IV.4	Données de la simulation numérique	**47**

Liste des symboles et abréviation

Symbol	Désignation	Unité
a_0	Paramètre de maille	[A^0] ou [u.a]
B	Champ magnétique	[T]
COP	Coefficient de performance	-
c	Chaleur spécifique	[$J.Kg^{-1}.K^{-1}$]
EF	Energie de fermi	[ev]
F	Fréquence	[Hz]
h	Coefficient d'échange convectif	[$w\ k^{-1}m^{-1}$]
m_f	Débit massique de fluide	[Kg/s]
NTU	Nombre unité de transfert	-
Q_C	Puissance chaude	[W]
Q_F	Puissance frégorifique	[W]
S	Entropie	[$J.Kg^{-1}.K^{-1}$]
T	Température	[k]
T_C	Température de source chaude	[k]
T_f	Température de source froide	[k]
t	temps	[s]
V	Volume	[u.a]
W	Travail	[J]

Abréviation	Désignation
AMR	Active Magnétique Réfrigération.
CFC	Cubique a faces centrées
CASTEP	Cambridge Serial Total Energy Package
DFT	Théorie de la fonctionnelle de la densité (Density functional theory)
EMC	Effet Magnétocalorique
LSDA	L'approximation de la densité locale de spin
MCM	Materiaux Magnétiques Et Magnétocaloriques
MS	Material Studio
HCFC	Hydro chlorofluorocarbure
RM	Réfrigération magnétique
RC	Réfrigération conventionnelle

Sommaire

Résumé

Remerciement

Dédicace

Liste des tableaux

Liste des figures

Liste des symboles et abréviation

Introduction générale……..…01

Chapitre I : Généralité sur la réfrigération magnétique

I.1. Introduction……..05

I.2.: L'effet magnétocalorique……..06

I.3. REFRIGERATION MAGNETIQUE ……..09

I.3.1. Les cycles de réfrigération magnétique……*10*

I.3.2. PRINCIPAUX DEMONSTRATEURS DE REFRIGERATION MAGNETIQUES……..13

I.4. Autres Démonstrateurs……*17*

Chapitre II : Modélisation de cycle de réfrigération magnétique active (AMR)

II.1. Introduction…….. *20*

II.2. Description du cycle AMR ……21

II.3. Équations gouvernant le problème physique.....*22*

II.3.1. Paramètres thermo fluides et performance du cycle AMR……..*24*

II.3.2. Le nombre d'unité de transfert……*25*

II.3.3. Transfert de chaleur……*26*

chapiter III : Matériaux magnétocalorique

III.1. Introduction……..*28*

III.2. matériaux magnétocaloriques.....*28*

III.3. Principaux matériaux magnétocaloriques……*29*

III.4.Caractéristique les matériaux à effet magnétocalorique.....30

III.5. Caractéristiques Des Matériaux constituant l'alliage Half-Heusler NiMnIn……32

III.6.Les alliages d'Heusler……33

III.7.Structure cristalline des alliages Half-Heusler……34

III.8. Simulation Numérique.....35

III.8.1. Définition le code de simulation Mstudio Mindlab……36
III.8.2. Définition MATLAB.....36

Chapitre IV : **Résultats et discussions**

IV.1. Introduction ……38
IV.2 Applications aux alliages ternaires……38
IV.2.1. Structure cristalline des composés ternaires…… 39
IV.2.2. Structure cristalline des composés NiMnIn……39
IV.3 propriétés structurales……40
IV.3.1.Optimisation des propriétés NiMnIn ……40
IV.3.2. Propriétés électroniques…… 43
IV.4 Propriétés magnétiques de matériau magnétocalorique NiMnIn ……46
IV.5 Modélisation numérique de cycle de réfrigération magnétique active (AMR) ……46

CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATIONS……55

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Le froid occupe une place très importante dans notre vie quotidienne. Il est utilisé dans de nombreuses applications telles que la climatisation automobile ou de bâtiment, la réfrigération industrielle ou domestique, la conservation agroalimentaire ou médicale, etc. Sa production s'appuie aujourd'hui essentiellement sur des techniques classiques de compression et de détente de gaz comme les chlorofluorocarbones (CFC), les hydrofluorocarbures (HFC) et les hydro chlorofluorocarbones (HCFC) [1].

Malheureusement, Ces derniers sont des gaz à effet de serre, qui contribuent au réchauffement climatique. Et afin de pallier ce problème ; une technique permettant de réaliser des systèmes à haute efficacité énergétique tout en ayant un impact environnemental faible [1].

De nombreux travaux sont aujourd'hui menés de par le monde sur les matériaux et les systèmes pour faire avancer la connaissance scientifique dans ce domaine et maîtriser toute la chaîne du matériau à l'application en passant par la caractérisation, l'analyse du cycle thermique et de la source de champ magnétique, la modélisation multi physique du système et son optimisation.

La réfrigération magnétique est considérée actuellement comme l'une des alternatives sérieuses pour remplacer les systèmes de réfrigération traditionnels [2] Basée sur l'effet magnétocalorique (EMC) ; une propriété intrinsèque de certains matériaux magnétiques.

L'intérêt suscité par la réfrigération magnétique est dû essentiellement à son efficacité énergétique élevée et à l'absence de fluides frigorigènes dangereux pour l'environnement; c'est à dire l'échauffement ou le refroidissement de certains matériaux magnétiques en réponse à l'application ou la suppression d'un champ magnétique extérieur. Découvert par Warburg en 1881[1].

L'intérêt pour la réfrigération magnétique en tant que nouvelle technologie de refroidissement à semi-conducteurs compétitive par rapport à l'approche conventionnelle de compression de vapeur s'est considérablement accru au cours des 10 dernières années, coïncidant avec les préoccupations internationales croissantes concernant le réchauffement climatique dû à une consommation d'énergie toujours croissante. Comme l'a souligné Didier. Coulomb en 2007 (Directeur de l'Institut international du froid) dans son discours introductif à la deuxième conférence internationale sur la réfrigération magnétique à température

ambiante (Thermal II), 15 % de la consommation totale d'énergie mondiale implique l'utilisation de la réfrigération (climatisation, réfrigération, congélation, Etc.). En outre, il a noté que l'Institut international du froid joue un rôle actif en aidant au développement de la réfrigération magnétique qui a le potentiel de réduire la consommation d'énergie de 20 à 30 % par rapport à la technologie conventionnelle de compression de vapeur[3].

L'objectif de ce travail est explore le potentiel de l'utilisation du matériau Heusler NiMnIn dans les applications de réfrigération magnétique près de la température ambiante, une technologie récente basée sur l'effet magnétocalorique qui permet de modifier la température d'un matériau lorsqu'il est exposé à des champs magnétiques. Dans la première partie, les propriétés structurales et électroniques du matériau ont été calculées à l'aide du logiciel CASTEP. Dans la deuxième partie, un code de calcul numérique pour simuler le cycle de réfrigération magnétique active (AMR) a été développé via Matlab Les résultats obtenus sont analysés et discutés. Le présent mémoire de master est structuré en quatre chapitres :

Le premier chapitre s'appuie sur une recherche bibliographique, rappelant les généralités sur le principe du froid magnétique, pour lequel nous fournirons les définitions nécessaires, comme les matériaux magnétiques, qui permettent de mieux les comprendre. Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté le modèle mathématique gouvernant le problème physique, les considérations pratiques ainsi que la méthode de résolution numérique adoptée. Le troisième chapitre est consacré aux derniers développements concernant nouveaux matériaux magnétocalorique pour la réfrigération magnétique. Les résultats de la simulation numérique sont présentés dans le quatrième chapitre sont analysés et discutés. Une conclusion avec recommandation décrive et explore le potentiel des différents paramètres étudiés du matériau magnétocalorique développé et les performances de cycle de réfrigération magnétique AMR.

Chapitre I

Généralité sur la réfrigération magnétique

I.1 Introduction

Dans ce chapitre nous avons présentés une synthèse bibliographique assez générale dans laquelle l'utilité de la réfrigération magnétique. La réfrigération magnétique est une technologie de rupture pour produire du froid basée Sur l'effet magnétocalorique. Liée au fait que le procédé d'aimantation/désaimantation est Très réversible, contrairement à la compression/détente d'un gaz dans les systèmes de Réfrigération conventionnels.

Par ailleurs, les systèmes de réfrigération magnétique ont de nombreux avantages par Rapport aux réfrigérateurs à compression de gaz :

– un poids et un encombrement plus faible, car la densité de chaleur absorbée par les matériaux magnétocaloriques, qui sont des solides, est beaucoup plus élevée que la

Densité de chaleur absorbée par les fluides frigorigènes (d'un facteur 100 environ).

– du bruit et des vibrations atténués grâce à l'absence de compresseur.

– un impact environnemental réduit (pas de gaz à effet de serre).

– une grande fiabilité et une longue durée de vie car les fréquences de fonctionnement sont basses et il y a peu de pièces mobiles.

– L'avantage principal de la réfrigération magnétique est sa grande efficacité thermodynamique (voir Figure I.1) [4].

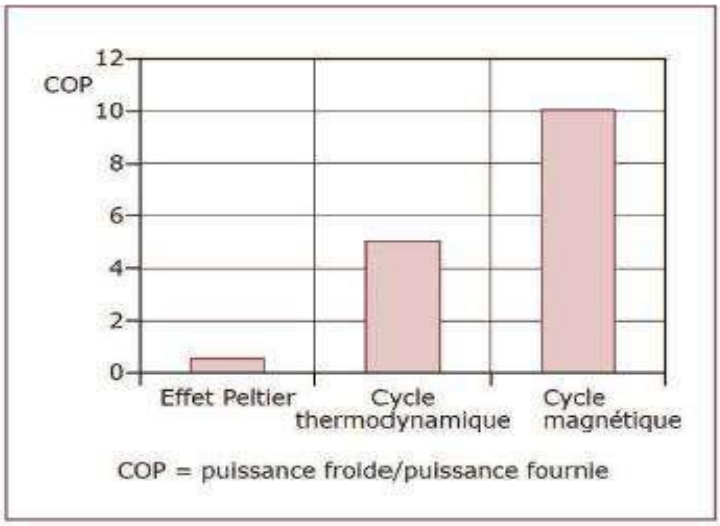


Figure I.1. Comparaison des performances de différentes technologies de réfrigération [4]

I.2. l'effet magnétocalorique

L'effet magnétocalorique (noté EMC par la suite) est une propriété physique du matériau magnétique consistant en un réchauffement ou un refroidissement (tous deux réversibles) du matériau autour de sa température de Curie sous l'action d'un champ magnétique externe, été découvert en 1881 par WARBURG [5], il A noté une élévation de température d'un échantillon de fer lorsqu'il est introduit dans un champ magnétique et une diminution de température lorsqu'il est retiré.

Il se manifeste dans certains matériaux magnétocaloriques à des températures proches de leur température de changement de phase magnétique (la température de Curie). Ces matériaux ont la propriété de s'élever en température lorsqu'ils sont soumis à un champ magnétique et se refroidissent de ce même écart de température lorsque ce champ est éliminé comme le montre le montre les figures (1.2), (1.3). Ce changement de température est attribué au couplage entre le magnétisme et le réseau atomique du matériau considéré en présence d'un champ magnétique extérieur.

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

La figure (1.2) montre que le principe de la réfrigération magnétique est similaire à celui de réfrigération conventionnel ; la seule différence est que le compresseur et le fluide frigorigène dans le cas conventionnel ont été remplacés par le régénérateur (matériau magnétocalorique) et le fluide caloporteur respectivement dans le cas de réfrigération magnétique.

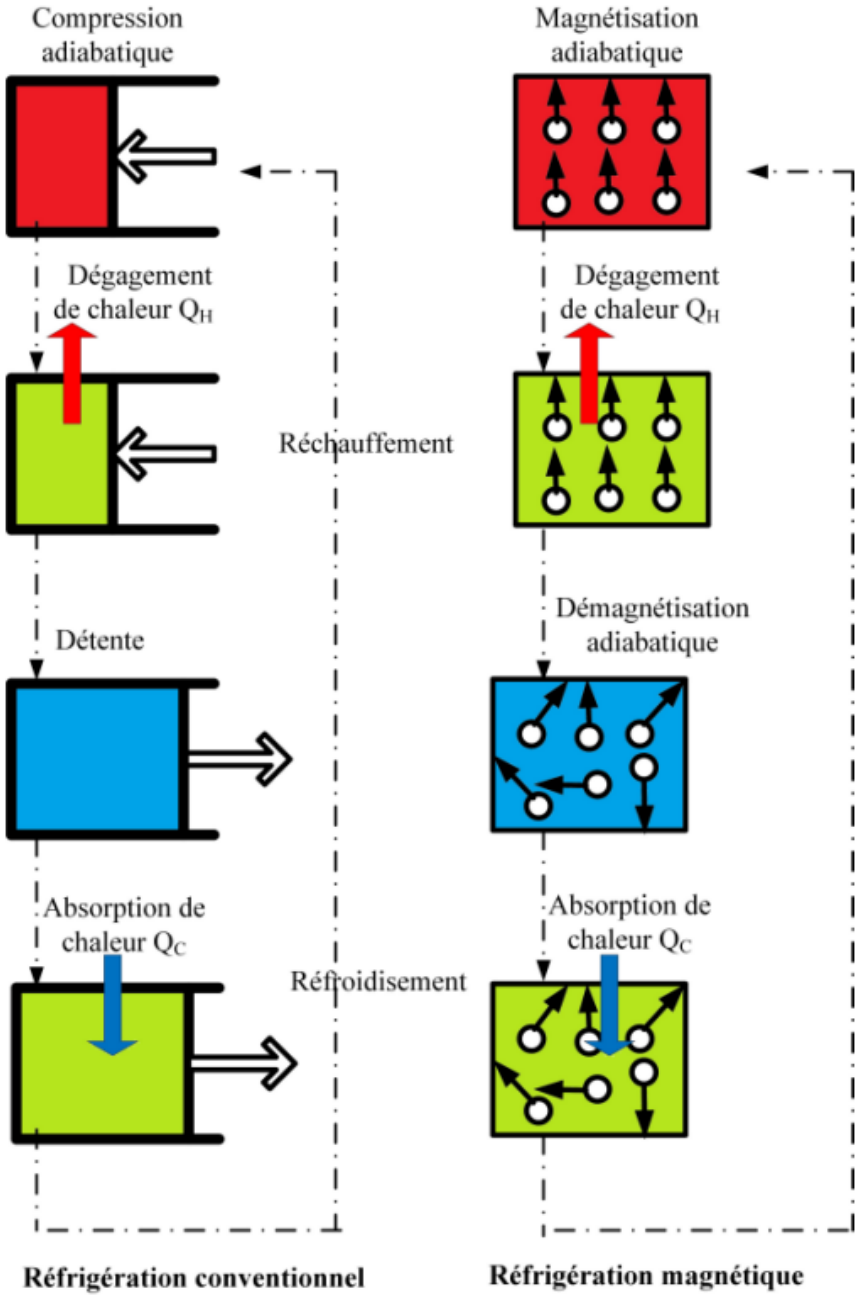


Figure I.2 : Comparaison entre Réfrigération magnétique et Réfrigération conventionnelle [7]

La figure (1.2) présente aussi les quatre étapes fondamentales d'un procédé de réfrigération conventionnel .Celles-ci sont la compression du gaz au niveau du compresseur, le dégagement de la chaleur dans le condenseur (source chaude), la détente du gaz et l'absorption de la chaleur au niveau de l'évaporateur (source froide). Les étapes de dégagement de chaleur et de détente engendrent le processus de refroidissement en deux étapes.

Les étapes du procédé de réfrigération magnétique sont analogues. En comparant entre les deux Procédés, on peut voir qu'au lieu de la compression du fluide frigorigène, un matériau magnétocalorique est placé dans un champ magnétique et qu'au lieu de la détente, on retire le matériau du champ. Comme il est expliqué dans la partie précédente, ces procédés changent la température du matériau et la chaleur peut être dégagée ou absorbée, comme dans le procédé conventionnel. En revanche, il existe des différences entre les deux procédés. L'absorption et le dégagement de chaleur par un fluide frigorigène constituent un processus relativement rapide, car les mouvements turbulents transfèrent la chaleur très rapidement. Mais, ce n'est pas le cas pour les matériaux magnétocaloriques. Car, le mécanisme de transfert de chaleur ici s'effectue par convection d'une manière très lente.

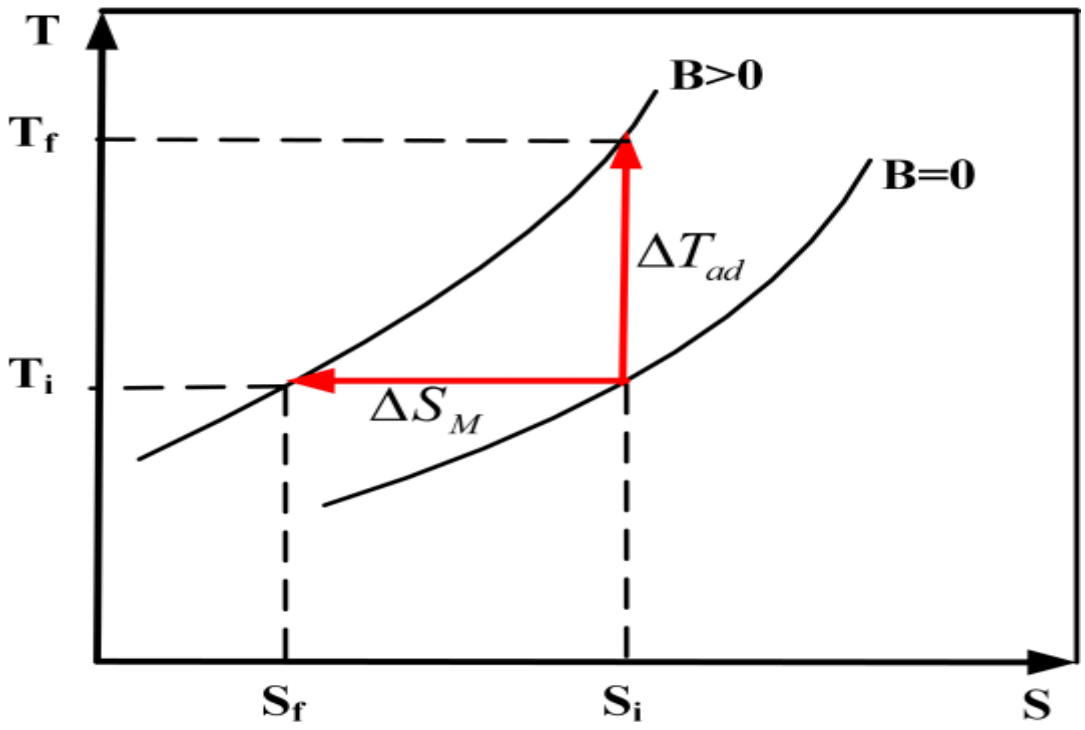


Figure I.3: Variation de la température adiabatique et de l'entropie magnétique pour un champ Variant de $B = 0$ à $B > 0$ [7]

I.3. REFRIGERATION MAGNETIQUE:

Les systèmes de réfrigération magnétique se composent de différents éléments, comme illustré dans la Figure I.4. Le cœur de ces systèmes est un bloc de matériau magnétique qui est soumis à un champ magnétique variable, ce qui entraîne des cycles de chauffage et de refroidissement successifs. Le champ magnétique peut être généré de différentes manières, notamment par un électroaimant alimenté par un courant alternatif, une bobine supraconductrice ou le déplacement d'une structure d'aimants permanents.

La chaleur dégagée ou absorbée par le matériau magnétique est ensuite transférée à un liquide réfrigérant, qui circule vers un échangeur de chaleur. Ce dernier permet de transférer la chaleur vers une source chaude ou de la recevoir d'une source froide, en fonction du mode de fonctionnement du système.

Enfin, pour assurer le déplacement du fluide caloporteur, une pompe ou des pistons sont nécessaires. Ils permettent d'assurer la circulation du liquide réfrigérant dans le système de réfrigération magnétique.

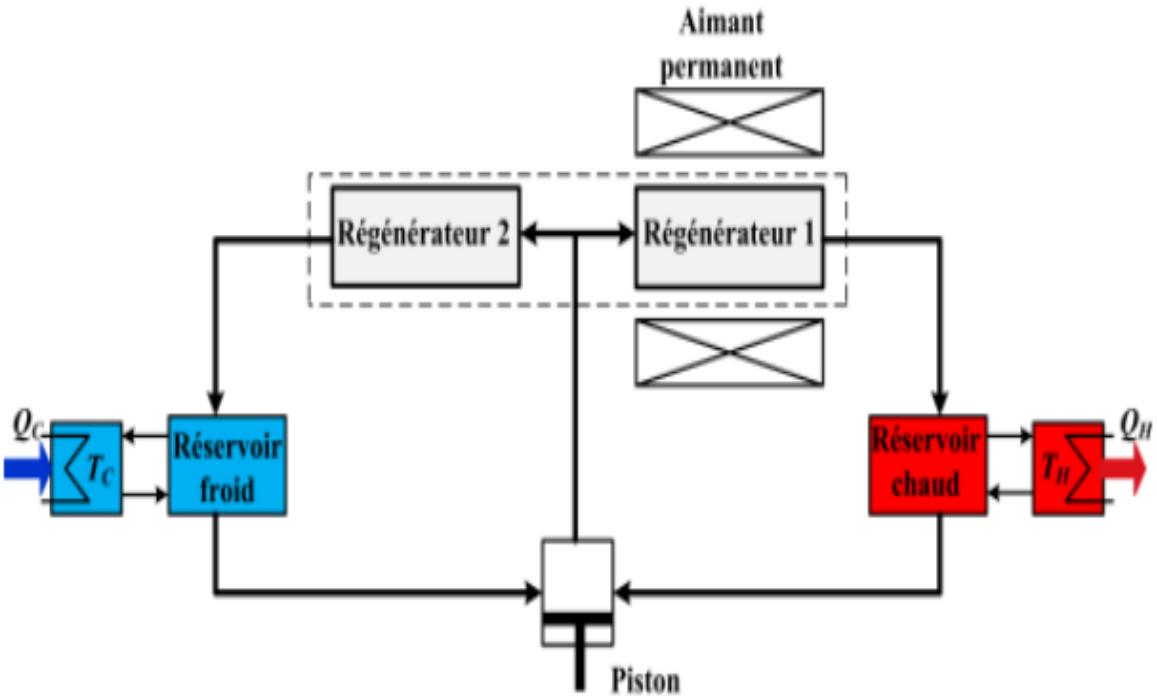


Figure I.4: Schéma du démonstrateur de réfrigération magnétique à régénération active de HES-SO [7]

I.3.1. Les cycles de réfrigération magnétique

I.3.1.1 Cycle de Brayton magnétique

Le cycle magnétique de Brayton est composé de quatre étapes :

– Aimantation adiabatique (1→2). Le MCM est aimanté et sa température augmente.

– Refroidissement iso magnétique d'entropie (2→3). Le MCM cède de la chaleur à la source Chaude (via la circulation d'un fluide caloporteur) et sa température diminue.

– Désaimantation adiabatique (3→4). Le MCM est désaimanté et sa température diminue.

– Réchauffement iso magnétique d'entropie (4→1). Le MCM absorbe de la chaleur de la source froide (via la circulation d'un fluide caloporteur) et sa température augmente. C'est lors de cette phase que la réfrigération proprement dite a lieu. La puissance absorbée durant cette phase est appelée puissance froide. [8]

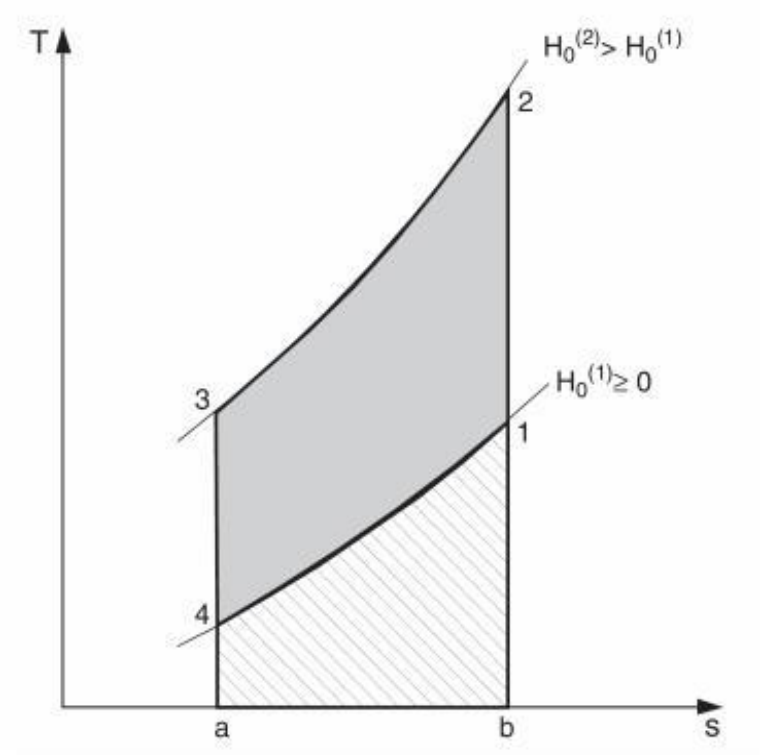


Figure 1.5 : Cycle magnétique de Brayton [8]

I.3.1.2 Cycle d'Ericsson magnétique

Le cycle d'Ericsson magnétique est composé de quatre étapes et nécessite de régénérer de la chaleur au cours de certaines étapes :

– Aimantation isotherme (2→3). Le MCM est aimanté à température constante. La diminution de l'entropie magnétique est compensée par un rejet de chaleur à la source chaude.

– Refroidissement iso champ (3→4). La chaleur rejetée par le MCM est utilisée lors de l'étape (1→2) par régénération.

– Désaimantation isotherme (4→1). Le MCM est désaimanté à température constante. L'augmentation de l'entropie magnétique est compensée par une absorption de chaleur de la source froide.

– Réchauffement iso champ (1→2). Pour une régénération idéale, l'aire (2-1-b-d), qui représente la chaleur absorbée par le MCM, doit être égale à l'aire (3-4-a-c), qui représente la chaleur rejetée par le MCM. La régénération nécessite une différence de température, il s'agit par conséquent d'un processus irréversible qui réduit la performance du cycle d'Ericsson.

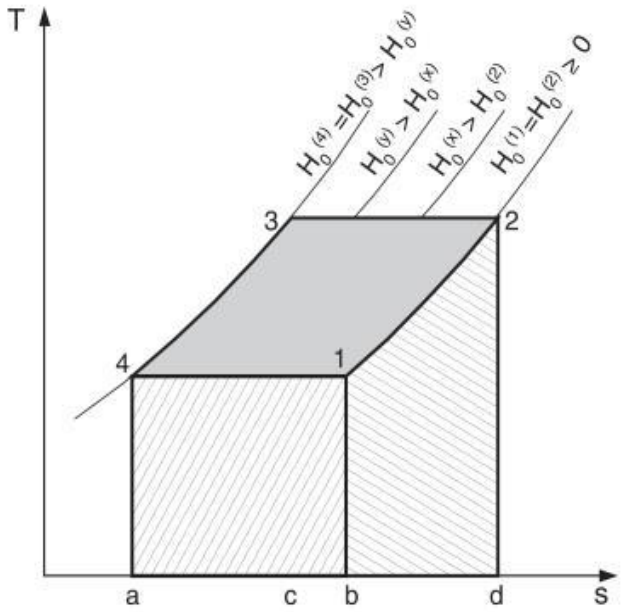


Figure I.6 Cycle magnétique d'Ericsson [8]

I.3.1.3 Cycle multi-étages

La plupart des systèmes de réfrigération nécessitent des écarts de température d'environ 40 Kelvin (40 K), une plage que les matériaux magnétocaloriques actuels ne peuvent pas atteindre. Une solution à ce problème consiste à utiliser plusieurs systèmes en cascade, comme illustré dans la Figure I.7 pour un système à trois étages. Un système multi-étage consiste à mettre en série plusieurs systèmes ayant chacun une plage de fonctionnement en température. Cependant, le principal inconvénient des systèmes multi-étages est l'ajout d'irréversibilités supplémentaires à celles présentes dans chaque étage du cycle, ce qui entraîne une diminution de la performance globale du système.

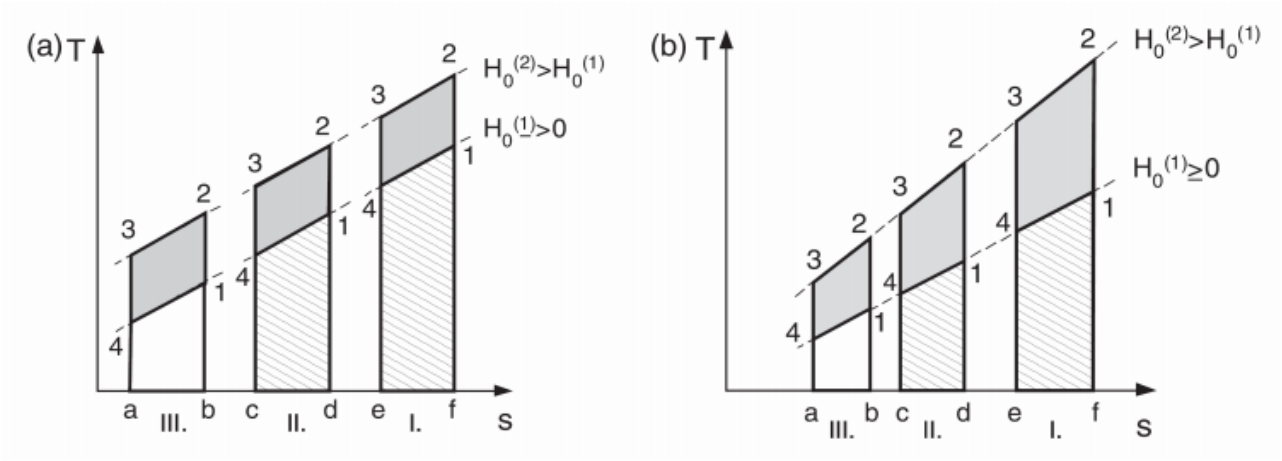


Figure I.7 Système multi-étage basé sur le cycle de Brayton. Dans la configuration (a) chaque étage utilise un matériau optimal alors que pour la configuration (b) c'est le même matériau qui est utilisé pour tous les étages [8].

I.3.1.4 Cycle magnétique à régénération active(AMR)

Une autre solution pour atteindre des écarts de température importants est d'utiliser un cycle à régénération. Le cycle AMR a été imaginé par Barclay et Steyert en 1982 [9] Il s'agit d'un cycle à régénération (on peut utiliser indifféremment un cycle de Brayton Ericsson, Stirling ou Carnot) dont la particularité est que c'est le matériau magnétocalorique lui-même qui joue le rôle de régénérateur. C'est pour quoi on parle de régénération active, en opposition avec les cycles à régénération passive, pour lesquels la régénération se fait par le biais d'un autre échangeur. Une façon simple de se représenter le cycle AMR est de considérer que chaque élément du matériau magnétocalorique subit un cycle, de Brayton par exemple, et que tous ces éléments sont en série. Ce fonctionnement est très similaire à celui d'un système multi-étage.

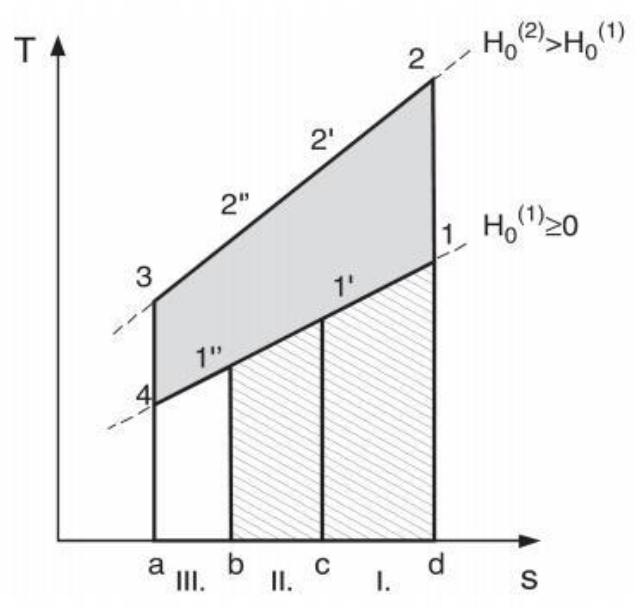


Figure I.8 Cycle à régénération magnétique active (AMR) [8]

I.3.2. PRINCIPAUX DEMONSTRATEURS DE REFRIGERATION MAGNETIQUES

I.3.2.1 Prototype magnétique de Brown (1976)

En 1976, Brown [10] Giauque a conçu le premie démonstrateur de réfrigération magnétique près de la température ambiante la figure (1.9) utilisant des supraconducteurs qui génèrent un champ magnétique de 7 teslas (7T) et un régénérateur passif. Ce démonstrateur linéaire était composé d'un bloc de gadolinium perforé permettant le passage du fluide caloporteur durant le cycle vers les échangeurs situés aux extrémités de la colonne verticale.

Au premier temps Brown a réussi à obtenir un écart de température entre la source chaude et la source froide de $\Delta T = 47K$. Puis par la suite en 1978 [11], il a pu atteindre un $\Delta T = 80K$ en utilisant le cycle de Stirling avec le même dispositif.

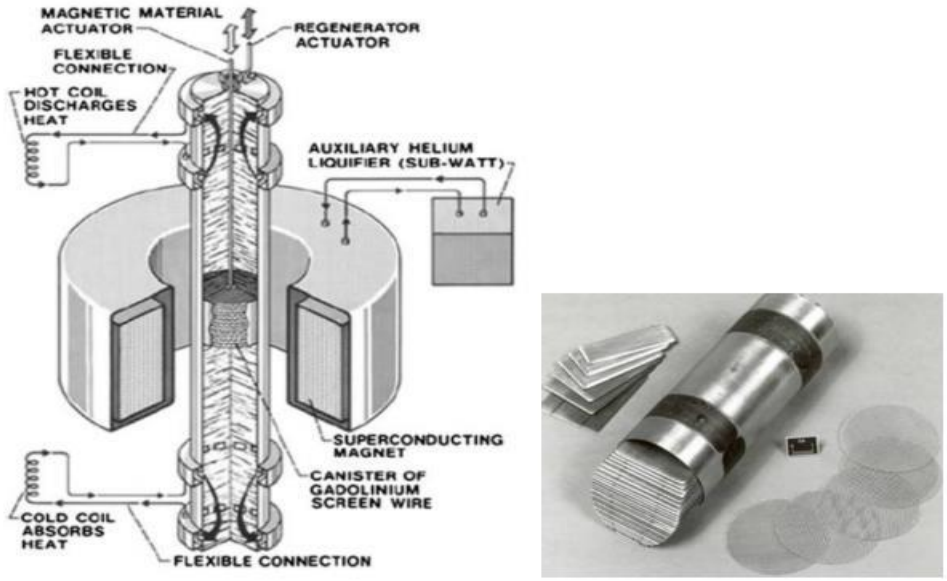


Figure I.9 Démonstrateur de NASA réalisé par Brown et son équipe [11]

I.3.2.2 Prototype de chubu electric/Toshiba (2000-2006)

En 2000, la collaboration entre Chubu Electric et l'entreprise Toshiba a abouti à la réalisation d'un démonstrateur linéaire à base de gadolinium sous forme de sphères, en utilisant des supraconducteurs pour générer un champ magnétique de 4 teslas (4T). Ils ont réussi à obtenir une puissance de 100 watts avec un écart de température d'environ 21 degrés Celsius.

De plus, pendant les années 2002 et 2003, Hirano et son équipe ont réussi à atteindre une puissance de 40 à 60 watts avec un écart de température compris entre 10 et 27 degrés Celsius en utilisant des aimants permanents [12]. En 2006, l'entreprise Chubu Electics et Tokyo Institute de technologie ont conçu un autre démonstrateur rotatif (figure (1.10)) En suivant une série de modifications introduites sur les prototypes rotatifs développés précédemment ce qui a leur permis d'atteindre une puissance plus grande de l'ordre de 540W [13].

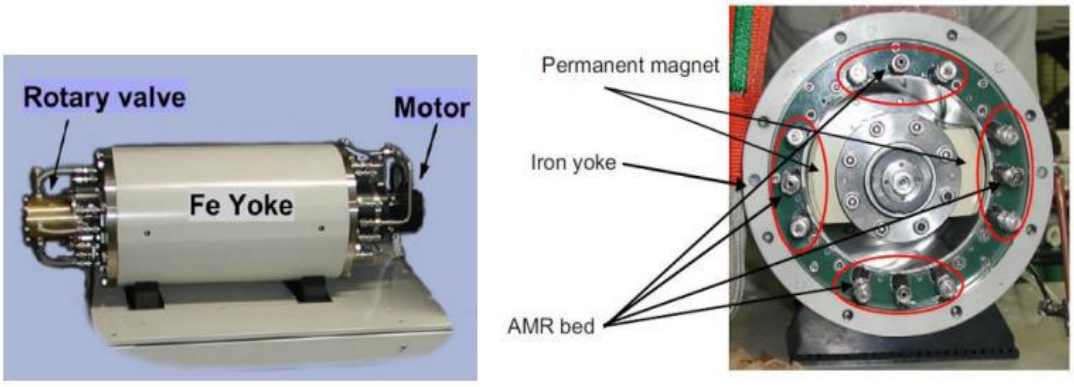


Figure I.10 Démonstrateur de RM développé par Chubu electric/Toshiba [13]

I.3.2.3 Prototype de Rowe et al. (2002-2006) :

En 2002, Rowe de l'Université de Victoria et Barclay de Cryofuel Systems ont conçu et réalisé un prototype de réfrigération magnétique [12]. Par la suite, Richard de l'Université du Québec à Trois-Rivières et d'autres collaborateurs ont apporté des améliorations à ce prototype et ont testé différents matériaux. Seule la configuration la plus récente est décrite ici. Ce prototype se distingue par son mode d'entraînement. Il est actionné par un moteur rotatif relié à un système bielle-manivelle, qui convertit la rotation du moteur en un mouvement linéaire du régénérateur. Le fluide caloporteur utilisé est de l'hélium gazeux, qui subit un mouvement oscillant à l'intérieur du régénérateur afin d'effectuer un cycle d'effet magnétique adiabatique réversible (AMR).

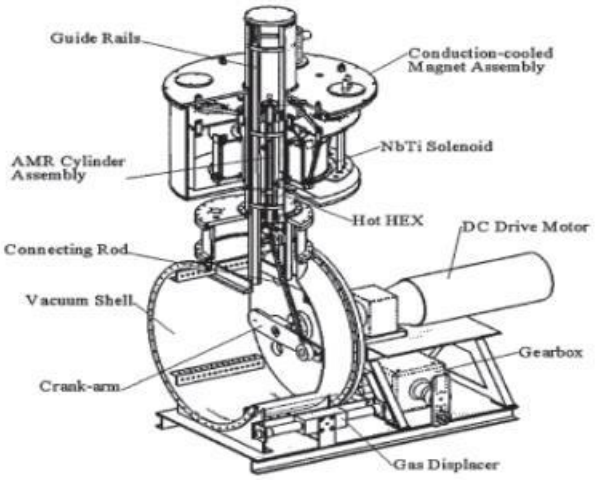


Figure I.11 Schéma du prototype de Rowe et al. [14]

Le prototype utilise un régénérateur multicouche composé de trois matériaux : Gd (TC = 294 K), Gd (0.74) Tb (0.26) (TC = 278 K) et Gd (0.85) Er (0.15) (TC = 265 K). Cela lui permet d'atteindre un écart de température important (50K avec un champ de 2 Tesla) [12].

I.3.2.4 Prototype de la Suisse

Le prototype développé par Osmann Sari et al. [7] de l'Université des Sciences Appliquées de Suisse Occidentale est un système linéaire qui comprend deux cylindres de Halbach. Chaque cylindre de Halbach est associé à deux régénérateurs qui passent successivement à travers l'entrefer. Cette configuration permet une compensation partielle des forces exercées sur les régénérateurs lors de leur déplacement dans la zone de fort gradient de champ magnétique.

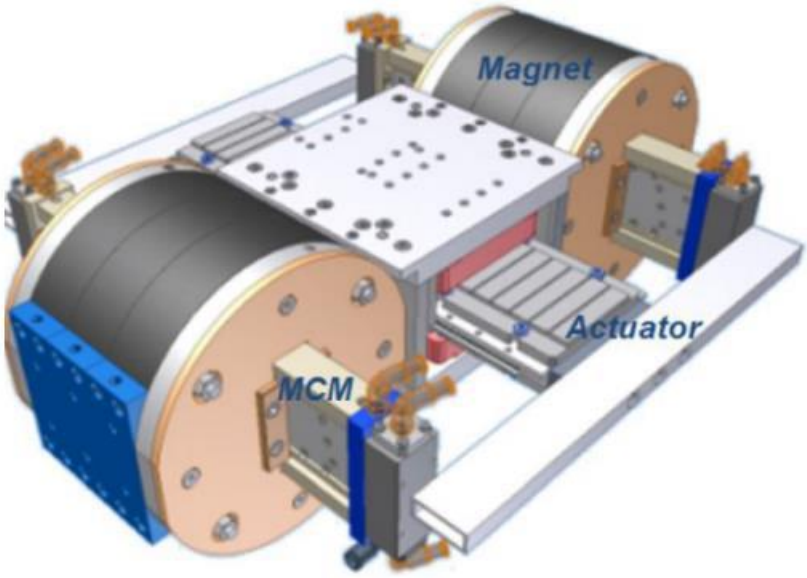


Figure I.12 Démonstrateur de RM linéaire développé par HES-SO en 2010 : Cristal-1 [15]

Récemment des améliorations importante sont été introduites sur cette machine pour augmenter sa performance (la figure (1.13)) ce qui permet d'avoir des écarts de température qui pouvaient dépassés les 32C, comme le montre la figure (1.14) [16].

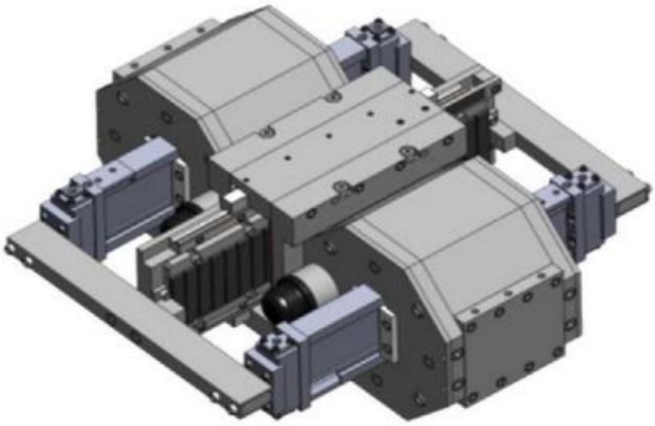


Figure I.13 Démonstrateur de RM linéaire développé par HES-SO en 2012 : Cristal-2 [7]

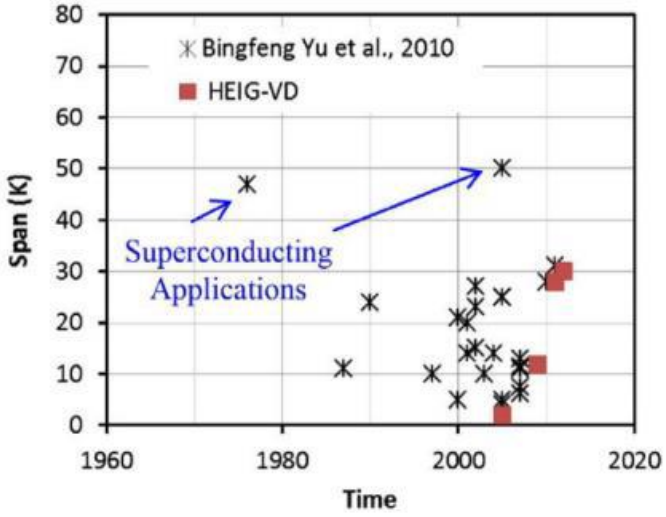


Figure I.14 Évolution des écarts de température entre la source chaude et froide de démonstrateurs de HE-ESO par rapport aux autres démonstrateurs conçus dans le monde [7]

I.4 : Autres Démonstrateurs :

Parmi les démonstrateurs qui sont construits récemment, on cite celui de Riso en Danemark par l'équipe de Riso DTU [17] en 2012, l'équipe de Riso ont construit un démonstrateur 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.

Nombreuses recherches ont commencé à attacher de l'importance à la réfrigération magnétique autour de la température ambiante depuis sa découverte en 1881, et ont développé consécutivement quelques systèmes intéressants.

Le Tableau I.1 résumé de certains des derniers les principaux démonstrateurs de réfrigération magnétique

Tableau 1.1 : Principaux démonstrateurs de réfrigération magnétique

Laboratoire et lieu	Ann.	Type	*f*(Hz)	*B*(T)	MCM	*P*(W)	Δ*T*(K)	*COP*	Géométrie	Réf.
Institute of Materials Science and Applied Mechanics, , Polan	2013	Linéaire	0.025	1	Gd	_	1.6	_	Particules	[18]
Laboratoire de Génie Mécanique et Développement, École Nationale Polytechnique HES.SO	2015	Linéaire	0.24	1.5	LaFeCoSi	5.5	15.3	0.4	Plaques	[7]
Department of Energy Conversion and Storage, Technical University of Denmark,	2015	Rotatif	0.75	1.4	Gd	103	10.2	3.1	Sphères	[19]
Department of Energy Conversion and Storage, Technical University of Denmark,	2016	Linéaire	1	_	Gd	_	33	6.5	Sphères	[20]
Department of Mechanical Engineering, Federal University of Santa Catarina, Florianópolis Brazil	2018	Rotatif	1.2	_	Gd	81.5	15.5	6.1	spherical particles	[21]
Department of Energy Conversion and Storage, Technical University of Denmark	2021	Rotatif	0.5	1.44	La(Fe,Mn,Si) 13Hy	288	10.3	5.7	spherical particles	[22]
Division of Materials Science and Engineering, South Korea	2021	Linéaire	1	1	$Mn_{1.2}Fe_{3.8}Si_3$ Gd		4.75 7.5	_	Sphères	[23]
Ubiblue: 12 Allée des Forgerons, Entzheim 67960, France	2021	Rotatif	_	1.04	Gd	900	18.35	9.7	Plaques	[24]
FEMTO-ST Institute, Univ. Bourgogne Franche-Comte, CNRS,Energy Department,	2022	Linéaire	2	1.44	Gd	_	25.4	_	Plaques Parallèle	[25]
Department of Energy Conversion and Storage, Technical University of Denmark (DTU),	2022	Linéaire	1.4	1.44	Gd	344	16	2.3	Sphères	[26]
Department of Energy Conversion and Storage, Technical University of Denmark	2022	Linéaire	1.4	1	Gd	330	16	5	Plaques	[27]
Department of Mechanical, Energy, Management and Transportation Engineering, University of *Genoa, Italy*	2023	Linéaire	1.1	1	Gd	_	15	6	Plaques	[28]
Department of Energy Conversion and Storage, Technical University of Denmark	2023	Rotatif	1.4	1	Gd	452	14	3.2	Spheres	[29]
School of Rare Earths, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, PR China	2023	Rotatif	0.5	1 .3	Gd	126	17.5	1.8	Particules	[30]

Chapitre II :

Modélisation de cycle de réfrigération magnétique active (AMR)

II.1. Introduction

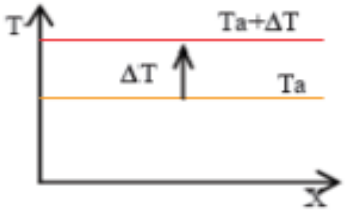
L'utilisation directe de l'effet magnétocalorique géant à température ambiante est restreinte en raison de la capacité limitée des matériaux magnétoélectriques existants à générer des écarts de température élevés. Par exemple, un échantillon de gadolinium à proximité de la température ambiante produit un effet magnétocalorique d'environ 10 K sous l'influence d'un champ magnétique de 5 T. Sachant que le gadolinium est considéré comme l'un des meilleurs matériaux magnétocaloriques disponibles actuellement, cet EMC correspond à la valeur absolue maximale pouvant être atteinte entre le réservoir chaud et le réservoir froid et il est certainement difficile d'imaginer l'exploitation de cet EMC dans la plupart des applications de réfrigération [31].

La barrière technique liée à l'exploitation de l'effet magnétocalorique à température ambiante a été surmontée grâce à l'utilisation de la réfrigération magnétique active à régénération (AMRR - Active Magnétique Régénérative Réfrigération), [31]. Dans les systèmes de réfrigération magnétique, la régénération permet de restaurer et de réinjecter la chaleur rejetée par le réseau dans une étape du cycle vers une autre étape du même cycle. Ainsi, la capacité utilisée pour refroidir la charge du réseau peut être efficacement exploitée pour augmenter la variation effective de l'entropie et créer un écart de température plus important [*32*].

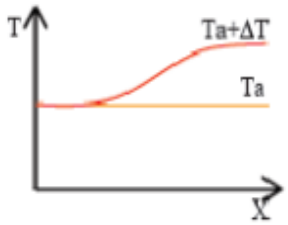
Dans les cycles à régénération externe, le régénérateur joue un rôle crucial en permettant au fluide de circuler alternativement entre la source chaude et la source froide. Auparavant, une limitation de ce principe était la nécessité de maintenir un gradient de température stable le long de la colonne de fluide pour assurer l'effet de régénération. Une solution consiste à utiliser le matériau réfrigérant lui-même en tant que régénérateur. Barclay est le premier à avoir décrit le fonctionnement d'un régénérateur de ce type. Son cycle de fonctionnement diffère des cycles conventionnels, mais les phases sont similaires à celles du cycle de Brayton.

II.2. Description du cycle AMR

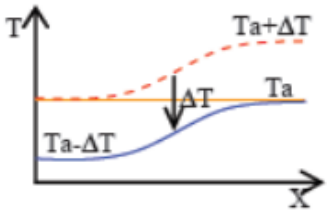
Etape 1 : Aimantation du matériau à partir d'un état initial où tout le système est à température Ta. Chaque point du matériau régénérateur voit sa température augmenter de DT suite à l'application du champ magnétique [32]



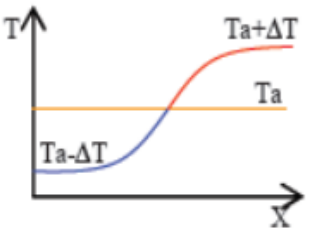
Etape 2: Ecoulement du fluide de la source froide vers la source chaude. La chaleur de l'aimantation est évacuée par le fluide circulant de la source froide TC à la source chaude TH : ont créé ainsi un gradient thermique le long du lit.



Etape 3 : Désaimantation du matériau Chaque point du régénérateur voit sa température baisser de DT suite à la désaimantation.



Etape 4 : Ecoulement du fluide de la source chaude vers la source froide Le fluide circulant de la source chaude TC à la source froide TF cède sa chaleur au régénérateur. Le gradient est amplifié.



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

$$COP = \frac{Qc}{Wmag + Wp + WF} \qquad (II.1)$$

Où, **Wm**, **WP**, **WF** et **Qc** représentent le travail magnétique, travail fourni par la pompe, les pertes dus aux courants de Foucault et la puissance frigorifique respectivement

$$Wmag = \int \vec{F}.d\vec{l} \qquad \text{(II.2)}$$

$$Wp = V\frac{\Delta p}{\eta P} \qquad \text{(II.3)}$$

$$qc = mfc(tc - tf,c) \qquad \text{(II.4)}$$

$$Tf = \frac{1}{T}\int (x = L,)\, dt \qquad \text{(II.5)}$$

II.3. Équations gouvernant le problème physique

La simulation numérique de cycle de réfrigération magnétique active est basée sur des équations de quantité de mouvement et de la continuité pour le fluide ainsi que les équations d'énergie pour le fluide et le solide, pour décrire le transfert de chaleur entre le solide et le fluide. Également, nous avons adopté les considérations pratiques et les hypothèses simplificatrices suivantes :

1) Fluide Newtonien, incompressible, et écoulement uniforme dans le lit régénérateur.
2) Les propriétés des fluides étant constantes
3) Le transfert thermique par rayonnement dans le régénérateur étant négligeable devant le transfert de chaleur par conduction et convection.
4) Les frottements dus aux courants de Foucault, hystérésis et le champ démagnétisant étant négligés.
5) Le transfert de chaleur étant monodimensionnel.
6) La masse volumique du solide étant supposée constante.
7) La conductivité thermique du solide étant supposée constante.
8) Écoulement du fluide monodimensionnel et uniforme.
9) Les effets de conductivité étant négligés.

Pour illustrer comment on obtient les équations du bilan correspondantes, les figures (II.1) et (II.2) ont été considérées.

- $-krAr\frac{\partial \theta}{\partial x}$: Représente le taux de chaleur axial dû à la conduction dans le solide

- **(1 − ε) ρrcr (B, θ) Ar $\frac{\partial\theta}{\partial x}$ dx** : Représente l'accumulation de l'énergie thermique dans le solide.
- **Hp (θ − T) dx** : Représente l'échange de chaleur par convection entre le fluide et le solide.
- $\mathbf{m_f c_f T}$: Représente le transfert d'énergie thermique dû à l'écoulement du fluide.
- $-k_f A_{AF} \frac{\partial T}{\partial x}$: Représente le taux de chaleur dû à la conduction dans le fluide.
- $\varepsilon\rho_f c_f A_f \frac{\partial T}{\partial t}$ **dx:** Représente l'accumulation de l'énergie thermique dans le fluide.
- $\left|\frac{f m_f^3}{2\rho_f^2 A_f^2 D_h}\right|$**dx:** Représente les pertes de charge dues au frottement dans le fluide.
- **hp(T − θ) dx** : Représente le taux de chaleur par convection entre le fluide et le solide.

En examinant les bilans énergétiques des éléments du fluide et du solide, nous pouvons obtenir des équations qui relient les températures du fluide de transfert de chaleur et du réfrigérant solide en fonction des coordonnées spatiales x et temporelles t:

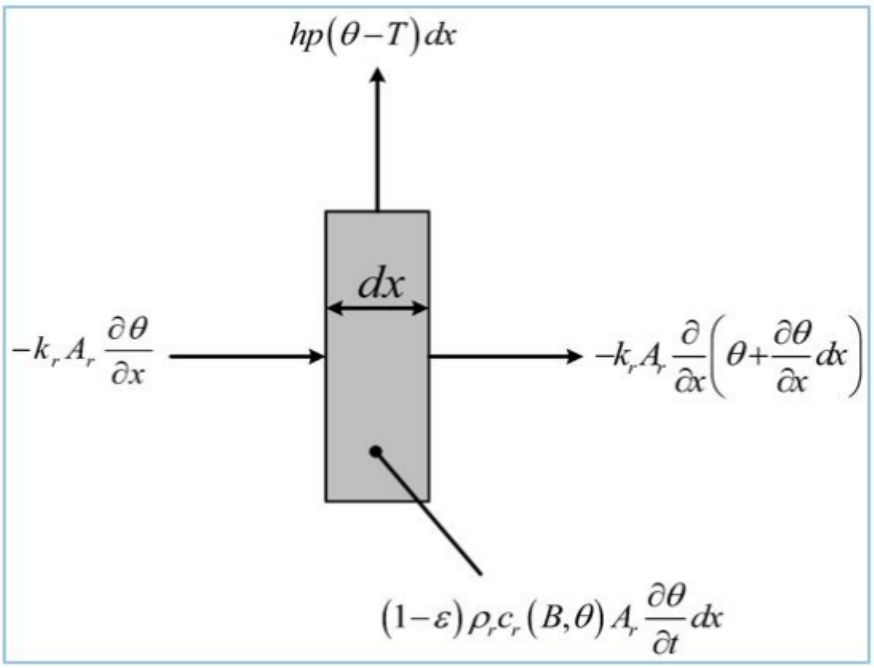


Figure II.1 _ Bilan énergétique dans un élément solide [7]

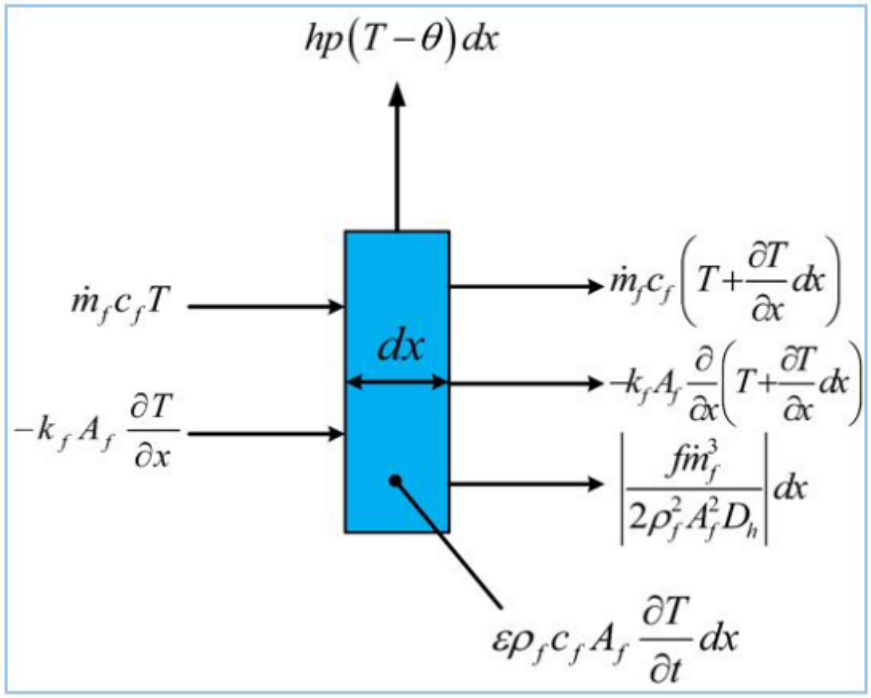


Figure II.2_ Bilan énergétique dans un élément fluide [7]

$$\varepsilon\rho\, \boldsymbol{f} c_f A_f \frac{\partial T}{\partial t}\mathrm{dx} + c_f m_f \frac{\partial T}{\partial x} = \mathrm{hp}\,(\theta - \mathrm{T}) + A_f K_f \left(\frac{\partial^2 T}{\partial^2 x}\right) + \left|\frac{f m_f^3}{2\rho_f^2 A_f^2 D_h}\right| \qquad \text{(II.6)}$$

$$(1-\varepsilon)\, p_r c_r A_r\, (\mathrm{B}, \theta)\, \mathrm{Ar}\, \frac{\partial \theta}{\partial x}\, \mathrm{dx} = \mathrm{hp}(\mathrm{T}-\theta) + A_r k_r \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2}\right) \qquad \text{(II.7)}$$

Avec la porosité du régénérateur qui est définie par la relation suivante :

$$\alpha = 1 - \frac{e_r}{e_r + e_f} \qquad \text{(II.8)}$$

II.3.1.Paramètres thermo fluides et performance du cycle AMR

Pour caractériser le cycle de réfrigération magnétique active, il est important de définir les deux nombres adimensionnels suivant : l'utilisation et le nombre d'unité de transfert. [7]

II.3.1.1 L'utilisation

L'utilisation est donnée par la relation suivante :

$$\boldsymbol{U} = \frac{m_f c_f \tau_p}{M_r c_r} \qquad \text{(II.9)}$$

$$c_r = c_r(\Theta = T_{curie,} B = 0\ ) \qquad \text{(II.10)}$$

$$\tau_{p=\frac{d}{v}} \qquad \text{(II.11)}$$

τ_p : Représente le temps de pompage du fluide.

d : Représente la course du vérin pneumatique.

v : Représente la vitesse du fluide.

II.3.2 Le nombre d'unité de transfert

Le nombre d'unité de transfert est le rapport entre le taux d'échange de chaleur et la capacité thermique du fluide

$$\text{NTU}=\frac{hA_{rf}}{m_f c_f} \qquad \text{(II.12)}$$

Pour simplifier l'équation de bilan pour le fluide et le solide, il est important de redéfinir l'utilisation et le nombre d'unité de transfert par unité de longueur comme suit :

$$U_l = \frac{m_f c_f \tau_p}{(1-\varepsilon)\mathrm{A}p_r c_r \mathrm{L}} \qquad \text{(II. 13)}$$

$$\text{NTU}=\frac{\mathrm{h}A_{rf}\,L}{m_f c_f} \qquad \text{(II.14)}$$

L'équation de bilan devient comme suit :

$$\Psi\frac{\partial T}{\partial t} + U_L\frac{\partial T}{\partial x} = NTU.U_L(\Theta - T) + \frac{1}{C_R}\frac{\partial}{\partial x}\left(k_f\frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{1}{C_R}\left|\frac{\lambda m_f^3}{2\rho_f^2 A_f^2\ D_h}\right| \qquad \text{(II.15)}$$

$$\frac{\partial\Theta}{\partial\mathrm{t}} = \mathrm{NTU}.\,\mathrm{U_L}(\mathrm{T}-\Theta)\ + \frac{1}{\mathrm{C_R}}\frac{\partial}{\partial\mathrm{x}}\left(\mathrm{k}_r\frac{\partial\Theta}{\partial\mathrm{x}}\right) \qquad \text{(II.16)}$$

Avec,

$$\Psi = \frac{\varepsilon\rho f\ cf}{(1-\varepsilon)\ \rho rcr} \qquad \text{(II.16)}$$

$$c_R = \frac{(1-\varepsilon)\ AL\rho rcr}{\tau P} \qquad \text{(II.17)}$$

$$k_{f=\frac{\varepsilon Akf}{L}} \quad \text{(II.18)}$$

$$K_r = \frac{(1-\varepsilon)\, Akr}{L} \quad \text{(II.19)}$$

II.3.3 Transfert de chaleur

La détermination de coefficient d'échange thermique par convection dépend de plusieurs paramètres : conductivité, viscosité, masse volumique, géométrie, vitesse, la géométrie, nombre de plaques, régime de l'écoulement, la position des plaques, nombre de Reynolds, Prandtl, Nusselt et le diamètre hydraulique de régénérateur etc. Généralement, ils existent plusieurs formules empiriques sont servis pour calculer d'une façon approximatif le coefficient d'échange par convection. Dans le cas des plaques en parallèles, pour calculer le coefficient d'échange par convection on utilise la relation suivante proposée par Bejan [33, 34] pour des écoulements laminaires :

$$Nu_f = 7.54 \quad \text{(II.20)}$$

$$h = \frac{K_f Nuf}{D_h} \quad \text{(II.21)}$$

Où les nombres adimensionnels qui caractérise l'écoulement sont définis comme suit ;

Le nombre de Reynolds :

$$R_{ef} = \frac{\rho f v Dh}{\mu f} \quad \text{(II.22)}$$

Le nombre de Prandtl :

$$Pr_f = \frac{cf\mu f}{kf} \quad \text{(II.23)}$$

Chapitre III :

Matériaux magnétocalorique

III.1. Introduction

Pour les applications de la réfrigération magnétique autour de la température ambiante, Le matériau doit présenter un effet magnétocalorique géant autour de cette température [35]. Les matériaux magnétocaloriques sont des matériaux qui présentent des changements de température significatifs lorsqu'ils sont soumis à un champ magnétique. Ce phénomène est connu sous le nom d'effet magnétocalorique EMC.

Les matériaux magnétocaloriques sont souvent utilisés dans les systèmes de réfrigération magnétique, où l'effet magnétocalorique est exploité pour créer un cycle de réfrigération. Ces systèmes offrent plusieurs avantages par rapport aux systèmes de réfrigération traditionnels, notamment une plus grande efficacité énergétique et une réduction de l'impact environnemental.

Certains des matériaux magnétocaloriques les plus couramment étudiés et utilisés comprennent les alliages de terres rares, tels que le gadolinium, ainsi que certains oxydes métalliques et les matériaux à base de fer. En raison de leurs propriétés uniques, les matériaux magnétocaloriques suscitent un intérêt croissant dans divers domaines, notamment la réfrigération, le chauffage, la conversion d'énergie et les applications médicales.

Dans cette recherche, nous concentrons sur l'étude de nouveaux matériaux pour le refroidissement magnétique, et parmi les alliages magnétocaloriques que nous avons choisis à cet effet se trouve l'alliage Heasler NiMnIn.

III.2. Matériaux magnétocalorique

Il existe de nombreux matériaux magnétocaloriques, que l'on classe en deux catégories : les matériaux du premier ordre qui présentent une aimantation qui évolue de façon brutale avec la température et les matériaux du second ordre pour lesquels la variation est plus douce [36]. Les matériaux du premier ordre conduisent donc à des variations d'entropie importantes mais sur une faible plage de température, comme illustré sur la FigureIII.1 .A l'inverse, les matériaux du second ordre ont des variations d'entropie plus faibles mais sur une large plage de température.

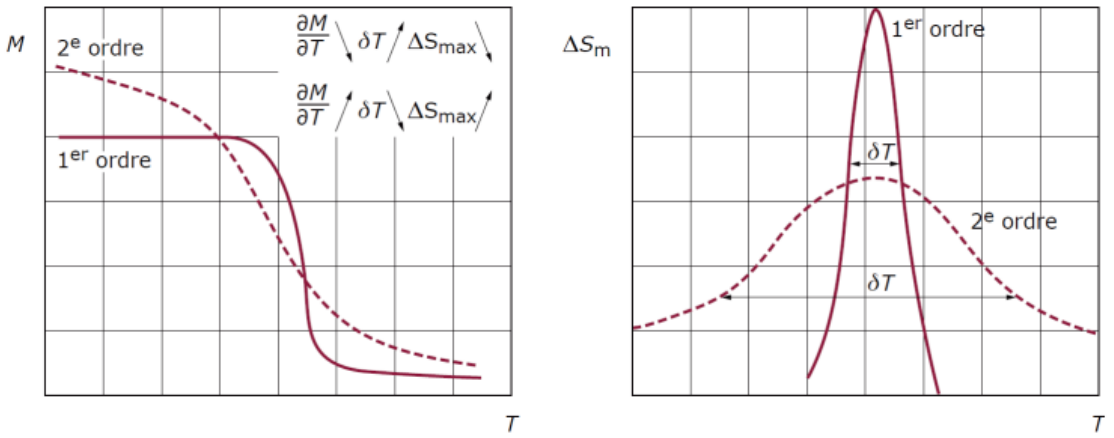


Figure III .1.Transition de phase et variation de l'entropie en fonction du type de matériau [36].

III.3. Principaux matériaux magnétocaloriques

Il existe un très grand nombre de matériaux magnétocaloriques qui ont été étudiés depuis la découverte de l'EMC géant. La revue écrite par Gschneidner Jr. et Pecharsky recense près de 200 matériaux [37]. Nous nous limiterons ici à présenter les matériaux les plus prometteurs pour des applications à température ambiante.

On distingue six grandes familles de matériaux magnétocaloriques [38] :

– Les métaux 3d et leurs alliages : Fe, Ni, Co, MnAs, MnP , MnCu, . . .

– Les oxydes : MnFeCrO, GdFeO, GdGaO, HoAlO, LaCaMnO, . . .

– Les composés intermétalliques : GdRh, TmCu, ErNi, LaFeSi, HoCo, . . .

– Les composés terres rares-métalloïdes : GdSb, PrCoSi, GdGeSi, . . .

– Les terres rares et leurs alliages : Gd, Dy, ErPr, . . .

– Les amorphes : GdFe, GdNi,FeZr, ...

Pour chaque famille de matériaux, il peut y avoir plusieurs stœchiométries différentes et plusieurs substitutions sont possibles. Ces modifications chimiques ont comme intérêt L'augmentation ou la diminution de la température de transition pour l'approcher de l'ambiante et l'augmentation de l'effet magnétocalorique [39]. Pour être intéressant un matériau magnétocalorique doit posséder plusieurs caractéristiques.

Tout d'abord le matériau doit présenter des propriétés magnétocaloriques intéressantes :

– une température de Curie *T*C proche de la température ambiante

– une grande variation d'entropie massique Δ*s* et de température Δ*T*ad pour des variations de champ modestes.

III.4.*Caractéristique les* matériaux à effet magnétocalorique

Les matériaux magnétocaloriques présentent des propriétés intéressantes liées à leur capacité à changer de température en réponse à un champ magnétique. Voici quelques-unes de leurs caractéristiques principales :

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

Le gadolinium (Gd), qui est un terre rare dont la température de curie est proche de l'ambiante (TC = 293K), répond à ces critères. Aujourd'hui c'est le matériau magnétique métallique (ferromagnétique) disponible à l'état pur qui possède un EMC convenable.

Il a été exploité pour la toute première fois, dans la réfrigération magnétique autour de la température ambiante par Brown en 1976 [10], Son EMC ou variation de température adiabatique est de l'ordre de 2 K/Tesla.

Même si une large gamme de matériaux avec un EMC géant existe déjà, la recherche et le développement de nouveaux matériaux magnétocaloriques est toujours active afin de les améliorer ou d'en créer d'autres. La plage de recherche pour des matériaux susceptibles d'être utilisés dans la réfrigération magnétique a été étendue.

Une liste de quelques matériaux à EMC géant autour de la température ambiante dans le tableau II.1

Tableau III.1 : Propriétés de certains matériaux magnétocaloriques

Matèriaux	Champ magnètique B (T)	ΔS max [J/kg.K]	ΔTad [k]	Tc[k]	rèfèrence
$Ni_{45}Co_5Mn_{38}Sb_{12}$	1	10	_	262	[40]
$Ni_{45}Co_5Mn_{38}Sb_{11}Ge$	1	15	_	275	[40]
Ni48Mn26Ga19.5Fe6.5	5	4.7	_	361	[41]
$Ni_{41}Co_9Mn_{32}Al_{18}$	1	2.1	_	300	[42]
$Ni_{1.9}Co_{0.2}Mn_{0.9}$ Ga	1	0.3	_	160	[43]
$Ni_{47}Mn_{38}Fe_2In_{13}$	5	22.3	_	298	[43]
$Mn_{39.5}Fe_{8.5}Ni_{41}Sn_{11}$	1.4	1.02	_	305	[44]
$Ni_{43}Mn_{46}Sn_{11}$	1	6.4	_	200	[45]
Ni43Mn46Sn10Ga	1	9.9	_	230	[45]
$Ni_{49.9}Mn_{35.3}In_{14.8}$	2	16.5	3.7	287	[46]
$Ni_{49.9}Mn_{37.3}In_{12.8}$ Fe_2	2	15	3.5	282	[46]
Ni44Mn44Sn11Fe	2	10	_	267	[47]
Fe_2CoAl	2	2.65	_	830	[48]
$Ni_{44}Co_6Mn_{37}In_{13}$	1	1.8	_	308	[49]
$Ni_{50}Mn_{18.5}Ga_{25}Cu_{6.5}$	1.8	1.15	1.6	307	[50]
Ni_2MnGa	0 .25	0.3	0.24	380	[51]
Ni $_{43}$Mn $_{46}$$Sn_{10}$Te	1	4.17	_	289	[52]
$Ni_{47}Mn_{39}CuIn_{13}$	1	3.2	_	249	[53]
$Mn_{49}CrNi_{36}Fe_4Ti_{10}$	2	0.13	_	310	[54]
$Ni_{45}Co_5Mn_{36.7}In_{10.3}Ge_3$	1.96	9.8	1.5	303	[55]
$LaFe_{11.0}Si_{1.5}$ $Ni_{0.5}$	2	8.5	_	200	[56]
Co_2CrAl	4	1 .4	11	328	[57]
$Ni_{35}Co_{15}Mn_{35}Ti_{15}$	1.5	13	_	150	[58]
$Fe_{30}Cr_{45}V_{25}$	7	0.89	_	300	[59]
$Co_2Cr_{0.75}Mn_{0.25}Al$	9	1.90	_	500	[59]
$V_{0.85}FeCoNiCu_{1.15}$	5	0.75	_	329	[59]
Fe_2CrAl	7	1.19	_	313	[59]
AlCrFeCoNiCu	5	0.53	_	295	[59]
FeCoNiCrAl	7	0.67	_	290	[59]
La (Fe, Co, Si)$_{13}$	*1.5*	3.2	1.5	290	[60]

III.5. Caractéristiques Des Matériaux constituant l'alliage Half-Heusler NiMnIn

III.5.1.Le Nickel (Ni)

Par description : le Nickel est un métal argenté brillant, dur et malléable.

Le nickel se trouve dans le tableau périodique des éléments chimique est Ni, et son numéro atomique est 28.il appartient au groupe 10 et à la période 4 du tableau périodique .Le nickel est un métal de transition est un classé parmi les métaux de transition du bloc d dans le tableau périodique.

Le nickel est un métal qui possédé plusieurs caractéristique intéressantes :

1) Résistance à la corrosion : le nickel est résistant à la corrosion, ce qui le rend utile dans de nombreuses applications, notamment dans la fabrication de pièces exposées à des environnements corrosifs.

2) Haut conductivités électrique : Le nickel est un bon conducteur d'électricité, ce qui le rend précieux dans les applications électriques et électroniques.

3) Magnétisme : Le nickel est ferromagnétique à température ambiante, ce qui signifie qu'il est attiré par un aimant et peut être utilisé dans des applications magnétiques.

Le nickel(Ni28) est l'un des quatre éléments qui sont ferromagnétiques au voisinage de la température ambiante, les trois autres étant le fer, le cobalt et le gadolinium.

4) Température de fusion élevée : Le nickel a une température de fusion relativement élevée, ce qui le rend utile dans les applications à haute température, telles que les alliages utilisés dans les turbines à gaz.

5) Souplesse : le nickel est malléable et ductile ce qui signifie qu'il peut être facilement formé en déférentes formes sans se casser, ce qui le rend utile dans la fabrication de divers produits

III.5.2.Le manganèse (Mn)

Par description : Le manganèse est un métal gris-blanc avec une texture semblable au fer.

Le manganèse est un élément chimique qui se trouve dans le tableau périodique. Son symbole chimique est(Mn) est son numéro atomique est 25.Il se situe dans la quatrième

Période et dans le septième groupe, également connu sous le nom de groupe 7B, dans le tableau périodique. Le manganèse est classé comme un métal de transition.

Le manganèse : est un métal qui possédé plusieurs caractéristique intéressantes :

1) Résistance à la corrosion: Le manganèse résiste relativement bien à la corrosion, ce qui en fait un matériau adapté à une utilisation dans des environnements corrosifs.

2) Durabilité : Il est relativement dur et résistant, ce qui le rend utile dans les applications où la résistance à l`usure est nécessaire.
3) Malléabilité : Bien qu`il soit dur, le manganèse reste malléable, ce qui signifie qu`il peut être formé en différents formes sans se fissurer.
4) Conductivité électrique : Le manganèse est conducteur électrique modéré, ce qui le rend utile dans certaines applications électriques.
5) Effets mécanique: Le manganèse peut améliorer les propriétés d`autres métaux lorsqu`il est utilisé comme élément d`alliage, par exemple en augmentant la dureté et la ténacité.

III.5.3.L`indium (In)

Par description : L`indium est un élément métallique de couleur blanche argentée.

L`indium se trouve dans le tableau périodique des éléments chimiques. Son symbole chimique est in et son numéro atomique est 49.Il appartient à la période 5 et au groupe 13, également connu sous le nom de groupe du bore en référence à l'élément Boron ,dans le tableau périodique. L`indium est classé comme un métal pauvre.

L`indium: est un métal qui possédé plusieurs caractéristique intéressantes :

1) Facilité de mise en forme : l`indium peut être facilement façonne, ce qui le rend utile dans les processus de fabrication nécessitant la mise en forme du métal.
2) Faible point de fusion : L`indium a un point de fusion bas, ce qui signifie qu'il peut être fondu facilement à des températures relativement basses.
3) Conductivité électrique modérée : L`indium présente une conductivité électrique modérée, ce qui le rend utile dans certaines applications électroniques.
4) Bonne stabilité chimique : L`indium est chimiquement stable vis-à-vis de nombreux composés, ce qui le rend utile dans certaines applications industrielles.

III.6.Les alliages d'Heusler

II.6.1. Histoire

Les alliages Heusler sont connus depuis plus de 100 ans [61,62], exactement en 1903 quand l'ingénieur Fritz Heusler découvre au cour de son travail sur un alliage d'une formule de type Cu2MnAl, que ce matériau se comporte comme un matériau ferromagnétique malgré que ses

éléments constitutifs ne sont pas des matériaux magnétiques [63-64] et cette découverte donne la naissance d'une nouvelle catégorie des matériaux les plus attirants.

La formule générale des alliages d'Heusler est X2YZ. [65-66]Généralement les métaux de transition sont X et Y, et l'élément du groupe III, IV, V dans le tableau périodique représente Z. Rarement, l'élément Y est remplacé par un élément des terres rares ou par un métal alcalinoterreux.

L'emplacement de l'atome double X, se situe toujours en début de la formule, par contre L'atome Z des groupes III, IV, V, est placé à la fin de celle-ci par exemple Co2MnSi.

III.6.2 Les alliages Half-Heusler

La composition chimique de la forme XYZ concerne les alliages Half-Heusler qui peuvent être considérés en tant que composés formés de deux parties différentes, l'une est appelée covalente et l'autre ionique. Les atomes X et Y possèdent un caractère cationique différant, par contre Z est compris comme l'équivalent anionique [67].

D'une façon aléatoire ou par ordre alphabétique on peut procéder à la trie des éléments selon leur électronégativité, finalement les trois permutations sont possibles à trouver. En début de la formule, on trouve l'élément le plus électropositif, provenant d'un groupe principal, un métal de transition ou un élément de terre rares, Alors qu'en fin de formule se trouve l'élément le plus électronégatif, celui-ci provient également d'un groupe principal mais de la seule moitié de la classification périodique [68-69].

III.7.Structure cristalline des alliages Half-Heusler

Les alliages Half-Heusler avec une stoechiométrie (1 :1 :1) et une formule générale XYZ se cristallisent dans une structure cubique non-centro symétrique C1b qui appartient au groupe d'espace (F-43m N° 216) [70].

En général, la structure des Half-Heusler est caractérisée par l'interpénétration de trois Sous-réseaux cubique à faces centrées (cfc), [71-72] elle est décrite selon le prototype MgAgAs, où les atomes X et Y forment une maille de type NaCl et les éléments Y et Z construisent un sous réseau de type ZnS [73]. Mai réellement, ce prototype ne s'accorde pas avec la majorité des alliages Half-Heuslers [74] qui s'arrange selon le composé MgCuSb [75, 76], où les éléments Y et Z forment un sous réseau covalent de type ZnS [77-78]. alors que les éléments X les plus électropositifs et Y les plus électronégatifs forment une maille de type NaCl. La structure des Half-Heusler est représentée dans la (figure III.2) [79].

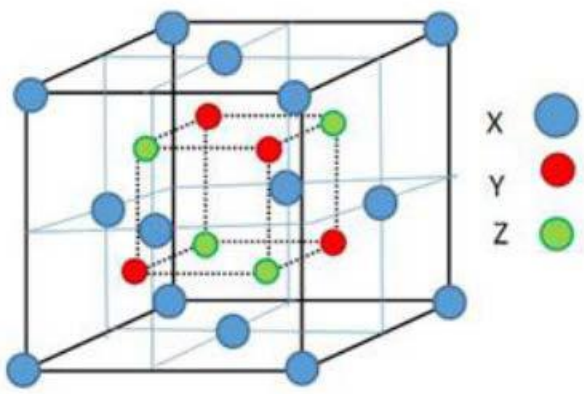


Figure III .2.Structure cristalline des alliages Half-Heusler [79].

II.8. Simulation Numérique

En quelques décennies, les simulations numériques sont devenues un outil privilégié d'investigation dans les sciences et les technologies. Elles ont pour but de reproduire par le calcul effectué sur un ordinateur, le comportement d'un système décrit par un modèle très souvent constitué d'équations aux dérivées partielles. Ces équations correspondent à la traduction mathématique de lois scientifiques. L'essor des simulations numériques renforce donc la nécessité de l'étude mathématique (analyse) de ces équations et de leur résolution numérique.

Les simulations numériques sont rapidement devenues incontournables pour la modélisation des systèmes naturels en physique, chimie et biologie, mais également des systèmes humains en économie et en science sociale. Elles peuvent offrir un aperçu sur le développement d'un système trop complexe pour simuler avec de simples formules mathématiques. Il n'y a qu'un pas donc entre équations et codes de simulation : le codage, appelé « discrétisation des équations ». Cette opération traduit les équations en langage informatique, le seul que comprenne l'ordinateur. Simuler l'état de l'objet, c'est donc déterminer les valeurs numériques des paramètres en tout point.

La simulation numérique est la troisième forme d'étude des phénomènes, après la théorie et l'expérience, Les simulations quantiques permettent aujourd'hui d'explorer les propriétés structurales, électroniques et dynamiques de la matière sans connaissance expérimentale a priori des systèmes étudiés. Ce qui permet maintenant d'affronter plusieurs domaines et de calculer à l'aide des principes ab-initio avec des précisions croissantes.

III.8.1.Code CASTEP « Cambridge Serial Total Energy Package »

CASTEP est un programme basé sur la mécanique quantique conçu spécifiquement pour la science des matériaux à l'état solide. CASTEP utilise la méthode pseudo potentielle à ondes planes de la théorie fonctionnelle de la densité, qui vous permet d'effectuer des calculs de mécanique quantique de principes fondamentaux qui explorent les propriétés des cristaux et des surfaces dans des matériaux. CASTEP permet d'optimiser une structure en réduisant son énergie. La position des atomes est modifiée autour de leur position initiale en leur appliquant une force et l'énergie de la nouvelle configuration calculée, cela plusieurs fois jusqu'à atteindre le seuil de convergence fixé. Il est également possible de libérer les paramètres de maille (vecteurs de maille et volume de la cellule).

III.8.2. Définition le code de simulation Mstudio Mindlab

Mindlab est le premier logiciel scientifique pour les systèmes Windows qui effectue des calculs de structure électronique des solides. Ce programme est crié par une collaboration de « Université de Californie, Davis », « Physical Institute, Moscow » et «Department of Physics, New Jersey Institute of Technology».

III.8.2. Définition MATLAB

MATLAB (MATrix LABoratory) est un environnement de développement et un langage de programmation haut niveau largement utilisé pour les calculs numériques, la modélisation, la simulation et l'analyse de données. Développé par MathWorks, MATLAB est particulièrement apprécié dans les domaines de l'ingénierie, des sciences, de l'économie et de la finance pour sa capacité à manipuler des matrices, son vaste ensemble de fonctions mathématiques et ses outils de visualisation avancés.

Le cycle AMR (Active Magnetic Regenerator) est une méthode utilisée dans la réfrigération magnétique pour transférer de la chaleur en utilisant des matériaux magnétocaloriques. Dans le contexte de MATLAB, cela implique la simulation des changements thermodynamiques que subit un matériau magnétocalorique, tel que le NiMnIn, lorsqu'il est exposé à des variations de champ magnétique.

Dans ce mémoire, nous avons modélisé le cycle AMR dans MATLAB pour NiMnIn, qui est une simulation des effets thermodynamiques de ce matériau lorsqu'il subit un cycle d'aimantation et de démagnétisation. Cela inclut la modélisation des températures et des changements d'entropie, ainsi que le transfert de chaleur associé, pour évaluer les performances de ce matériau dans un système de réfrigération magnétique.

CHAPITRE IV :

Résultats et discussions

IV.1. Introduction

Une compréhension approfondie des propriétés structurelles et électroniques des alliages Heusler nécessite une étude et une connaissance complètes de l'environnement physique qui est le siège du mouvement des porteurs de charge, c'est-à-dire une connaissance de la manière dont les atomes sont placés et disposés. À l'heure actuelle, la connaissance des propriétés structurelles des matériaux revêt une importance primordiale dans les calculs de diverses propriétés. Le premier objectif de cette thèse est d'étudier les propriétés électroniques des composés XYZ Half-Heusler (NiMnIn). Le deuxième objectif est nous avons modélisé le cycle AMR via MATLAB pour le matériau NiMnIn, qui est une simulation des effets thermodynamiques de ce matériau lorsqu'il subit un cycle d'aimantation et de démagnétisation. Cela inclut la modélisation des températures et des changements d'entropie, ainsi que le transfert de chaleur associé, pour évaluer les performances de ce matériau dans un système de réfrigération magnétique.

IV.2 Applications aux alliages ternaires

IV.2.1. Structure cristalline des composés ternaires

Les alliages Half-Heusler (alliages ternaire) ont une formule de XYZ, avec trois arrangements possibles de type I, type II, type III.

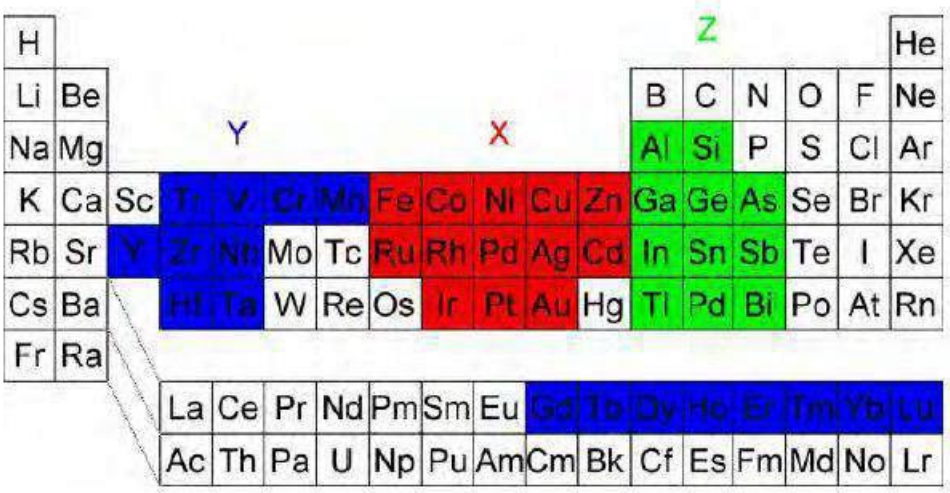


Figure IV.1. Tableau périodique des éléments

Les éléments X en rouge, Y en bleu et Z en vert. Un grand nombre d'alliages Heusler est possible d'être formé par la combinaison des différents éléments indiqués au tableau.

Le composé chimique NiMnIn est un exemple de composé ternaire, composé de trois éléments chimiques ; le nickel (Ni), le manganèse (Mn) et l'indium (In). Ce composé appartient à une classe de matériaux appelée les alliages à mémoire de forme.

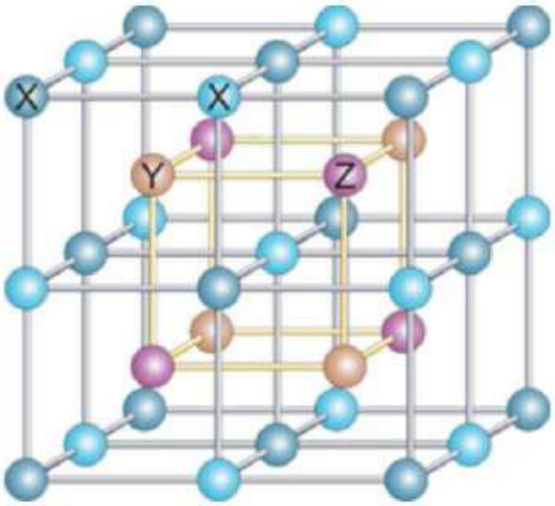


Figure IV.2 : Structure Heusler ternaire

IV.2.2. Structure cristalline des composés NiMnIn :

Les alliages Half-Heusler (alliages ternaire) ont une formule de XYZ. Dans ce travail X est Ni, Y est Mn, Z est In. Les composés NiMnIn se cristallisent dans une structure cubique à faces centrée.

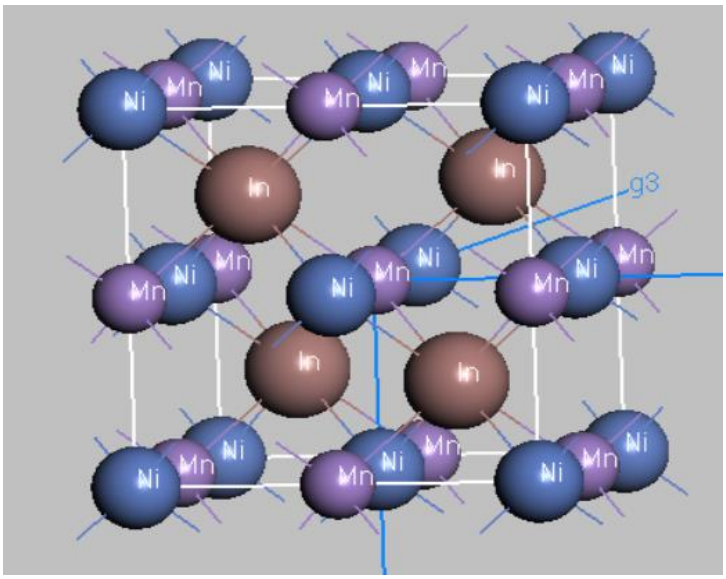


Figure IV.3. La structure Heusler Ternaire NiMnIn

Détail de calcul

Les propriétés physico-chimiques sont calculées par une méthode ab-initio basée sur calcul DFT (Density Functional Theory) utilisant la méthode des orbitales Muffin-Tin alinéatisées (FP-LMTO) basés sur les ondes planes alinéatisées implémentée dans le code MStudio-Mindlab. De même, en utilisant une approximation graphique pour étudier d'une part, la phase la plus stable, Ou nous avons optimisé la cellule primitive pour NiMnIn et d'autre part pour décrire le potentiel d'échange et corrélation, et ceci pour des systèmes faiblement corrélés.

Paramètre d'entrée

Les données d'entrées dans un calcul DFT sont indispensables pour l'utilisation du logiciel CASTEP. Généralement ces données sont :

1- Eléments dans le matériau.

2- Système cristallin du réseau de bravais (groupe d'espace).

3- Constante de la maille.

4- Positions atomiques : Ni (0 ;0 ;0) ,Mn(1/2 ;1/2 ;1/2) ,In (3/4 ;3/4 ;3/4)

On regroupe ces paramètres d'entrée dans le tableau IV.1.

Tableau IV.1.paramètres d'entrée pour le composé NiMnIn, Constante de la maille, groupe d'espace, numéro atomique et l'état de valence

Composé	Paramètre de la maille	Angle	Groupe d'espace	Nombre atomique	Etat de valence
Ni	a_0=5.973	α=ß=Ɣ=90°	216 F-43M	Ni=28	[Ar] $3d^8$ $4s^2$
Mn	a_0=5.973	α=ß=Ɣ=90°	216 F-43M	Mn=25	[Ar] $3d^5$ $4s^2$
In	a_0=5.973	α=ß=Ɣ=90°	216 F-43M	In=49	[Kr] $4d^{10}$ $5s^2$ $5p^6$ $6s^2$ $6p^1$

IV.3 propriétés structurales

La première étape importante dans un calcul ab-initio est la détermination des propriétés

IV.3.1.Optimisation des propriétés NiMnIn :

Le calcul des propriétés structurales est la première et la fondamentale étape qu'on doit faire dans tout calcul théorique. Ce calcul nous permet d'optimiser les grandeurs nécessaires aux calculs des autres propriétés : électroniques, thermiques…etc. On commence par le calcul de l'énergie totale d'une façon auto cohérente. Les propriétés structurales sont obtenues par minimisation de l´énergie totale dépendante du volume de composé NiMnIn dans la phase

cubique à faces centrés. Le cycle d'optimisation est reproduit jusqu'à ce que la convergence soit atteinte. La constante du paramètre de maille $a0$, le module de compressibilité $B0$ et sa dérivée B', sont obtenues par ajustement non linéaire de l´énergie totale en fonction du volume selon l´équation de Birch Murnaghan.

$$E(V) = E_0 + \frac{B'}{B'(B'+1)}\left[V\left(\frac{V_0}{V}\right)^{B'} - V_0\right] + \frac{B_0}{B'}(V - V_0)$$

Cette équation est utilisée pour ajuster les données calculées et obtenir une courbe d'énergie en fonction du volume, permettant ainsi de déterminer les propriétés élastiques et volumétriques du matériau à l'état d'équilibre.

Avec E : l'énergie totale, E_0: l'énergie de l'état fondamental, B : module de compression, B': dérivée première du module de compression, V : volume de la maille et V_0 : volume de la maille à l`état d`équilibre.

- **Utilisation de code MStudio:**

On a a_0 =5,973 A°

On divise cette valeur sur 0.52 pour avoir le paramètre (a_0) en unité atomique donc

a_0 =11,48 UA

pour chaque valeur de (a) on obtient E0 et V0 (cell vol)

Tableau IV.2.Variation de l'énergie totale en fonction du volume

A	E_0	V_0
a4'=10.592	-17105.758	247.607
a3'=10.809	-17105.815	263.472
a2'=11.03	-17105.86	279.596
a1'=11.256	-17105.89	297.08
a0= 11 .486	-17105.902	315.716
a1=11.715	-17105.429	335.479
a2=11.949	-17105.893	356.526
a3=12.187	-17105.875	378.831
a4=12.43	-17105.453	401.945

Les différentes mesures des énergies sont représenté en fonction du volume de la cellule à chaque valeur ai et la représentation de la variation de l'énergie en fonction du volume est présenté dans la figure IV.4 :

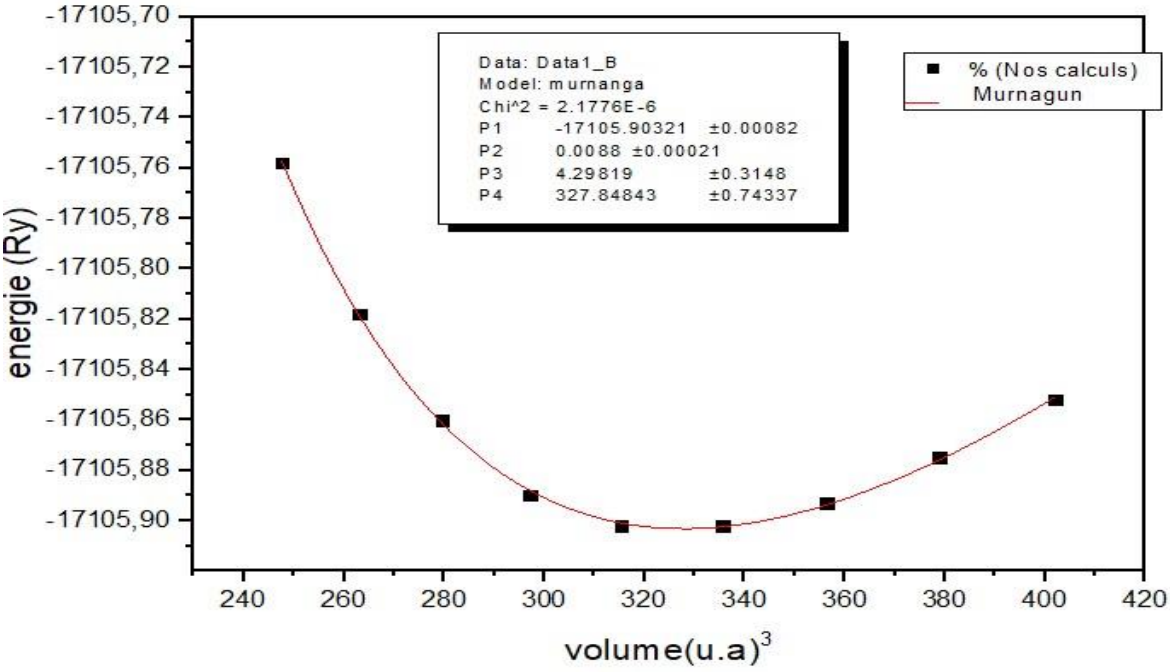


Figure IV.4: Optimisation de l'énergie totale en fonction du volume obtenu par Les approximations LSDA

Le volume à l'équilibre est donné par le minimum de la courbe E(V). La courbe de l'optimisation de l'énergie totale en fonction du volume obtenu en utilisant les approximations LSDA (Local Spin Density Approximation) permettre de définir les paramètres P1, P2, P3, P4 qui définit successivement : E0 (unit cell), B0, B' prime, V0 (unit cell)

On a trouvé :

P1= -17481.90321 ± 0.00065

P2= 0.0088 ± 0.00021

P3= 4.29819 ± 0.3148

P4=327.84843 ± 0.742337

On prend :

P1 =E0 = 17105.90321

P4 = V0 (unit cell) = 327.84843

a0 = $\sqrt[3]{4 * V0}$ = 10.945 UA

P2 = B = 0.0088 ∗147.031∗100 = 129,38728

P3 = B’ = 4.29819

Dans le tableau IV.3, nos résultats d´optimisation de structure du NiMnIn par les approximations LSDA sont récapitulés. La constante de réseau obtenue est inférieure de 2 % de la valeur Tableau IV.2 expérimentale 5,76 °A.

Tableau IV.3 La constante de réseau d’équilibre $a0$, volume$V0$, l’énergie$E0$, le module structure B du composé full Heusler NiMnIn.

a_0	V_0 (a.u. 3)	B(Gpa)	B’	E_0 (RY)
5,76 °A	327.84843	129,38728	4.29819	17105.90321

IV.3.2. Propriétés électroniques

L’étude des propriétés électroniques prennent une place très importante parce qu’elles nous permettent d’analyser et de comprendre la nature des liaisons qui se forment entre les différents éléments de ce matériau. La structure de bande électronique décrit les niveaux d'énergie des électrons dans un matériau. Pour NiMnIn, un alliage composé de nickel (Ni), de manganèse (Mn) et d'indium (In), l'étude de la structure de bande permet de déterminer si le matériau est métallique, semi-conducteur ou isolant. Cela aide les chercheurs à déterminer les caractéristiques électroniques et à concevoir des matériaux avec des propriétés spécifiques. Dans les solides, les orbitales des atomes se combinent pour former des bandes électroniques. La structure de bande d'un matériau décrit les niveaux d'énergie des électrons. Nous avons calculé les bandes d’énergie dans les composés NiMnIn le long des lignes de hautes symétries de la première Zone de Brillouin, nous avons injecté les paramètres structuraux trouvés auparavant en utilisant les approximations LSDA dans le type le plus stable.

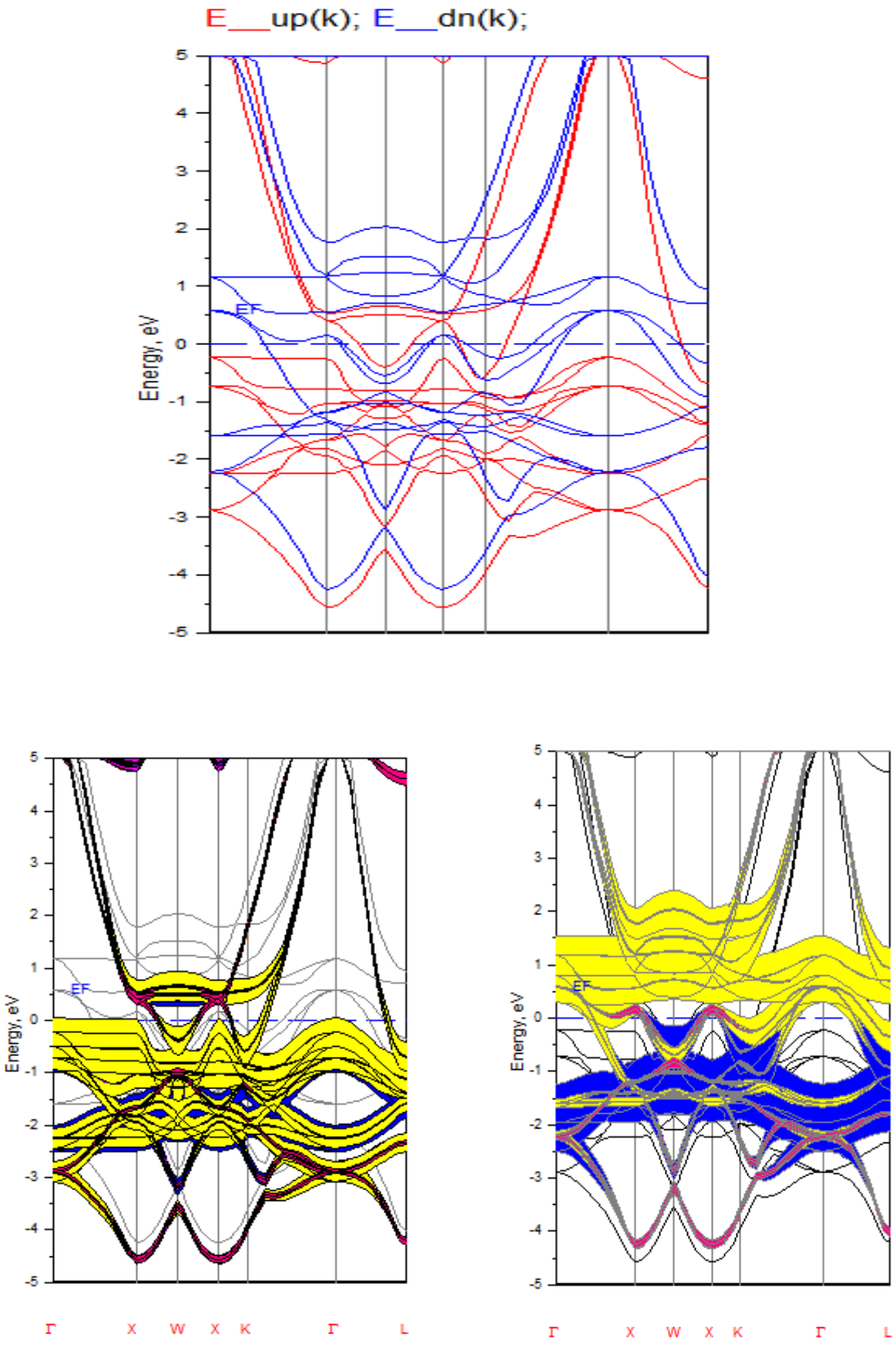


Figure IV.5.La structure des bandes du composé NiMnIn

La structure de bandes électronique du composé NiMnIn montre les relations entre l'énergie et la quasi-impulsion pour différentes bandes électroniques dans le matériau. Voici une analyse simple de la structure de bandes présentée :

Description de la figure IV.5 :

- L'axe vertical représente l'énergie en eV et l'axe horizontal montre les points de symétrie dans la zone de Brillouin (Γ, X, W, K, L).La ligne horizontale marquée "E_F" représente le niveau de Fermi, qui est l'énergie chimique des électrons à température zéro.

Bandes de spin

- Les courbes rouges représentent les bandes de spin "up" (↑).
- Les courbes bleues représentent les bandes de spin "down" (↓).

Couleurs des bandes

- Noir : Bandes d'énergie .Jaune : les contributions des atomes de Ni.
- Bleu : contributions des atomes de Mn.
- Rose : contributions des atomes In

Les différences de structure de bandes entre les spins up et down montrent que NiMnIn possède des propriétés magnétiques significatives. Cela est crucial pour l'effet magnétocalorique. La présence de bandes traversant le niveau de Fermi indique une bonne conductivité. Les matériaux conducteurs peuvent souvent transférer efficacement la chaleur, ce qui est bénéfique pour les applications de refroidissement. Les contributions spécifiques des atomes de Ni, Mn, et In aux bandes électroniques suggèrent que chaque élément joue un rôle dans les propriétés globales du matériau.

IV.4 Propriétés magnétiques de matériau magnétocalorique NiMnIn :

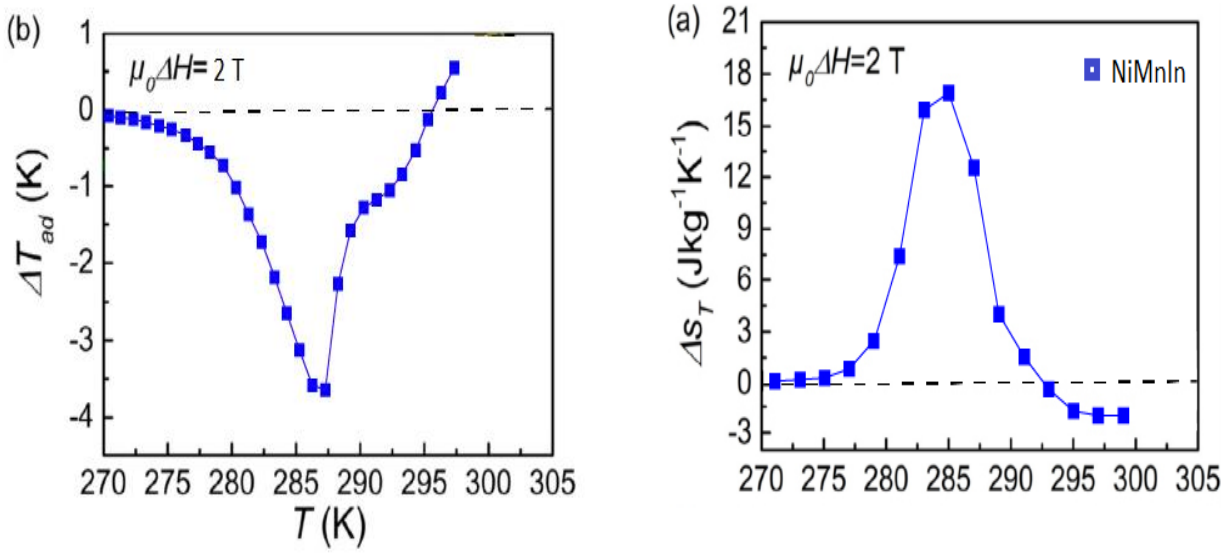


Figure IV.6.Évolution de la température adiabatique ΔTad (b) et de l'entropie magnétique ΔST (a) en fonction de température pour le NiMnIn sous le champ magnétique 2T. [46]

La variation maximale d'entropie magnétique ΔSM et la variation de température adiabatique ΔT_{ad} sont deux critères importants pour juger des propriétés magnétocaloriques d'un matériau. Les deux courbes montrent la variation adiabatique de température (ΔTad) et la variation isotherme d'entropie magnétique (ΔSM) d'un NiMnIn placé dans un champ magnétique 2T

À la température de Curie 287K, un changement de température adiabatique de -3.7 K et un changement d'entropie isotherme de 16 J/kg .K ont été obtenus dans 2 T.

IV.5 Modélisation numérique de cycle de réfrigération magnétique active (AMR)

La simulation numérique du cycle de réfrigération magnétique active a été effectué à travers de la résolution de l'équation de l'énergie pour le fluide caloporteur et le matériau solide caractérisé précédemment. Les équations de l'énergie sont discrétisés via la méthode des différences fines schéma implicite. Les performances du système de réfrigération sont étudié à travers des grandeurs ; puissance frigorifique, écart de température et le coefficient de performance.

Pour déterminer la puissance frigorifique Q_F, Nous avons appliqué une charge thermique à la source froide T_F=286 K. La simulation numérique a été effectuée sous les conditions présentées dans le tableau (IV.4)

Tableau IV.4. Données de la simulation numérique

Paramètre	Valeur
Débit massique du fluide	0.01 kg/s
Champ magnétique	2 T
Température de la source froide	286 K
Fréquence du cycle	1 Hz

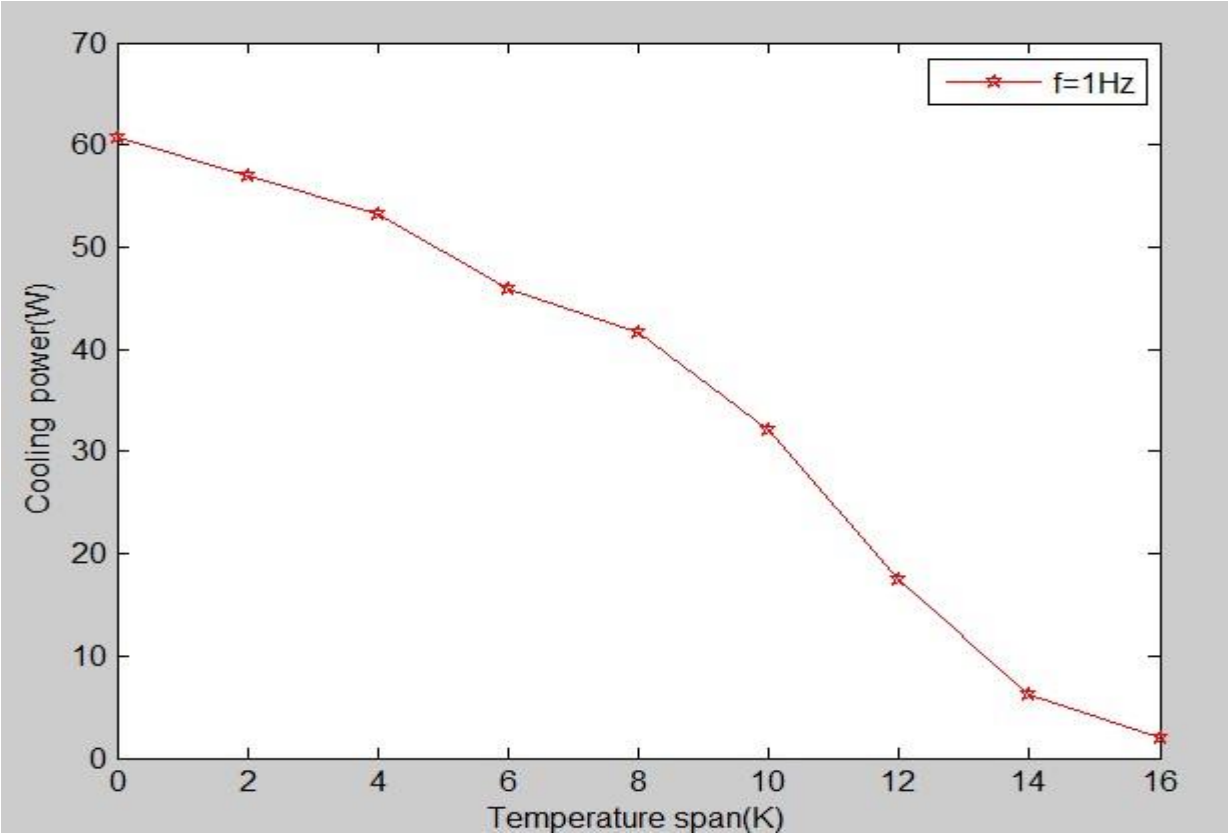


Figure IV.7. Évolution de la puissance frigorifique Q_F en fonction de span de température

La figure IV.7 illustre la variation de la puissance frigorifique en fonction de l'écart de température. La puissance frigorifique a montré un comportement linéaire décroissant en fonction de l'écart de températures span ΔT. Du point de vue thermodynamique, ce comportement est tout à fait raisonnable puisque le degré d'irréversibilité d'un cycle est proportionnel aux écarts de températures résultant. Si le span de température est trop élevé,

les gradients de température peuvent devenir insuffisants pour permettre un transfert de chaleur efficace, réduisant ainsi la puissance frigorifique. Un span de température optimal permet un échange de chaleur efficace entre le matériau magnétocalorique et le fluide caloporteur. Comme prédit la courbe de la puissance froide Q_F, est décroissante et varie presque linéairement.

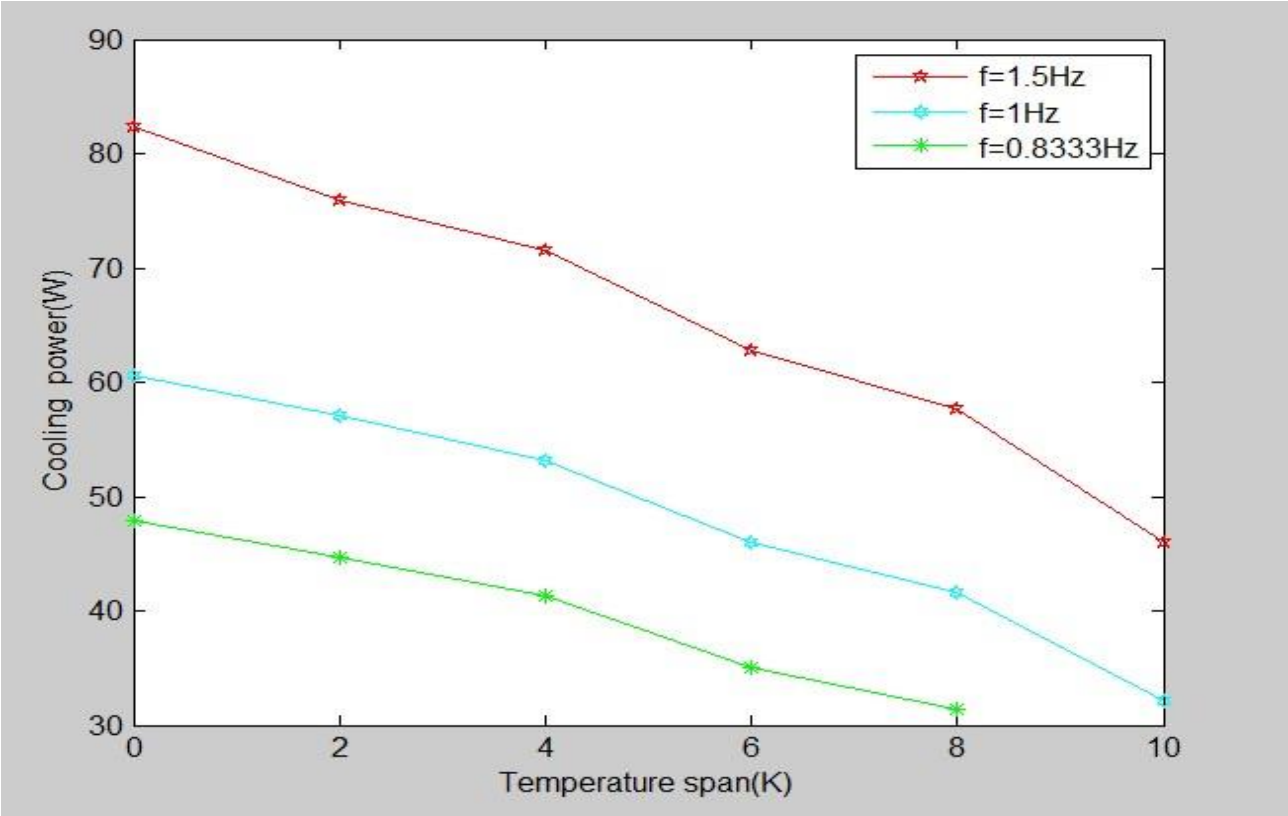


Figure IV.8. Variation de la puissance frigorifique en fonction de l'écart de température pour différents valeurs de la fréquence.

On remarque que la puissance froide augmente lorsque la fréquence augmente et diminuer lorsque la fréquence diminuer. Dans la pratique cette propriété est la limite par les fuites du liquide colporteur, vu que les fuites augmentent avec l'augmentation de la fréquence.

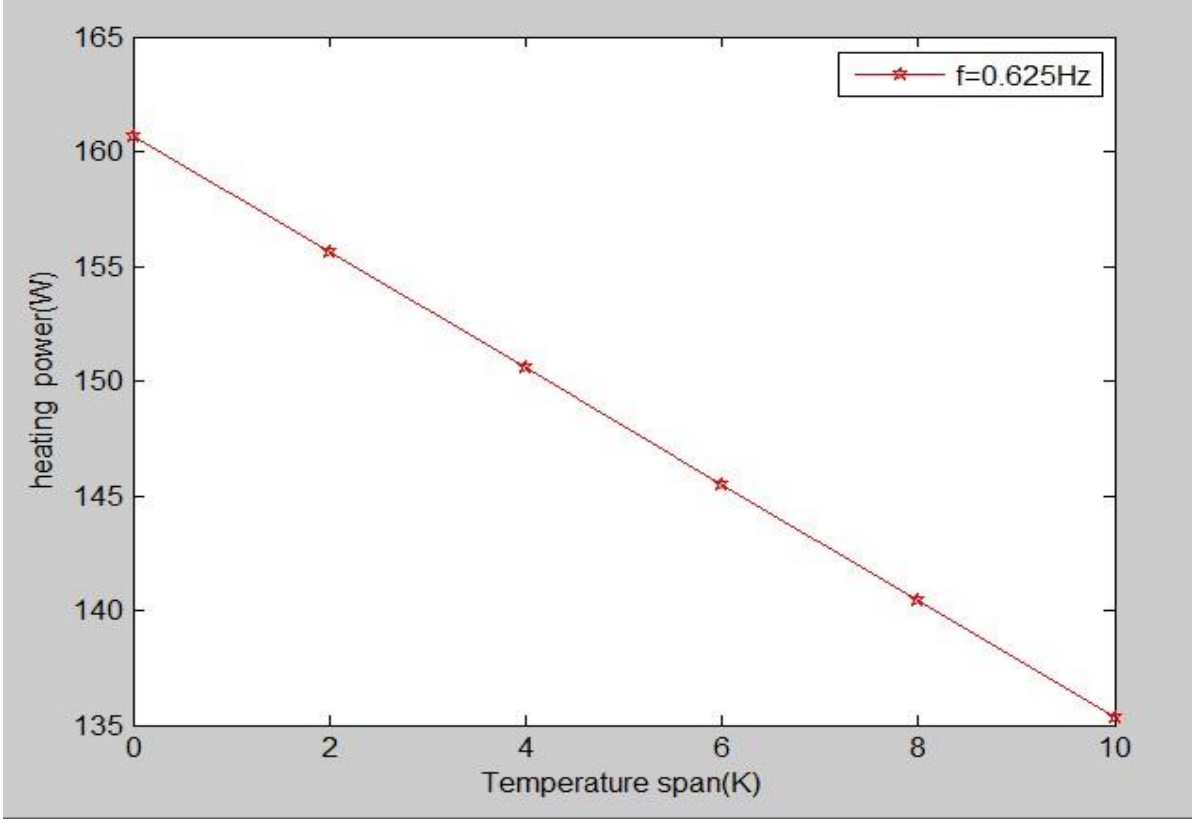


Figure IV.9. Variation de la puissance de la source chaude en fonction de l'écart de température

La figure IV.9 représente la variation de la puissance chaude en fonction de l'écart de température on remarque que la puissance chaude décroit a fur et à mesure que l'écart de température augmente. La puissance chaude est légèrement supérieure à la puissance froide pour la même fréquence.

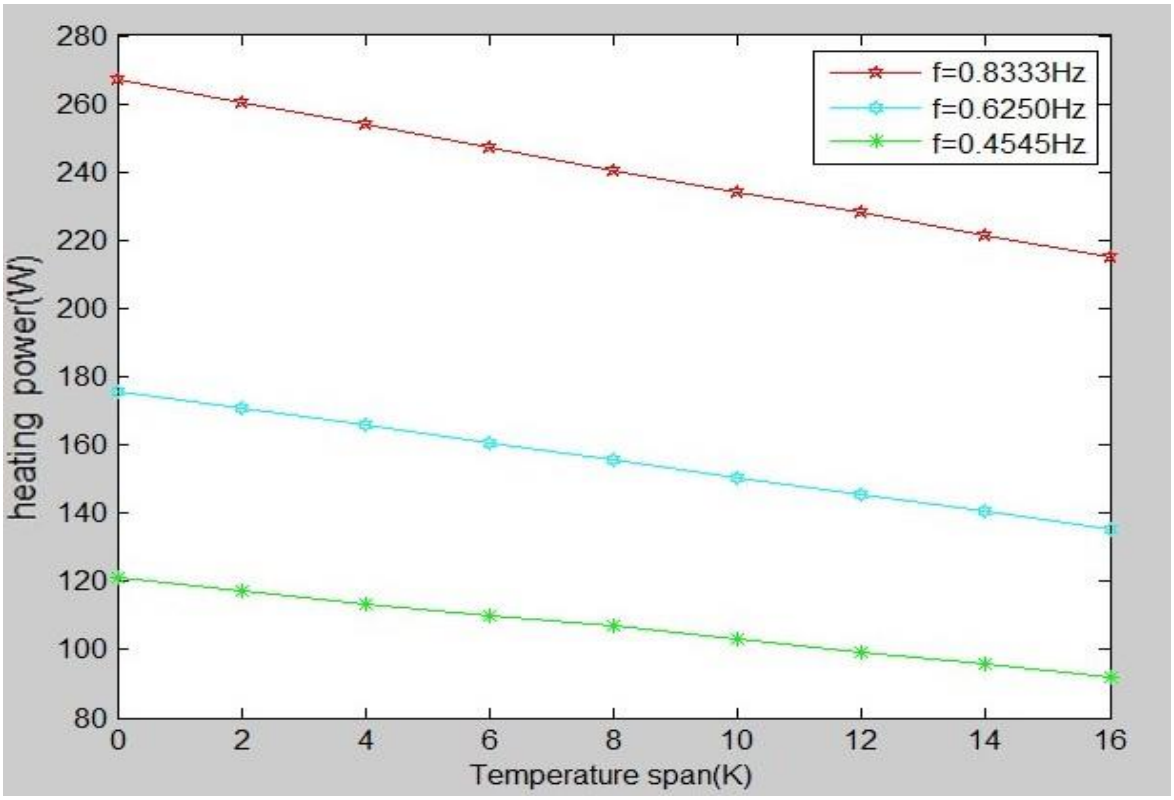


Figure IV.10. Variation de la puissance de la source chaude en fonction du span pour des différentes valeurs de la fréquence du cycle.

La Figure IV.10 représente la variation de la puissance de la source chaude en fonction de l'écart de température pour des fréquences différentes, on remarque que la courbe de puissance chaude se décale vers le haut lorsque la fréquence augmente et se décale vers le bas lorsque la fréquence diminue.

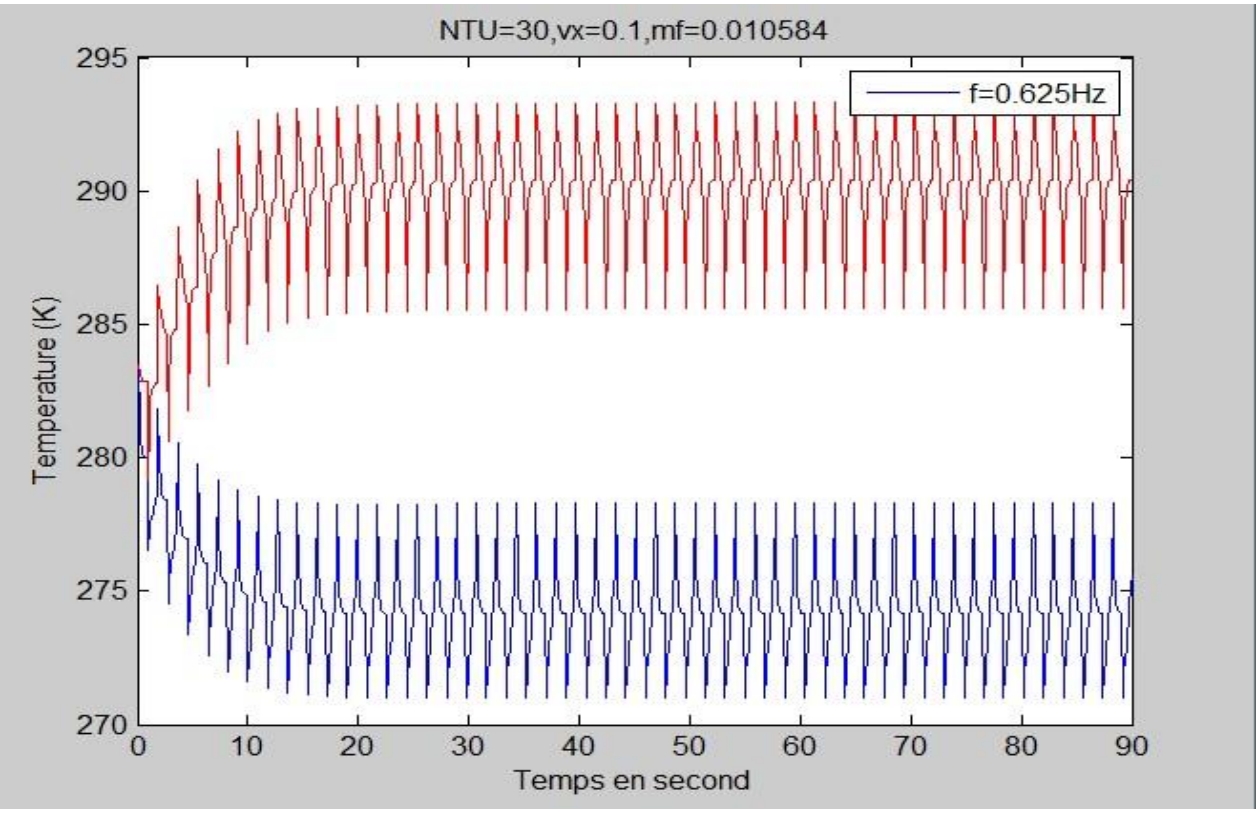


Figure IV.11. Évolution temporelle des températures aux extrémités du solide.

La température initiale pour tout le système est prise égale à T_0=280K, après un régime transitoire la température moyenne sur un cycle devienne constante aux extrémités du solide. La température moyenne du solide au point (x=0) devient égale à T_S= 275K lorsque le régime permanant est atteint. La température moyenne du solide au point(x=L) devient égale à T_S= 290K lorsque le régime permanant est atteint.

Pour améliorer l'écart de température entre la source chaude et la source froide, une variation des fréquences de cycle a été effectuée comme illustrés dans les figures IV.12, IV.13 et IV.14.

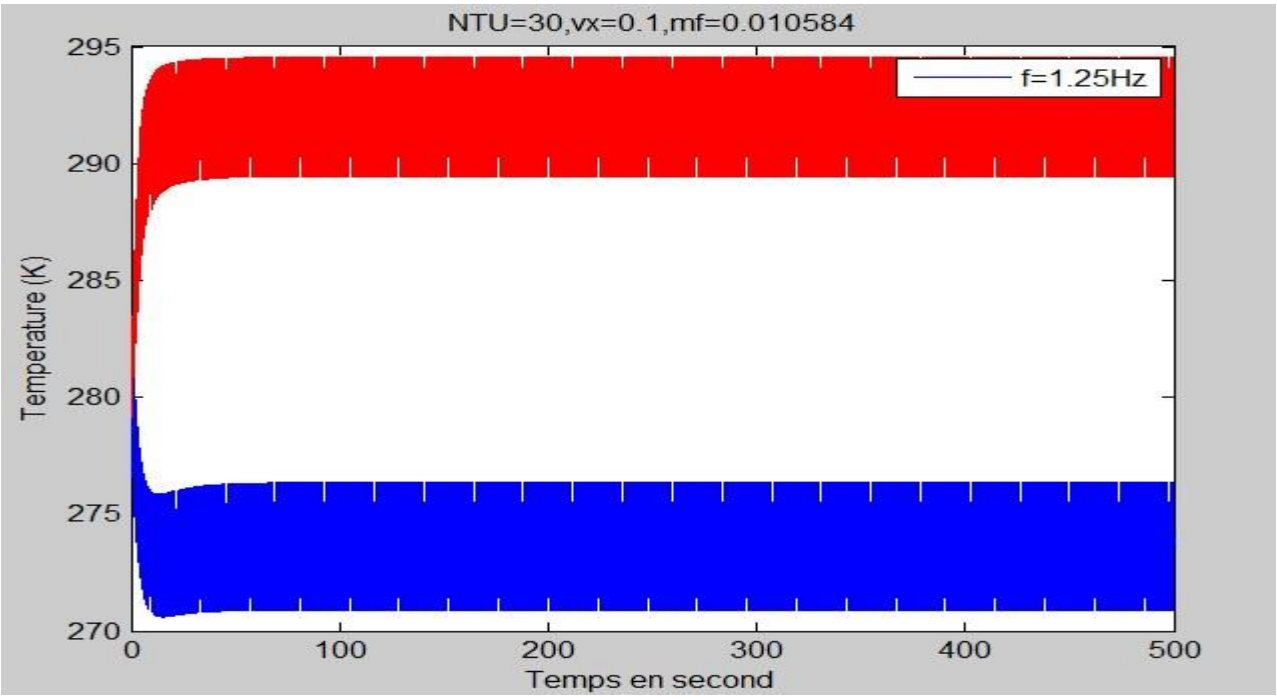


Figure IV.12. Evolution temporelle des températures aux extrémités du solide pour pour la fréquence f=1.25Hz

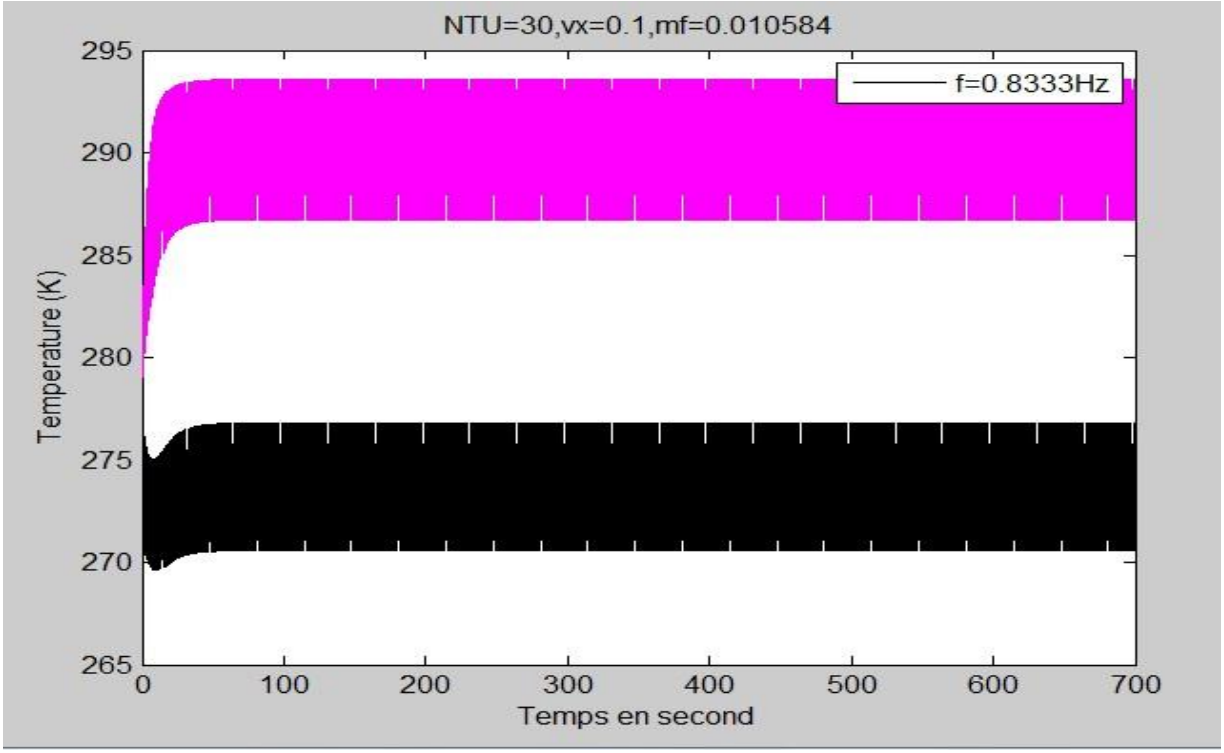


Figure IV.13. Evolution temporelle des températures aux extrémités du solide pour la fréquence f=0.8333Hz

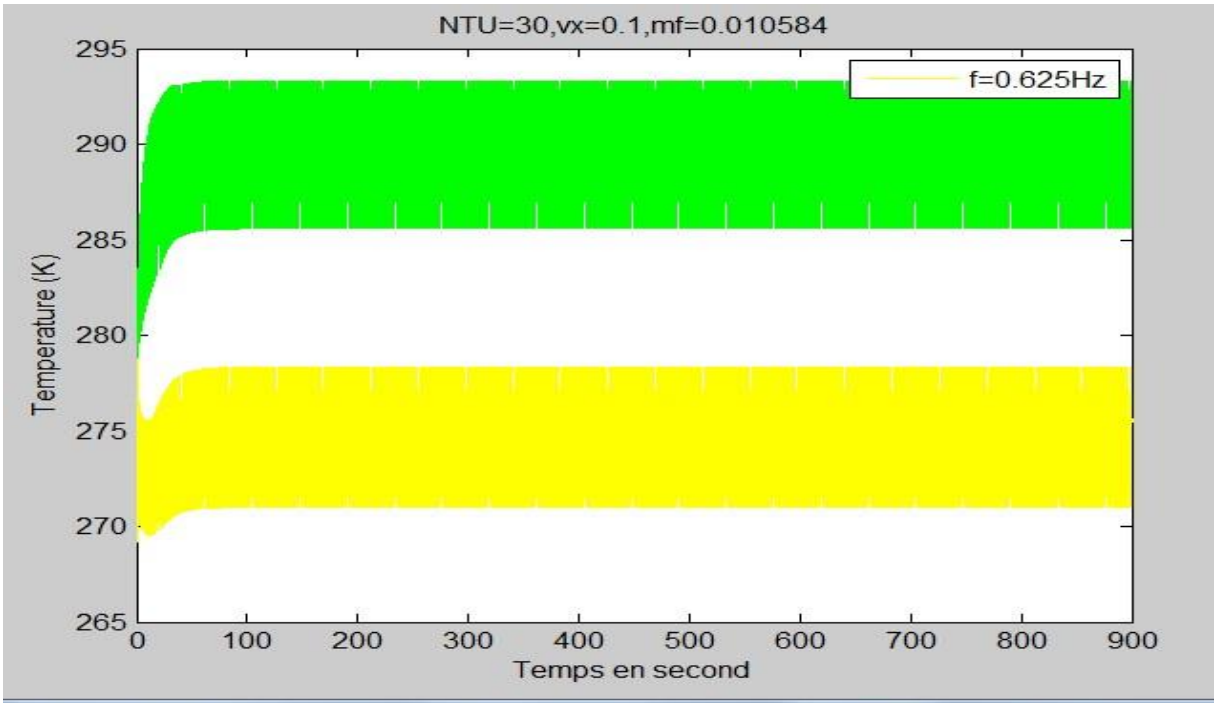


Figure IV.14. Evolution temporelle des températures aux extrémités du solide pour la fréquence f=0.625Hz

Les figures IV. (12.13.14). présentes l'évolution temporelle des températures aux extrémités du solide pour des fréquences différentes.

1. **Figure IV.12. on a pour f=1.25Hz**

La température moyenne du solide au point (x=0) devient égale à TS= 273K lorsque le régime permanant est atteint. La température moyenne du solide au point (x=L) devient égale à TS= 292K lorsque le régime permanant est atteint.

2. **Figure IV.13. on a pour f=0.833Hz**

La température moyenne du solide au point x=0 devient égale à TS= 273K lorsque le régime permanant est atteint. La température moyenne du solide au point (x=L) devient égale à TS= 290K lorsque le régime permanant est atteint.

3. **Figure IV.14. on a pour f=0.625Hz**

La température moyenne du solide au point (x=0) devient égale à TS= 274K lorsque le régime permanant est atteint. La température moyenne du solide au point (x=L) devient égale à TS= 290K lorsque le régime permanant est atteint. En comparons les valeurs de l'écart de température obtenu pour chaque fréquence, on conclue que l'écart de température croit avec l'augmentation de la fréquence du cycle.

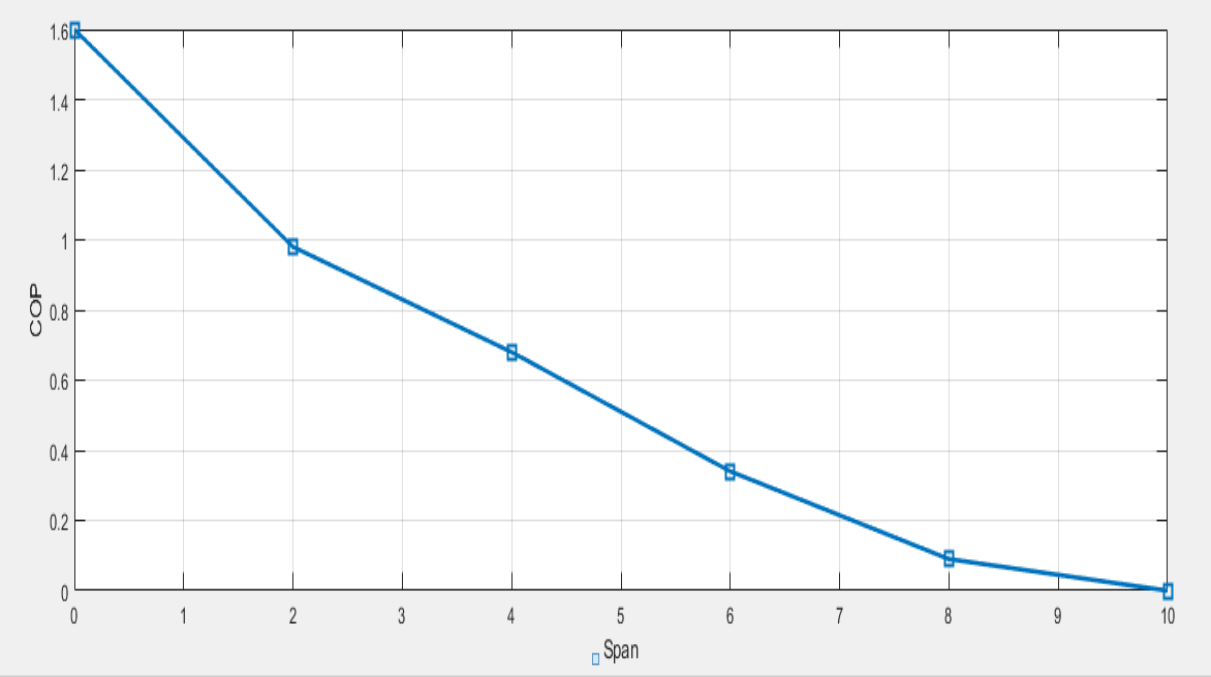


Figure IV.15.Évolution de *COP* en fonction du span de température

La Figure IV.15 montre Le COP diminue fortement à mesure que l'écart de température augmente, ce qui indique que le système devient moins efficace avec des écarts de température plus grands. À un écart de température plus faible, le COP est plus élevé, ce qui signifie que le système fonctionne de manière plus efficace. Le COP dans le cycle AMR est une mesure de l'efficacité énergétique du système de réfrigération magnétique. Comme observé dans le graphique précédent, le COP diminue avec l'augmentation de l'écart de température (span). À des écarts de température plus faibles, le COP est plus élevé, indiquant une meilleure efficacité du système.

CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATIONS

CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATIONS

La réfrigération magnétique constitue une alternative à la technologie classique de production du froid. Elle est prometteuse et devrait permettre de réaliser des systèmes compacts et à haute efficacité énergétique tout en préservant l'environnement. Elle répond de ce fait aux préoccupations actuelles relatives à la maîtrise et l'économie de l'énergie et à la réduction des gaz à effet de serre Cependant c'est une thématique émergente qui malgré l'importance et la richesse des travaux de recherche réalisées ces dernières années reste encore "Vierge La rupture technologique qu'elle offre nécessite de lever un certain nombre de verrous scientifiques et techniques relatifs au matériau et au système.

Cette recherche présente une étude complète sur la faisabilité de l'utilisation de l'alliage ternaire NiMnIn dans les applications de réfrigération magnétique, une alternative prometteuse et écologique à la réfrigération traditionnelle. Grâce à une approche multifacette, les propriétés structurelles et électroniques de l'alliage ternaire NiMnIn ont été explorées en utilisant le logiciel CASTEP, permettant ainsi d'optimiser la structure et d'extraire les arrangements atomiques et les constantes de réseau, ainsi que d'analyser la distribution de la densité électronique et les états énergétiques. Cette étude a montré que l'alliage NiMnIn possède des propriétés électroniques et structurelles qui en font un candidat solide pour les systèmes de réfrigération magnétique.

Dans la deuxième partie, un modèle numérique a été développé en utilisant le logiciel MATLAB pour simuler le cycle de réfrigération magnétique. La simulation s'est concentrée sur l'analyse du couplage magnétothermique entre le fluide caloporteur et le matériau magnétocalorique solide NiMnIn, et les résultats ont montré une bonne efficacité thermique et une performance prometteuse.

Les résultats obtenus confirment que l'alliage ternaire NiMnIn possède un grand potentiel pour être intégré dans des systèmes de réfrigération magnétique efficaces, renforçant ainsi la faisabilité de son utilisation dans diverses applications industrielles. Comme perspective, Il est nécessaire de réaliser des études expérimentales à plus grande échelle pour vérifier ces résultats obtenus et déterminer l'impact des différents facteurs environnementaux sur les performances du matériau magnétocalorique proposé.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1] Bouchekara, H.R.E.-H., n.d. RECHERCHE SUR LES SYSTEMES DE REFRIGERATION MAGNETIQUE. MODELISATION NUMERIQUE, CONCEPTION ET OPTIMISATION.

[2] Balli, M., Mahmed, C., Duc, D., Nikkola, P., Sari, O., Hadorn, J.C., Rahali, F., n.d. Le renouveau de la réfrigération magnétique.

[3] Gschneidner, K.A., Pecharsky, V.K., 2008. Thirty years of near room temperature magnetic cooling: Where we are today and future prospects. International Journal of Refrigeration 31, 945–961. https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2008.01.00

[4] Lebouc, A., Allab, F., Fournier, J. M. et Yonnet, J. P. (2005).
Réfrigération magnétique. Tech. Ing., (RE 28-1):1–16.

[5] Bouty, E., 1881. E. WARBURG. — Magnetische Untersuchungen (Recherches magnétiques); Ann. der Physik und Chemie, t. XIII, p. 14 1; 1881. CARL FROMME. — Bemerkungen zu der Abhandlung von Hrn. Warburg über einige Wirkungen der magnetischen Coercitivkraft

(Remarques sur un Memoire de M. Warburg relatif à quelques actions de la force coercitive magnétique); Ann. der Physik und Chemie, t. XIII, p. 318; 1881. AUERBACH. — Magnetische Untersuchungen (Recherches magnétiques); Ann. der Physik und Chemie, t. XI, p. 353; 1880; et t. XIV, p. 308; 1881. J. Phys. Theor. Appl. 10, 495–500. https://doi.org/10.1051/jphystap:0188100100049501

[6] Smaïli, A., Chahine, R., 1998. Thermodynamic investigations of optimum active magnetic regenerators. Cryogenics 38, 247–252. https://doi.org/10.1016/S0011-2275(97)00140-9.

[7] Y. Chiba, 2014 Y. Chiba, O. Sari, A. Smaïli, C. Mahmed, and P. Nikkola. Experimental study of a multilayer active magnetic regenerator refrigerator-demonstrator. accepté en 2014, Springer.

[8] Kitanovski, A 2006 Kitanovski, A., Egolf, P. W. et Sari, O. (2006). Method and device for the generation of cold and heat by magneto-calorific effect. U.S. Patent No. 2006/0080979 A1.

[9] [Barclay,1982] Barclay, J. A. et Steyert Jr., W. A. (1982). Active magnetic regenerator. U.S. Patent No. 4,332,135.

[10] [Brown G.V,1976] Brown G.V., Magnetic heat pumping near room temperature. J. Appl. Phys. 1976, Vol. 47, pp. 3673 –3680.

[11] [B. Yu,2010] 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.

[12] [K. GschneidnerJr 2008] K. A. GschneidnerJr and V. K. Pecharsky. Thirty years of near room temperature magnetic cooling : Where we are today and future prospects. International Journal of Refrigeration, 31 :945961, 2008.

[13] [T. Okamura,2006] T. Okamura, K. Yamada, N. Hirano, and S. Nagaya. Performance of a room-temperature rotary magnetic refrigerator. International Journal of Refrigeration, 29(8) :1327 1331, 2006. 31 :945961, 2008.

[14] [Rowe, A.2006] Rowe, A. et Tura, A. (2006). Experimental investigation of a three-material layered active magnetic regenerator. Int. J. Refrigeration, 29(8):1286– 1293. doi :10.1016/j.ijrefrig.2006.07.012

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

[16] [O. Sari 2014] O. Sari and M. Balli. From conventional to magnetic refrigerator technology. International Journal of Refrigeration, 37 :815, 2014

[17] K. Engelbrecht, D. Eriksen, C.R.H. Bahl, R. Bj¯rk, J. Geyti, J.A. Lozano, K.K. Nielsen, F Saxild, A. Smith, and N. Pryds.

[18] Czernuszewicz, A., Kaleta, J., Królewicz, M., Lewandowski, D., Mech, R., Wiewiórski, P., 2014. A test stand to study the possibility of using magnetocaloric materials for refrigerators. International Journal of Refrigeration 37, 72–77

https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2013.09.017

[19] Eriksen, D., Engelbrecht, K., Bahl, C.R.H., Bjørk, R., Nielsen, K.K., Insinga, A.R., Pryds, N., 2015. Design and experimental tests of a rotary active magnetic regenerator prototype. International Journal of Refrigeration 58, 14–21 https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2015.05.004

[20] Eriksen, D., Engelbrecht, K., Bahl, C.R.H., Bjørk, R., Nielsen, K.K., 2016. Effects of flow balancing on active magnetic regenerator performance. Applied Thermal Engineering 103, 1–8. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.03.001

[21] Fortkamp, F.P., Eriksen, D., Engelbrecht, K., Bahl, C.R.H., Lozano, J.A., Barbosa, J.R., 2018. Experimental investigation of different fluid flow profiles in a rotary multi-bed active magnetic regenerator device. International Journal of Refrigeration 91, 46–54. https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2018.04.019

[22] Masche, M., Liang, J., Dall'Olio, S., Engelbrecht, K., Bahl, C.R.H., 2021. Performance analysis of a high-efficiency multi-bed active magnetic regenerator device. Applied Thermal Engineering 199, 117569. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117569

[23] Kim, E., Kang, K.H., Yoon, C.S., 2021. Mn Fe5−Si3 for active magnetic regenerative refrigeration at room temperature. Journal of Magnetism and Magnetic Materials 530, 167952. https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2021.167952

[24] Lionte, S., Risser, M., Muller, C., 2021. A 15kW magnetocaloric proof-of-concept unit: Initial development and first experimental results. International Journal of Refrigeration 122, 256–265. https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2020.09.019

[25] Plait, A., De Larochelambert, T., Giurgea, S., Espanet, C., 2022. Experimental validation of a multiphysics modeling for a magnetocaloric bench. Applied Thermal Engineering 211, 118415. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.118415

[26] Masche, M., Liang, J., Engelbrecht, K., Bahl, C.R.H., 2022b. Improving magnetic cooling efficiency and pulldown by varying flow profiles. Applied Thermal Engineering 215, 118945. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.118945

[27] Bocanegra, J.A., Scarpa, F., Bianco, V., Tagliafico, L.A., 2023. The effect of dead volumes on the performance of magnetic refrigerators. International Journal of Refrigeration 151, 2 38. https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2023.02.013

[28] Masche, M., Liang, J., Engelbrecht, K., Bahl, C.R.H., 2023. Efficient modulation of the magnetocaloric refrigerator capacity. International Journal of Refrigeration 145, 59–67. https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2022.10.005

[29] Hai, P., Shen, J., Li, Z., Li, K., Dai, W., 2024. Development and experimental analysis of a multi-bed active magnetic regenerator. International Journal of Refrigeration 162, 169–178. https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2024.03.015

[30] [C. Aprea, 2013] C. Aprea, A. Greco, and A. Maiorino. The use of the rst 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.

[31] [Engelbrecht, K.L,2005] Engelbrecht, K.L., Nellis, G.F., Klein, S.A., Boeder, A.M., Modeling Active Magnetic Regenerative Refrigeration Systems. September 2005, International Conference on Magnetic Refrigeration at Room Temperature, 27-30, Montreux, Switzerland.

[32] [Yu, B.f,2003] Yu, B.f., Gao, Q., Zhang, B., Meng, X.Z., Chen, Z., Review on Research Of Room Temperature Magnetic Refrigeration. 2003, International Journal Of Refrigeration, Vol.26, pp 622-636.

[33] A. Bejan and A.D. Kraus. Heat transfer handbook. John Wiley and Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2003.

[34] F. P. Incropera, D. P. Dewitt, T. L. Bergman, and A. S. Lavine. Fundamentals of Heat and Mass Transfer (6th Edition). John Wiley, New York, 2007.

[35] A. Lebouc, F. Allab, J.M. Fournier, J.P Yonnet, ‘‘Réfrigération magnétique’’, Techniques de l’Ingénieurs, 2005

[36] [C. Aprea, 2013] C. Aprea, A. Greco, and A. Maiorino. The use of the rst 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.

[37] [Gschneidner Jr. *et al.*, 2005] Gschneidner Jr., K. A., Pecharsky, V. K. et Tsokol, A. O. (2005). Recent developments in magnetocaloric materials. *Rep. Prog. Phys.*, 68(6):1479–1539.

[38] [Tishin et Spichkin, 2003] Tishin, A. M. et Spichkin, Y. I. (2003). *The Magnetocaloric Effect and its Applications*. Series in Condensed Matter Physics. Institute of Physics Publishing, Bristol. ISBN 0-750-30922-9.

[39] Pecharsky et Gschneidner Jr., 1997] Pecharsky, V. K. et Gschneidner Jr., K. A. (1997). Tunable magnetic regenerator alloys with a giant magnetocaloric effect for magnetic refrigeration from 20 to 290 k. *Appl. Phys. Lett.*, 70(24):3299–3301.

doi :10.1063/1.119206.

[39] L. H. Thomas, Pro. Cambridge Philos. Soc. 23,542 (1927).

[40] E. Fermi, Z. phys. 48, 73 (1928).

[41] P. A. M. Dirac, Proc. Cambridge Philos. Soc.26 ,376(1930).

[42] A. Dal Corso, A. Pasquarello, A. Baldereschi, et R. Car, "Generalized gradient approximations to density-functional theory: A comparative study for atoms and solids,"Physical Review B, vol. 53, no. 3, 1996.

[40] Sahoo, R., Nayak, A.K., Suresh, K.G., Nigam, A.K., 2012. Structural, magnetic, magnetocaloric and magnetotransport properties in Ge doped Ni–Mn–Sb Heusler alloys. Journal of Magnetism and Magnetic Materials 324, 1267–1271. https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2011.11.025

[41]Liu, Y., Zhang, X., Xing, D., Shen, H., Chen, D., Liu, J., Sun, J., 2014. Magnetocaloric effect (MCE) in melt-extracted Ni–Mn–Ga–Fe Heusler microwires. Journal of Alloys and Compounds 616, 184–188. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2014.07.077

[42]Kim, Y., Kim, E.J., Choi, K., Han, W.B., Kim, H.-S., Shon, Y., Yoon, C.S., 2014. Room-temperature magnetocaloric effect of Ni–Co–Mn–Al Heusler alloys. Journal of Alloys and Compounds 616, 66–70. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2014.07.034

[43]Arumugam, S., Devarajan, U., Esakki Muthu, S., Singh, S., Thiyagarajan, R., Raja, M.M., Rama Rao, N.V., Banerjee, A., 2017. Structural, transport, magnetic, magnetocaloric properties and critical analysis of Ni-Co-Mn-Ga Heusler alloys. Journal of Magnetism and Magnetic Materials 442, 460–467. https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2017.07.016

[44]Ghosh, S., Ghosh, A., Mandal, K., 2018. Reversible magnetocaloric effect and critical exponent analysis in Mn-Fe-Ni-Sn Heusler alloys. Journal of Alloys and Compounds 746, 200–205. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.02.269

[45]Li, F., Zhao, D., Liu, J., Kamantsev, A., Dilmieva, E., Koshkid'ko, Y., Zhu, C., Ma, L., Zhen, C., Hou, D., 2023. Entropy change of magnetostructural transformation and magnetocaloric properties in a Ni50Mn18.5Ga25Cu6.5 Heusler alloy. Materials Research Bulletin 158, 112050. https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2022.112050

[46]Pfeuffer, L., Lemke, J., Shayanfar, N., Riegg, S., Koch, D., Taubel, A., Scheibel, F., Kani, N.A., Adabifiroozjaei, E., Molina-Luna, L., Skokov, K.P., Gutfleisch, O., 2021. Microstructure engineering of metamagnetic Ni-Mn-based Heusler compounds by Fe-doping: A roadmap towards excellent cyclic stability combined with large elastocaloric and magnetocaloric effects. Acta Materialia 221, 117390. https://doi.org/10.1016/j.actamat.2021.117390

[47] Ouyang, J., Tian, Y., Xiao, H., Zhang, Y., 2021. Magnetic properties, martensitic transformations and magnetocaloric performances in Ni44Mn45-xFexSn11 (x = 0–3) Heusler alloys. Materials Chemistry and Physics 273, 125150. https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2021.125150

[48]Ahmad, A., Mitra, S., Srivastava, S.K., Das, A.K., 2021. Structural, magnetic, and magnetocaloric properties of Fe2CoAl Heusler nanoalloy. Journal of Magnetism and Magnetic Materials 540, 168449. https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2021.168449

[49]Zheng, T., Liu, K., Chen, H., Wang, C., 2022. Large magnetocaloric and magnetoresistance effects during martensitic transformation in Heusler-type Ni44Co6Mn37In13 alloy. Journal of Magnetism and Magnetic Materials 563, 170034. https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2022.170034

[50] :Li, F., Zhao, D., Liu, J., Kamantsev, A., Dilmieva, E., Koshkid'ko, Y., Zhu, C., Ma, L., Zhen, C., Hou, D., 2023. Entropy change of magnetostructural transformation and magnetocaloric properties in a Ni50Mn18.5Ga25Cu6.5 Heusler alloy. Materials Research Bulletin 158, 112050. https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2022.112050

[51] :Hennel, M., Galdun, L., Džubinská, A., Reiffers, M., Varga, R., 2023. High efficiency direct magnetocaloric effect in Heusler NiMnGa microwire at low magnetic fields. Journal of Alloys and Compounds 960, 170621. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.170621

[52] :Archana, R., Kavita, S., Ramakrishna, V.V., Kumar, V.S., Bhatt, P., Yusuf, S.M., Gopalan, R., 2023. Successive, overlapping transitions and magnetocaloric effect in Te doped Ni-Mn-Sn Heusler alloys. Journal of Alloys and Compounds 947, 169434. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.169434

[53] :Sivaprakash, P., Kim, I., Divya, S., Hajra, S., Oh, T.H., Esakki Muthu, S., 2023. Influence of non-magnetic Cu on structural, magnetic and magnetocaloric properties on NiMnIn bulk Heusler alloys. Materials Science and Engineering: B 297, 116760. https://doi.org/10.1016/j.mseb.2023.116760

[54] :Dong, J., Liu, Z., Si, X., Zhou, T., Lin, J., Liu, Y., 2023. Martensitic transformation and magnetocaloric effect of Cr-doped Mn–Ni–Fe–Ti all-d-metal Heusler alloys near room temperature. Solid State Communications 362, 115099. https://doi.org/10.1016/j.ssc.2023.115099

[55]Norouzi-Inallu, M., Ghotbi Varzaneh, A., Kameli, P., Ullakko, K., Chernenko, V., Hosoda, H., Salazar, D., 2023. Transformation Behavior and Inverse Magnetocaloric Effect in $Ni_{45}Co_5Mn_{36.7}In_{13.3-X}$ Ge_X Melt-Spun Ribbons (preprint). SSRN. https://doi.org/10.2139/ssrn.4491292

[56]Song, B.-Y., Han, Y.-Q., Gao, L., Cheng, J., Liu, C.-L., Huang, J.-H., 2023. Magnetocaloric effect and phase transformation of LaFe11.0M0.5Si1.5 (M = Cu, Ni, Mg) alloys. Journal of Alloys and Compounds 965, 171365. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.171365

[57]Datta, A., Mazumdar, D., Banerjee, S., Das, I., 2024. Magnetic, magnetocaloric and critical behavior studies in Heusler compounds Co2-xCr1+xAl. Journal of Magnetism and Magnetic Materials 591, 171743. https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2024.171743

[58]Khan, A.N., Díaz-García, Á., Moreno-Ramírez, L.M., Law, J.Y., Franco, V., 2024. Tunable magnetocaloric effect towards cryogenic range by varying Mn:Ni ratio in all-d-metal Ni(Co)-Mn-Ti Heusler alloys. Journal of Alloys and Compounds 973, 172938. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.172938

[59]Murugan, K., Karunakaran, M., Kavita, S., Paulraj, S., Banerjee, R., Venugopal, K., 2024. Unconventional critical behavior in room temperature magnetocaloric material: Fe30Cr45V25 all d-metal Heusler alloy. Journal of Solid State Chemistry 124602. https://doi.org/10.1016/j.jssc.2024.124602

[60]Wu, Z., Zhang, H.G., Pan, W.J., Zhang, Y.D., Huang, J.H., Yue, M., Skokov, K.P., Gutfleisch, O., 2024. New design of La(Fe, Co, Si)13 magnetocaloric composites using Gd as a binder. Journal of Materials Research and Technology 28, 980–988. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.12.017

[61]:M.A. Blanco, E. Francisco, V. Luaña, Comput. Phys. Commun. 158 (2004) 57

[62]: M.A. Blanco, A. Martín Pendás, E. Francisco, J.M. Recio, R. Franco, J. Mol. Struct. Theochem. 368 (1996) 245.

[63]: Francisco, E.Recio, J. M., Blanco, M. A., Martín Pendás, A. 1998, J. Phys. Chem. 102 (1998) 1595

[64]: Poirier, J. P. Introduction to the Physics of the Earth's Interior, Oxford: Cambridge University Press, (2000) 39.

[65]:Chiba, Younes Smaïli, Arezki Mahmed, Cyril Balli, MohamedSari, Osmann Thermal investigations of an experimental active magnetic regenerative refrigerator operating near room temperature

[66]:Chiba, Younes Sari, Osmann Smaïli, ArezkiMahmed, Cyril Nikkola, PetriProgress Experimental study of a multilayer active magnetic regenerator refrigerator-demonstrator in Clean Energy, Volume 1: Analysis and Modeling225-23333191670812015 Springer International Publishing.

[67] :Chiba, Younes Smaïli, Arezki Sari, Osmann Hu, Conference Proceedings Composite material based on LaFe (Co, Si) for active magnetic regenerator operating near room temperature Jin IREC2015 The Sixth International Renewable Energy Congress 1-4 1479979473 2015 IEEE.

[68] : Chiba, Y Smaïli, A Sari, Investigation of the effect of demagnetizing field on magnetic refrigeration devices Chiba, Y Smaïli, A Sari, O Revue des Energies Renouvelables 5-20 2015 CDER.

[69]:Chiba, Younes Enhancements of thermal performances of an active magnetic refrigeration device based on nanofluids Chiba, Younes Mechanics 23 1 31-38 2029-6983 2017

[70] : Chiba, Younes Marif, Yacine Henini, Noureddine Tlemcani, Abdelhalim Artificial Neural Networks Modeling of an Active Magnetic Refrigeration Cycle Artificial Intelligence in Renewable Energetic Systems: Smart Sustainable Energy Systems 349-354 3319731912 2018 Springer International Publishing.

[71] : Chiba, Younes Experimental and numerical study of the behavior of a multilayer for active magnetic refrigerator based on La-Fe-Co-Si Chiba, Younes IEEE Transactions on Magnetics 53 11 1-4 0018-9464 2017 IEEE.

[72] : Kehileche, B Chiba, Y Henini, N Tlemçani The Use of Nanofluids in Electrocaloric Refrigeration Systems, A Smart Energy Empowerment in Smart and Resilient Cities: Renewable Energy for Smart and Sustainable Cities 590-597 3030372065 2020 Springer International Publishing.

[73]:Chiba, Younes Marif, Yacine Boukaoud, Abdelali Sebbar, Djemel Performance Enhancement of a Magnetic Refrigeration Device based on TiO 2 used as Secondary Fluid Chiba, Younes Marif, Yacine Boukaoud, Abdelali Sebbar, Djemel 2019 7th International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC) 1-4 172815152X 2019 IEEE.

[74]: Chiba, Younes Marif, Yacine Henini, Noureddine Tlemcani, Abdelhalim Modeling of magnetic refrigeration device by using artificial neural networks approach International Journal of Energy Optimization and Engineering (IJEOE) 10 4 68-76 2021 IGI Global.

[75]:Ghediri, Abdeldjalil Chiba, Younes Tlemçani, Abdelhalim Magnetocaloric Effect and Magnetic Properties of the Intermetallic Compound Mn 5 Ge 3:Ab Initio Calculation and Monte Carlo Simulation Artificial Intelligence and Heuristics for Smart Energy Efficiency in Smart Cities: Case Study: Tipasa, Algeria 847-856 3030920372 2022 Springer International Publishing

[76] :H. ZENASNI, « Etude théorique des propriétés magnétiques, électroniques et structurales des alliages Heusler », Université de Abou Bake belkaid, Telemcen, (2013).

[77]:H. ABBASSA«Contribution à l'étude des propriétés physico-chimiques des alliages d'Heusler », Université de Mostaganem, Thèse (2015).

[78] : P.Villars and L.D.Calvert, "Pearson's handbook of crystallographic data for intermetallic phases ", American Society of Metals, vol 1-3, pp. 1–3258 (1991).

[79] :M. W. MOHAMEDI, « Étude ab-initio des propriétés structurales, élastiques, thermiques, électroniques et magnétiques des alliages Heusler quaternaires CoMnCrZ (Z=Al, As, Si, Ge) », Université de SIDI BEL ABBES, Thése (2018).