REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

**UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA**




**F**aculté de **T**echnologie

# Mémoire de fin d'études de Master

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : énergétique

## Thème

---

# Modélisation numérique d'un réfrigérateur écologique opérant près de la température ambiante

---

Présenté par ;

M$^{elle}$. Dahbia HAMEL

Proposé et Dirigé par

Dr. Younes CHIBA

**Promotion Juin 2022**

# REMERCIEMENTS

Je remercie Dieu de m'avoir donné le privilège et l'occasion de continuer sur le chemin de la science et de la connaissance.
Je remercie sincèrement le jury de son intérêt pour moi approuver une étude pratique et l'enrichir de leurs propositions.
J'adresse mes sincères remerciements et ma gratitude au surintendant CHIBA Younes, qui m'a guidé et consacré du temps à enrichir ce travail en lui fournissant de précieux conseils et de bonnes opinions.
En plus du chef du département de génie mécanique, le professeur ZIRARI Mounir, qui lui a exprimé ma profonde gratitude pour ses encouragements, son aide et ses conseils
Et je remercie tous ceux qui m'ont aidé de près et de loin.

# DÉDICACES

Je dédier Ce travail à :

L'homme qui s'est efforcé de m'élever, de m'enseigner, et de rester auprès de mon Père, Dieu préservé.

Qui était fatigué et enduré de moi et de moi tout à la source de la tendresse et la source de la sécurité à la source de ma chère mère.

Qui s'est tenu avec moi dans l'épais et mince et m'a soutenu dans mon voyage à ma bonne parole chère tante

Que ma grand-mère ne m'a jamais humanisée dans sa propagande, guérie par Dieu.

A ceux qui ont partagé ma vie avec son doux et amer frère, sœurs, tantes, frères et enfants....

Mon cher ami Widad

Et enfin, à mes collègues qui m'ont soutenu dans ma carrière scolaire.

**Résumé**

Le présent projet de master, consiste à la modélisation numérique des paramètres de fonctionnement d'un réfrigérateur magnétique opérant près de la température ambiante. Pour ce faire, les équations de l'énergie sont considérées pour simuler le transfert de chaleur entre le fluide caloporteur et le matériau solide sous forme sphérique. Les résultats obtenus sont analysés et discutés.

**Mots clés :** froide magnétique, CFD, simulation numérique, modélisation

**Abstract**

This master's project consists of the numerical modeling of the operating parameters of a magnetic refrigerator operating near ambient temperature. To do this, the energy equations are considered to simulate the heat transfer between the heat transfer fluid and the solid material in spherical form. The results obtained are analyzed and discussed.

**Keywords:** magnetic refrigeration, CFD, numerical simulation, modeling

**الملخص**

يهدف مشروع الماستر الى النمذجة العددية لمقادير التشغيل لثلاجة مغناطيسية تعمل بالقرب من درجة الحرارة المحيطة. للقيام بذلك ، استعملنا معادلات الطاقة لمحاكاة انتقال الحرارة بين مائع نقل الحرارة والمادة الصلبة في شكل كروي. النتائج التي تم الحصول عليها تم تحليلها ومناقشتها.

**الكلمات المفتاحية:** التبريد المغناطيسي، CFD، محاكاة عددية، نمذجة

# Table des matières

Résumé

Introduction générale

**Chapitre I**

I.1 Historique et revue des travaux antérieurs

I.2 Principaux démonstrateurs de réfrigération magnétiques

I.2.A Démonstrateur de NASA, USA

I.2.B Démonstrateur de Astronautics USA

I.2.C Démonstrateur de chubu Electric/Toshiba

I.2.D Démonstrateur de University of Victoria

I.2.E Démonstrateur de G2Elab, Grenoble

I.2.F Démonstrateur de Cooltech Applications

I.2.G Démonstrateur de University of Western Switzerland

I.2.H Autres démonstrateurs

I.3 Considérations physiques et thermodynamiques

I.4 Théorie du champ moléculaire

I.5 Matériaux magnétocaloriques

I.6 Critères de sélection de réfrigérant magnétique et de fluide caloporteur

I.7 Objectifs et contributions de la présente thèse

**Chapitre II**

II.1 Introduction

II.2 Cycles de réfrigération magnétique

II.2.1 Cycle magnétique de Carnot

II.2.2 Cycle magnétique d'Ericsson

II.2.3 Cycle magnétique de Barytone :

II.3 Étude du cycle AMR

2.3.1 Description du cycle AMR

II.3.2 Bref historique des modèles de cycle AMR

II.3.3 Description de démonstrateur de HES-SO

II.3.4 Équations gouvernant le problème physique

II.3.5 Paramètres thermofluides et performance du cycle AMR

**Chapitre III**

Résultats et discussions

Conclusions

Références bibliographiques

# Liste figure

Figure I. 1. Comparaison entre Réfrigération magnétique et Réfrigération conventionnelle 6
Figure I. 2. Variation de la température adiabatique et de l'entropie magnétique pour un champ variant de B = 0 à B > 0 7
Figure I. 3. Évolution des travaux de recherche sur les matériaux magnétocaloriques depuis les années 1925 (12)8
Figure I. 4. Revue sur les matériaux magnétocaloriques (13) 9
Figure I. 5. Évolution des démonstrateurs de réfrigération magnétique réalisés dans le monde (15) 10
Figure I. 6. Démonstrateur de NASA réalisé par Brown et son équipe (17) 10
Figure I. 7. Démonstrateur de RM développé récemment par Astronautics (18) 11
Figure I. 8. Démonstrateur de RM développé par Chubu electric/Toshiba (19) 12
Figure I. 9. Nouveau démonstrateur de RM développé par University of Victoria (22) 13
Figure I. 10. Démonstrateur de RM de G2Elab (24) 14
Figure I. 11. Démonstrateur de RM de la société Cooltech Applications (25) 15
Figure I. 12. Démonstrateur de RM linéaire développé par HES-SO en 2010 : Cristal-1 (26) 16
Figure I. 13. Démonstrateurs de RM rotatif développé par HES-SO (Sari et al. 2006) 16
Figure I. 14. Démonstrateur de RM linéaire développé par HES-SO en 2012 : Cristal-2 (13) 17
Figure I. 15. 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 (13) 17
Figure I. 16. Types de matériaux magnétocaloriques (34) 22
Figure I. 17. Variation de l'effet magnétocalorique et l'entropie magnétique en fonction de fonction de champ magnétique pour différents Matériaux magnétocaloriques (12) 23
Figure II. 1. Cycle magnétique de Carnot 27
Figure II. 2. Cycle magnétique d'Ericsson 28
Figure II. 3. Cycle magnétique de Baryton 29
Figure II. 4. Cycle de réfrigérateur AMR 31
Figure II. 5. Schéma du démonstrateur de réfrigération magnétique à régénération active de HES-SO 34
Figure II. 6. Bilan énergétique dans un élément solide 36
Figure II. 7. Bilan énergétique dans un élément fluide 37
Figure II. 8. Configuration des régénérateurs de réfrigérateur 40

# Nomenclature

| Syrnbol | Dcsignation | Unitc |
|---|---|---|
| A | Airc dc surfacc dc transfcrt | $m^2$ |
| B | Charnp rnagnctiquc | T |
| c | Chalcur spccifiquc | $J.kg^{-1}.K^{-1}$ |
| COP | Cocfficicnt dc pcrforrnancc | - |
| $D_h$ | Diarnctrc hydrauliquc | m |
| $e_f$ | Epaisscur du fluidc | m |
| $e_f$ | Epaisscur du rcgcncratcur | m |
| F | Forcc, l'cncrgic librc | N, J |
| f | Cocfficicnt dc pcrtc dc chargc lincairc | – |
| $g_J$ | Factcur dc Landc | – |
| h | Cocfficicnt d'cchangc convcctif | $W.K^{-1}.m^{-2}$ |
| J | Nornbrc quantiquc du rnorncnt angulairc total | – |
| k | Conductivitc thcrrniquc | $W.K^{-1}.m^{-1}$ |
| $k_B$ | Constantc dc Boltzrnann | $J.K^{-1}$ |
| L | Longucur | m |
| M | Magnétisation | $Am^2kg^{-1}$ |
| $M_r$ | Masse dc regénératcur | kg |
| NT U | Nornbre unite de transfert | – |
| EMC | Effct rnagnctocaloriquc, tcrnpcraturc adiabatiquc | K |
| $\dot{m}_f$ | Dcbit rnassiquc dc fluidc | $kg.s^{-1}$ |
| P | Prcssion | Pa |
| P | Puissancc | W |
| Q | Taux dc chalcur | $W.m^{-2}$ |
| $q_C$ | Puissance frigorifique | W |

| Syrnbol | Dcsignation | Unitc |
|---|---|---|
| Q | Quantite dc chaleur | J |
| R | Constante universelle des gaz | $J.K.\ mole^{-1}$ |
| S | Entropie | $J.\ kg{-}1.K^{-1}$ |
| $S_e$ | Entropie électronique | $J.\ K{-}1.mole^{-1}$ |
| $S_l$ | Entropique du réseau | $J.K^{-1}.mole^{-1}$ |
| $S_M$ | Entropie amagnétique | $J.K^{-1}.mole^{-1}$ |
| T | Tcrnperature de fluide | °C ou K |
| $T_C$ | Tcrnperature dc la source froide | K |
| $T_D$ | Ternpérature de Debye | K |
| $T_H$ | Tcrnpcraturc dc la sourcc chaudc | K |
| $T_0$ | Tcrnpcraturc initialc | °C ou K |
| $\bar{T}_C$ | Tcrnpcraturc rnoycnnc dc la sourcc froidc | K |
| $\bar{T}_H$ | Tcrnpcraturc rnoycnnc dc la sourcc chaudc | K |
| T | Tcrnps | s |
| U | Encrgic intcrnc | J |
| U | Utilisation | – |
| U | Encrgic intcrnc rnassiquc | J |
| V | Volurne | $m3$ |
| V | Vitesse | $m.s^{-1}$ |
| W | Travail | J |
| $\dot{W}$ | Travail par unité dc ternp | W |
| X | Cordonnée spatiale | m |

# Lettres grecques

| Syrnbol | Dcsignation | Unitc |
|---|---|---|
| $\varepsilon$ | Porositc | — |
| $\gamma$ | Coefficient dc capacite calorifiquc clcctroniquc | $J.K^{-1}.mole^{-1}$ |
| $\mu_B$ | Magneton dc Bohr | $J.T^{-1}$ |
| $\rho$ | Masse volurnique | $kg.m^{-3}$ |
| $\eta$ | Effieacite de la pornpe | — |
| $\theta$ | Ternperature du solide | °C |
| T | Durcc dc cyclc | s |
| X | Susccptibilite rnagnetique | $J.T^{-2}.kg^{-1}$ |

# Indices et exposants

| Syrnbol | Désignation |
|---|---|
| c | Froid |
| e | Epaisseur Fluide |
| f | Chaud |
| H | Magnétique |
| M | Pompe |
| P | Régénérateur |

# Introduction générale

# Introduction

Le développement du procédé de refroidissement permettra à l'avenir de découvrir des alternatives au procédé de refroidissement traditionnel qui cause de nombreux dommages à l'environnement, comme l'appauvrissement de la couche d'ozone dû à la composition chimique des liquides sous pression travaillant sur le développement d'autres techniques de refroidissement .

Les réfrigérateurs actuellement utilisés adoptent des conceptions écologiques modernes. L'une des technologies les plus courantes à l'avenir est le refroidissement magnétique, parce que leur rendement est beaucoup plus élevé que celui de 15% à 20% Les réfrigérateurs actuellement utilisés adoptent des conceptions environnementales modernes. L'une des technologies les plus courantes à l'avenir est le refroidissement magnétique Parce que leur efficacité est beaucoup plus élevée que celle des réfrigérateurs conventionnels de 15% à 20%

Il y a un intérêt généralisé et croissant dans le monde de la réfrigération dans l'utilisation des réfrigérateurs magnétiques, comme les réfrigérateurs pour usage domestique, comme ils apparaissent surtout avec la découverte de matériaux qui possèdent un effet thermomagnétique, et bien sûr ces matériaux sont rares et coûteux et dont l'effet est montré à tout changement dans le champ magnétique.

Le refroidissement magnétique est utilisé dans les coefficients de refroidissement à des degrés au-dessus de zéro. Maintenant, les mêmes débuts peuvent être effectués à la température normale etc. Ici, un disque métallique rotatif, magnétique et un peu d'eau peuvent être utilisés pour produire un système de refroidissement complètement nouveau. Quand une partie de la plaque tournante entre dans le champ magnétique, les particules le suivent dans la direction du champ magnétique et sa température augmente comme nous l'avons déjà fait. L'eau se concentre alors sur ce disque et le réfrigéré. Lorsque cette partie du disque sort du champ magnétique, les molécules ne sont plus monolithiques dans la direction du champ magnétique.

Il se propage de l'énergie thermique pour rétablir l'arrangement aléatoire des particules à ce qu'il était avant qu'ils n'entrent dans le champ magnétique ou de sorte que la température du disque tombe en dessous de la température ambiante, et quand un autre courant d'eau se précipite sur le disque, l'eau devient froide et est utilisée pour refroidir le froid. Bien que ce concept soit clair, les chercheurs tentent d'améliorer les détails tels que la recherche de métaux qui multiplient l'effet magnétique. Les expériences actuelles sont menées sur des comprimés de taille CD faits de gadolinium métal qui est utilisé dans l'industrie de la tête d'enregistrement de dispositifs vidéo.

Il existe des modèles antérieurs où des aimants semi-conducteurs sont utilisés, qui eux-mêmes ont besoin de réfrigération pour qu'un champ magnétique puisse émettre. Dans le dernier modèle de ces frigorigènes, les scientifiques ont développé un aimant permanent qui génère un champ magnétique fort.

Le premier chapitre, est consacré à l'histoire de la réfrigération et de l'examen des ouvrages précédents en général. La réfrigération magnétique en particulier a entamé de ses principes et considérations physiques et thermodynamiques.

Le deuxième chapitre, est réservé à la modélisation mathématique des lois de refroidissement magnétique tout en mentionnant leurs propres cycles.

Dans le troisième et dernier chapitre, le modèle proposé du froid magnétique a été présenté et analysé. Les résultats obtenus via le modèle proposé sont analysés et discutés dans le dernier chapitre. Dans la fin le manuscrit a été clôturé par une conclusion.

# CHAPITRE I

## généralités sur le froid magnétique

## I.1 Historique et revue des travaux antérieurs

Effet magnétocalorique découvert par le physicien allemand Emil Warburg en 1881, où il observa une élévation de la température d'un échantillon de fer lorsque celui-ci était introduit dans un champ magnétique et une chute de température lorsqu'il en était retiré. Les principes de la réfrigération magnétique étaient établis en 1926 par Debye et ont permis de descendre jusqu'à (1/100) **(3).** Le 1er système attenant 0,25 K mais à des puissances très faibles <1W a été réalisé par le chimiste Nobélien W.F. Giauque en 1933. Où il a utilisé le sel de gadolinium $Gd_2$ $(SO_4)8H_2O$ dans sa démonstration en cryogénie **(4).** Le froid magnétique au voisinage de la température ambiante a vu le jour presque cent ans après la découverte de l'EMC quand Brown en 1976 a développé un système de réfrigération performant en utilisant le gadolinium comme matériau actif et un électroaimant développant un champ magnétique de 7 Teslas, il a obtenu un écart de température entre la source chaude et la source froide de l'ordre de 47 K. Pour le transfert thermique, il a utilisé un fluide à base d'eau et d'alcool **(5)**.

En 1997 Gschneidner a découvert des « matériaux à effet magnétocalorique géant » à température ambiante dans des alliages de Gadolinium –germanium-silicium (Ga-Ge-Si) avec EMC = 3 ,65 K/ Teslas autour de la température de curie $T_C$ =276 K **(6)**. C'est la notion principale qui a révolutionné le domaine de la réfrigération magnétique à l'ambiante.

En 1998, Zimm a mis au point un prototype démontrant la faisabilité de la réfrigération magnétique au voisinage de l'ambiante. Pour un écart entre la source froide et la source chaude de 10 K et sous un champ de 5 Teslas **(7)**. Ce système développé a permis d'atteindre pour la première fois une puissance de 600 W et un coefficient de performance de 10 avec une efficacité de 60 % par rapport au cycle de Carnot.

Puis les membres de l'Astronautics Cooperation of America a remplacé les aimants supraconducteurs par des simples aimants permanents (Nd2Fe14B) pour produire un effet magnétocalorique et par suite l'apparition du premier réfrigérateur magnétique fonctionnant à température ambiante et pourvu d'aimant permanent en 2001 et de ce faite une énergie gratuite pour réaliser des cycles magnétocaloriques **(8)**

Ces trois dernières avancées ont permis à la réfrigération magnétique de connaître un développement exponentiel

Mohamed Balli 2014, a observé qu'un effet magnétocalorique géant peut être obtenu par une simple rotation autour d'un petit cristal de HoMn2O5, et ce, dans un champ magnétique fixe. À la suite de cette découverte, les chercheurs de l'université de Sherbrooke ont proposé un

concept innovant pour la liquéfaction de l'hélium et de l'hydrogène en utilisant l'effet magnétocalorique rotatif **(9)**

La figure (I.1) montre que le principe de la réfrigération magnétique est similaire à celui de réfrigération conventionnelle ; 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.

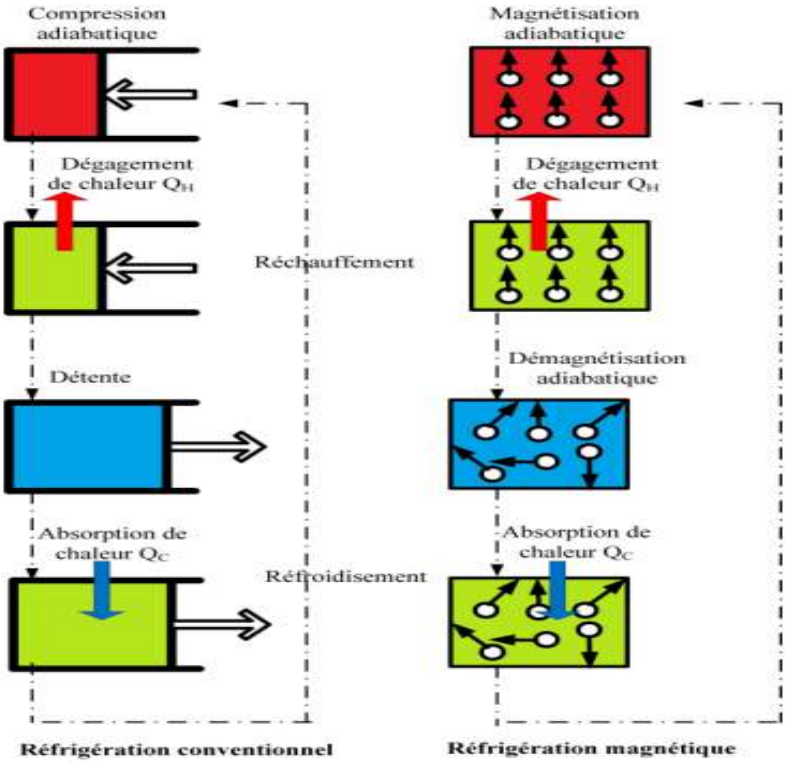



**Figure I. 1.** Comparaison entre Réfrigération magnétique et Réfrigération conventionnelle

La figure (I.1) présente aussi les quatre étapes fondamentales d'un procédé de réfrigération conventionnel. Celles-ci sont la compression du gaz au niveau du compresseur, le dégagement de la chaleur dans le condenseur (source chaude), la détente du gaz et l'absorption de la chaleur au niveau de l'évaporateur (source froide). Les étapes de dégagement de chaleur et de détente engendrent le processus de refroidissement en deux étapes

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.

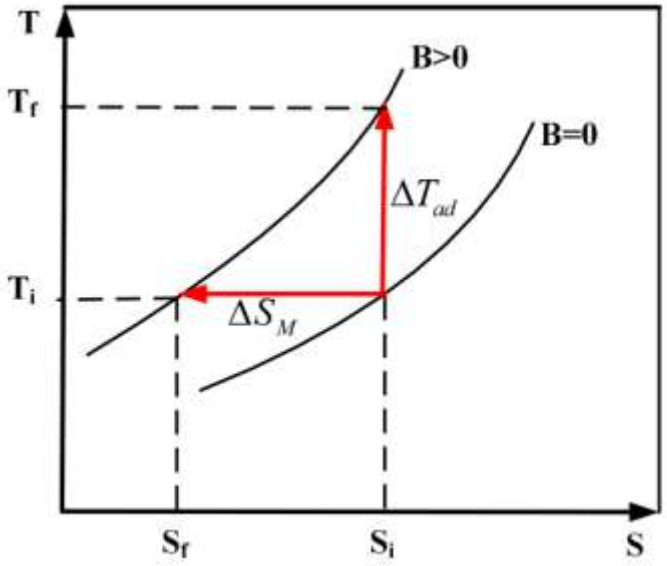



**Figure I. 2.** Variation de la température adiabatique et de l'entropie magnétique pour un champ variant de B = 0 à B > 0

Il convient de souligner que ces dernières années de nombreuses manifestations scientifiques spécialisées sur les recherches en froid magnétique ont été organisées par l'Institut International du Froid (IIF-IIR) à Paris. **(10)**

La première conférence de froid magnétique près de la température ambiante (Thermag) a été organisée en Suisse à Montreux en 2005 par les professeurs Egolf et Sari **(10,11)**, dont les objectifs sont focalisés sur les deux volets suivants :

- Recherches orientées vers le développement de nouveaux matériaux magnétocaloriques visant à remplacer le gadolinium par d'autres matériaux plus performants en satisfaisant les exigences économiques et thermiques
- Recherches orientées vers la conception et le développement de systèmes de réfrigération magnétique de point de vue efficacité et compacité.

Par ailleurs, des recherches intensives dédiées à la problématique de réfrigération magnétique ont en lieu dès la découverte de l'effet magnétocalorique géant en 1997 par Gschnieder et

Pecharsky **(12)**, comme le montre la figure (I.3) dans les composés de Gd5(Ge1−xSix) 4. Sous un champ magnétique de 5T, la variation de l'entropie à TC = 276K dans Gd5Ge2Si2 est de ΔSm = 18.5J/kgK, une valeur presque deux fois supérieure à celle dans le gadolinium (ΔSm = 10J/kgK à TC = 294K). Quelques années plus tard, d'autres matériaux à EMC géant ont été mis au point et investigués, tels que : MnFePA **(13,14)**, LaFeCoSi,, LaFeSiH **(13)**

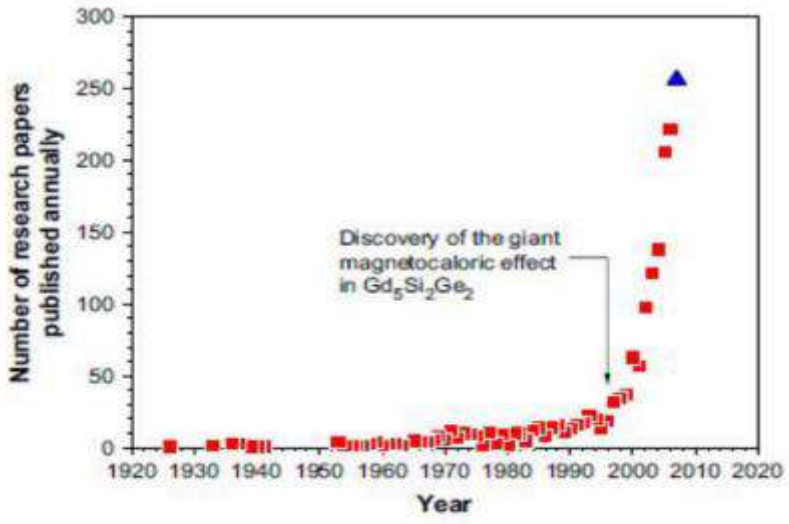



**Figure I. 3.** Évolution des travaux de recherche sur les matériaux magnétocaloriques depuis les années 1925 **(12)**

Les matériaux magnétocaloriques destinés à la réfrigération magnétique proche de la température ambiante doivent présenter un effet magnétocalorique (EMC) important **(13)**, c'est-à-dire avoir des variations de température élevées pour des inductions magnétiques faibles **(13)**. Pour ce faire, il faut qu'ils regroupent deux conditions :

- Une variation de température adiabatique élevée au voisinage de température de transition.
- Une variation d'entropie-magnétique élevée, ceci se traduit par un moment magnétique élevé ou/et une large transition de phase magnétique de premier ordre

Le gadolinium est le matériau magnétique le plus utilisé dans la plupart des systèmes de réfrigération magnétique avant la découverte de l'effet magnétocalorique géant. Bien que ce matériau présente une EMC importante, il présente plusieurs inconvénients : une oxydation facile et un coût élevé. Les recherches actuelles sur les matériaux magnétiques à eet magnétocalorique géant près de la température ambiante ont pour objectif de remplacer le gadolinium par d'autres alliages plus performants et moins chers comme le montre la figure (I.4).

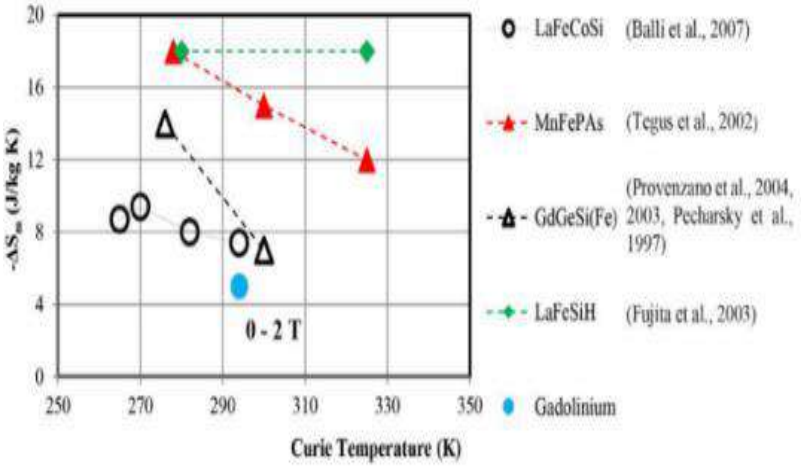



**Figure I. 4.** Revue sur les matériaux magnétocaloriques **(13)**

L'invention des nouveaux matériaux magnétocaloriques encouragent les scientifiques et les secteurs industriels du froid d'investir dans la réfrigération magnétique autour de la température ambiante comme le montre la figure 1.5 (15)

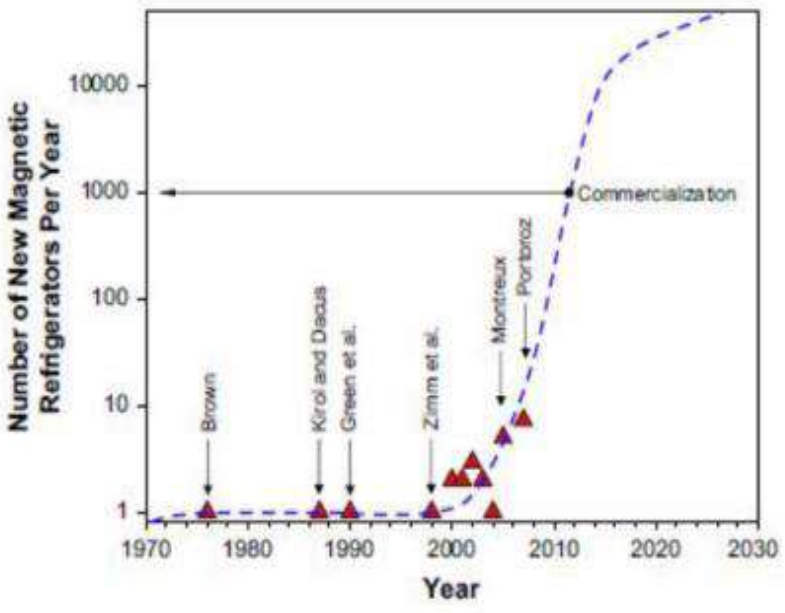



**Figure I. 5.** Évolution des démonstrateurs de réfrigération magnétique réalisés dans le monde **(15)**

## I.2 Principaux démonstrateurs de réfrigération magnétiques

### I.2.A Démonstrateur de NASA, USA

En 1976, Brown **(16,17)** a conçu le premier démonstrateur de réfrigération magnétique près de la température ambiante (figure (I.6)), utilisant des supraconducteurs qui génèrent un champ magnétique de 7T et un régénérateur passif. Il s'agit d'un démonstrateur linéaire constitué d'un bloc de gadolinium perforé pour permettre 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 **(17),** il a pu atteindre un $\Delta T = 80K$ en utilisant le cycle de Stirling avec le même dispositif.

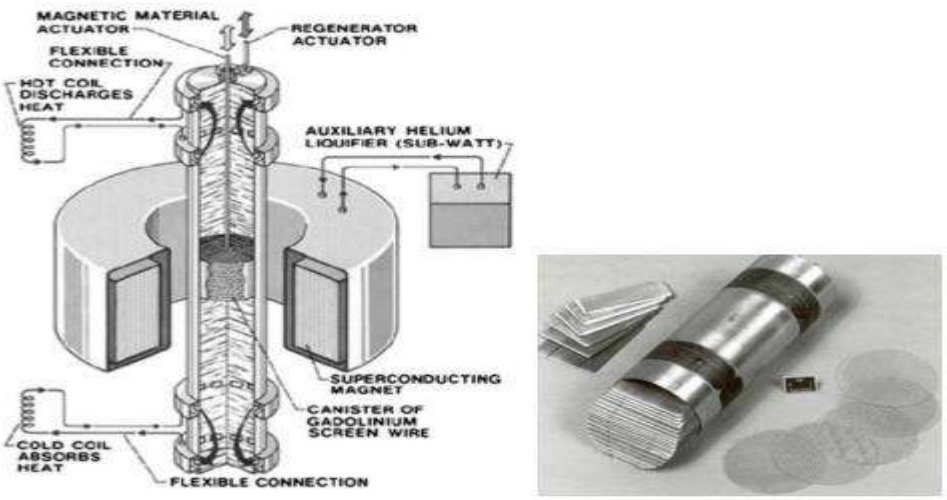



**Figure I. 6.** Démonstrateur de NASA réalisé par Brown et son équipe **(17)**

### I.2.B Démonstrateur de Astronautics USA

En 1997, l'association de l'entreprise Astraunotics avec Ames Laboratory a permis de réaliser un démonstrateur de RM ; il s'agit d'un démonstrateur linéaire opérant près de la température ambiante utilisant des bobines supraconductrices qui génèrent un champ magnétique de 5T avec une masse de gadolinium de 3kg **(15)**. Les tests effectués sur ce démonstrateur pendant 18 mois ont permis de montrer la faisabilité de ce type de réfrigérateur dans le marché de l'industrie frigorifique fournissant une puissance de l'ordre de 600W. En 2001, l'équipe de Astronautics ont réussi à réaliser un prototype rotatif produisant une puissance de 95W avec un écart de température de l'ordre de 20°C, en utilisant des aimants permanents qui génère un

champ magnétique de 1.5T et de Gd sous forme de sphères comme matériau magnétocalorique.

En 2005 l'équipe d'Astronautics **(15)** a modifié le démonstrateur rotatif de source magnétique 1.5T en introduisant de nouveaux matériaux magnétocaloriques, à savoir ; le Gd, Gd-Tb et LaFeSiH sous forme sphérique permis d'atteindre un écart de température de 25C avec une puissance de 50W.

En 2007, l'équipe d'Astronautics **(15)** a réussi à construire un nouveau démonstrateur rotatif qui utilise le Gd sous forme de plaques parallèles comme réfrigérant magnétique et une source d'aimant permanent de 1.4T type Halbach. Le démonstrateur a permis de produire des puissances plus élevées de l'ordre de 220W avec un écart de température de 11°C

Récemment, dans la conférence Thermag V à Grenoble, l'équipe de Astronautics USA a présenté



**Figure I. 7.** Démonstrateur de RM développé récemment par Astronautics **(18)**

### I.2.C Démonstrateur de chubu Electric/Toshiba

En 2000, la collaboration de Chubu Electics avec l'entreprise Toshiba **(15)** a permis de réaliser un démonstrateur linéaire à base de gadolinium sous forme de sphères en utilisant des supraconducteurs pour générer un champ magnétique de 4T ; ils ont obtenu 100W de puissance avec un écart de température de l'ordre de 21°C. Par ailleurs, pendent les années 2002 et 2003 Hirano et son équipe ont réussi d'atteindre une puissance de 40 à 60 W avec un écart de température de l'ordre de 10 à 27 °C en utilisant des aimants permanents **(15,19)**. En 2006, l'entreprise Chubu Electics et Tokyo institute of technology ont conçu un autre démonstrateur rotatif (figure (1.8)) 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 **(15)**.

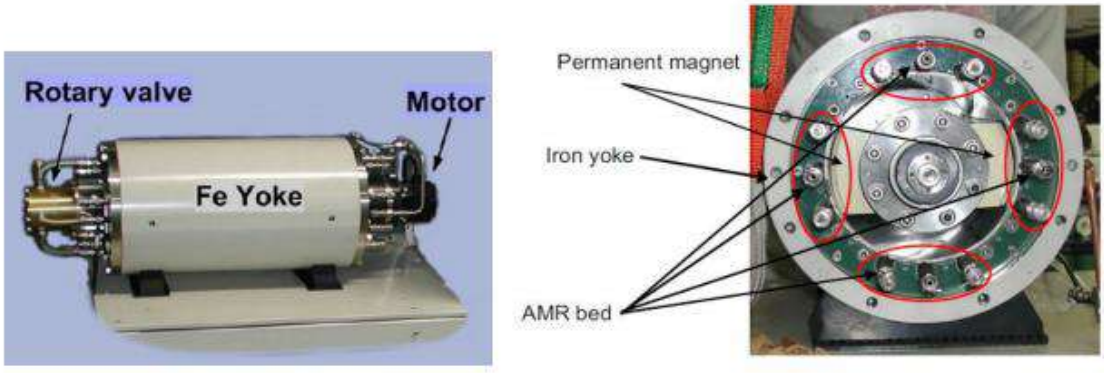



**Figure I. 8.** Démonstrateur de RM développé par Chubu electric/Toshiba **(19)**

### I.2.D Démonstrateur de University of Victoria

Les travaux de collaboration entre Victoria University et Cryofuel Systems ont permis d'élaborer un démonstrateur en 2002 **(15)**. Il s'agit d'un prototype linéaire à base de gadolinium et gadolinium terbium utilisant des bobines supraconductrices qui génèrent un champ magnétique de 2T. Ce démonstrateur est entraîné par un moteur rotatif relié à un système mécanique ce qui permet de convertir la rotation du moteur en mouvement linéaire du régénérateur. En 2005, l'équipe de University of Victoria **(15)** ont construit un nouveau prototype à base des matériaux magnétocaloriques suivants : gadolinium et gadolinium-terbium sous forme multicouches avec les mêmes caractéristiques précédentes ce qui permet d'atteindre une puissance de l'ordre de 10W au cours de l'année 2006 avec un écart de température entre la source chaude et la source froide autour de 50°C **(20)**

Il convient de souligner que des recherches intensives au sein de l'University of Victoria ont permis de construire un prototype linéaire dont le champ magnétique est généré par des aimants permanents de l'ordre 1.4T, et un régénérateur magnétique constitué de gadolinium sous formes sphériques a été utilisé avec de l'eau comme fluide caloporteur, ce qui a permis d'atteindre un écart de température de l'ordre de 13°C. En 2011, Tura et Rowe **(21)** ont publié les tests préliminaires de performance de la machine qui sont comme suit : un COP de 1.6 pour une utilisation de 1.28, 1.4Hz de fréquence et un écart de température pouvant atteindre les 29°C.

En 2014, l'équipe de University of Vicoria ont proposé une nouvelle conception du réfrigérateur magnétique (figure (I.9)) ; il s'agit d'un système rotatif fonctionnant à base des aimants type Halbach qui génèrent un champ magnétique de 1.47T. Un écart de température sans charge de l'ordre de 33°C a été observé et une puissance frigorifique environ de 96W a été enregistrée dont le fluide caloporteur utilisé est de l'eau et le matériau magnétocalorique utilisé est le Gd sous une fréquence de 0.8Hz et une masse de 650g **(22)**

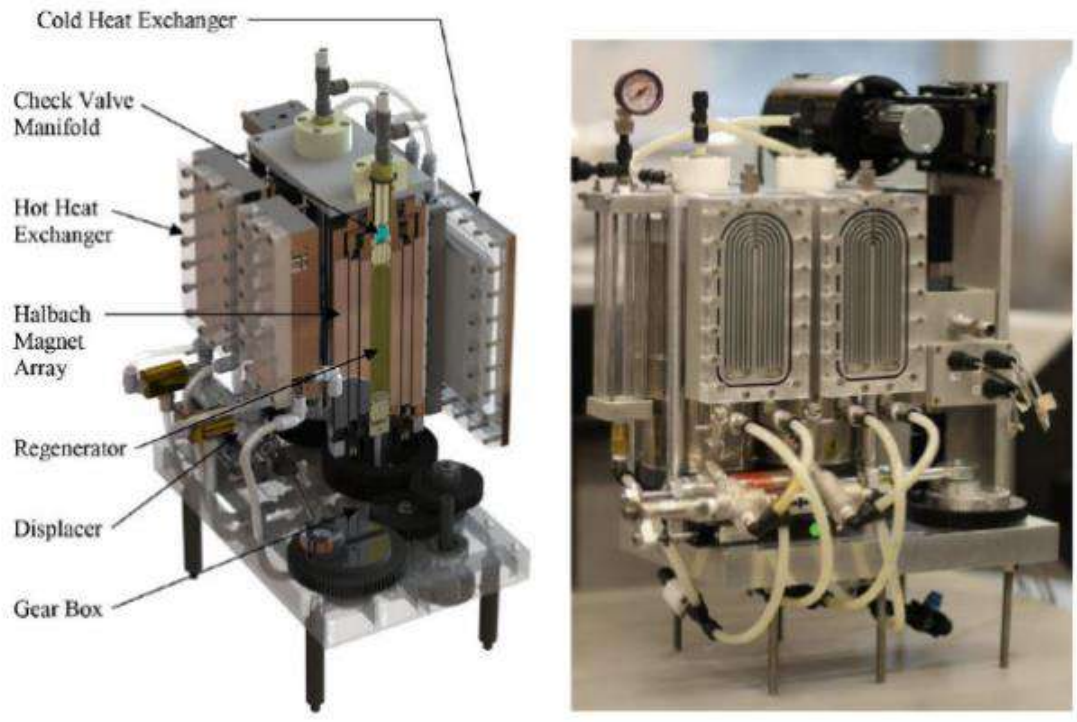



**Figure I. 9.** Nouveau démonstrateur de RM développé par University of Victoria **(22)**

### I.2.E Démonstrateur de G2Elab, Grenoble

Le démonstrateur de laboratoire de génie électrique de Grenoble (G2Elab) en 2003 **(15,17)** ; il s'agit d'un démonstrateur linéaire opérant près de la température ambiante utilisant des aimants type Halbach qui génèrent un champ magnétique de 0.8T. La puissance obtenue est de l'ordre de 8.8W avec un écart de température de l'ordre de 4°C dont le matériau magnétocalorique utilisé est le Gd. En 2005 Allab et al. **(23)** ont rapporté dans leur travail un écart de température de ΔT = 4°C dont la fréquence est de 0.5Hz. En 2009, l'équipe G2Elab a réussi à obtenir un écart de température de l'ordre de ΔT = 7.8°C avec les mêmes caractéristiques signalés précédemment **(17)**. Des recherches intensives au sein de laboratoire d'électrotechnique sous la direction du professeur Lebouc ont permis d'obtenir récemment un écart de température de ΔT = 10.5°C **(24)** dont les matériaux magnétocaloriques utilisés sont Pr0.65Sr0.35MnO3, La (Fe, Co)13−x Six, et Gd, qui ont fait l'objet de la dernière conférence de Thermag en Grenoble **(10)**.

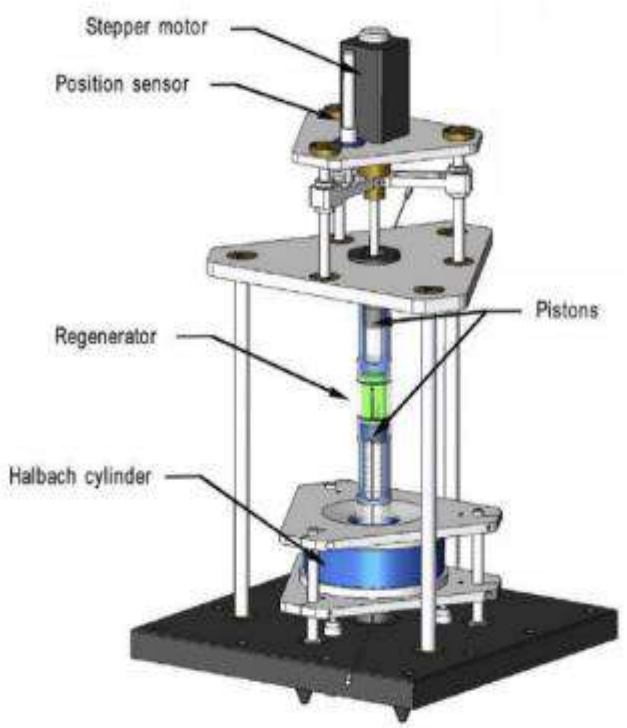



**Figure I. 10**. Démonstrateur de RM de G2Elab **(24)**

### I.2.F Démonstrateur de Cooltech Applications

Cooltech Application est une compagnie française spécialisée dans l'industrie du froid, le premier démonstrateur conçu par cette société en collaboration avec l'université de INSA, Strasbourg, France est né au cours de l'année 2005, comme il a été rapporté par Vasile and Müller **(17)**. Il s'agit d'un prototype rotatif à base de gadolinium sous forme de plaques planes utilisant des aimants permanents qui génèrent un champ magnétique de 2.4T, dans un premier temps, ils ont obtenu un écart de températures de $\Delta T = 14°C$ avec une puissance frigorifique autour de 360W. Lors de la dernière conférence de Thermag ayant lieu à Grenoble **(10)**, il a été également rapporté que l'équipe de Cooltech a réussi d'atteindre des écarts de température de 39°C avec un champ magnétique de 0.85T et une fréquence de 2Hz **(25)**.

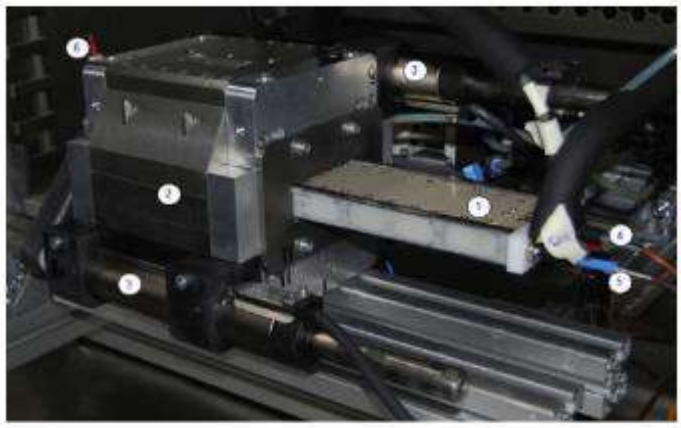


**Figure I. 11.** Démonstrateur de RM de la société Cooltech Applications **(25)**

### I.2.G Démonstrateur de University of Western Switzerland

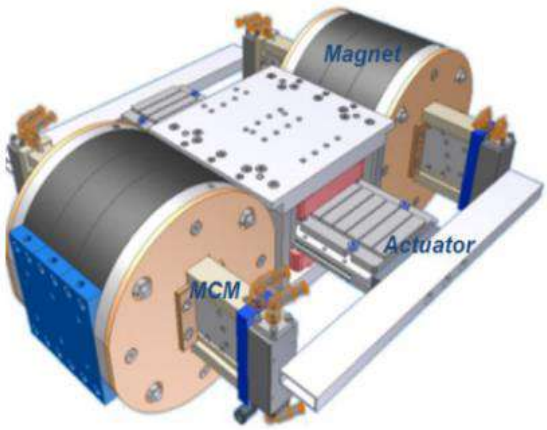



**Figure I. 12.** Démonstrateur de RM linéaire développé par HES-SO en 2010 : Cristal-1 **(26)**

En 2006, Sari et Egolf **(26)** ont publié les résultats de leur démonstrateur rotatif (figure I.12) qui est différent par rapport aux autres démonstrateurs de point de vue conception et fonctionnement. Il s'agit d'un démonstrateur rotatif utilisant le gadolinium et l'air comme fluide caloporteur, ainsi l'écart de température maximum envisagé entre les deux sources est de 1°C pour un champ magnétique de 1 Tesla. En 2010, l'équipe de TiS-HES-SO dirigée par le professeur Sari a mis au point un nouveau prototype (figure I.13) **(27)**.

La particularité de ce dernier réside dans sa compacité, sa simplicité et la technologie utilisée dans la conception des sources de champ magnétique, ce qui conduit à un grand avantage dans l'industrie de froid. Il s'agit d'un démonstrateur linéaire à base d'aimants permanents qui génèrent un champ magnétique de 1.45T dont le matériau magnétocalorique utilisé est le gadolinium avec de l'eau comme fluide caloporteur. Ainsi, ce démonstrateur constitué de deux sources de champ magnétique conçus d'une façon à minimiser les forces magnétiques d'environ de 90% ; ce qui permet d'économiser l'énergie consommée au niveau du moteur. Récemment des améliorations importantes

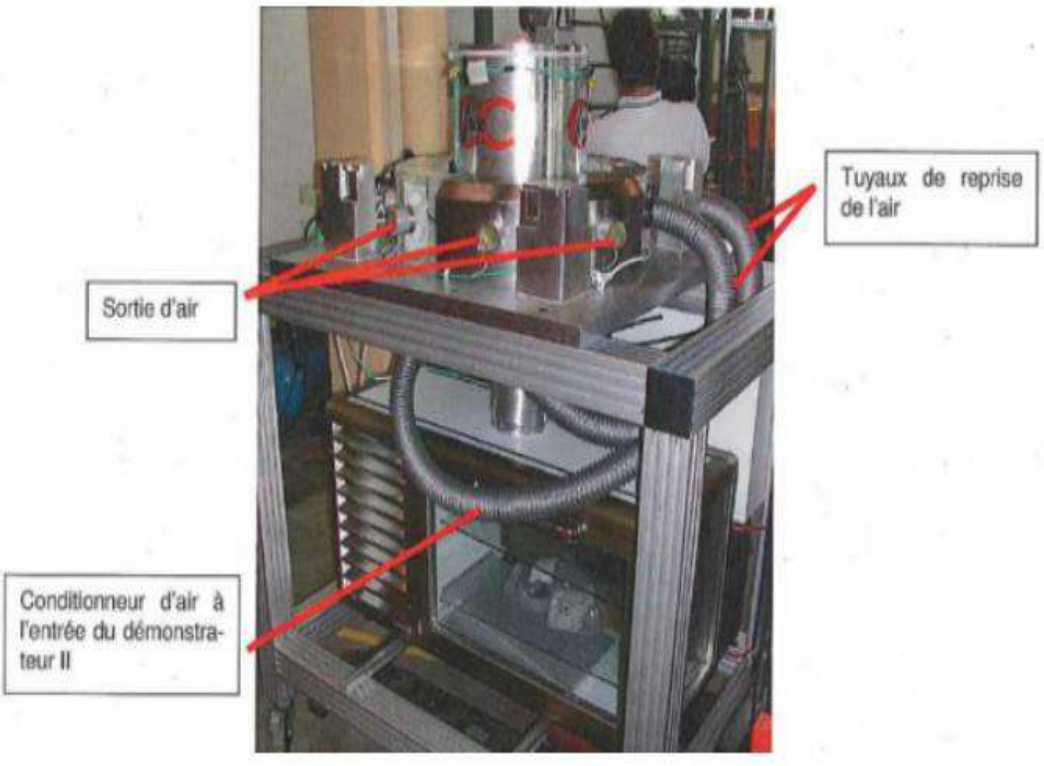



**Figure I. 13.** Démonstrateurs de RM rotatif développé par HES-SO (Sari et al. 2006)

Ont été introduites sur cette machine pour augmenter sa performance (figure (I.14)) ce qui permet d'avoir des écarts de température qui pouvaient dépassés les 32°C, comme le montre la figure (I.15) **(13)**.

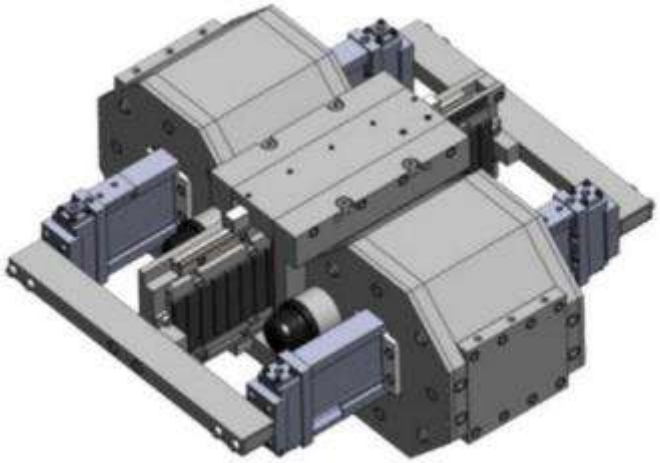


**Figure I. 14.** Démonstrateur de RM linéaire développé par HES-SO en 2012 : Cristal-2 **(13)**

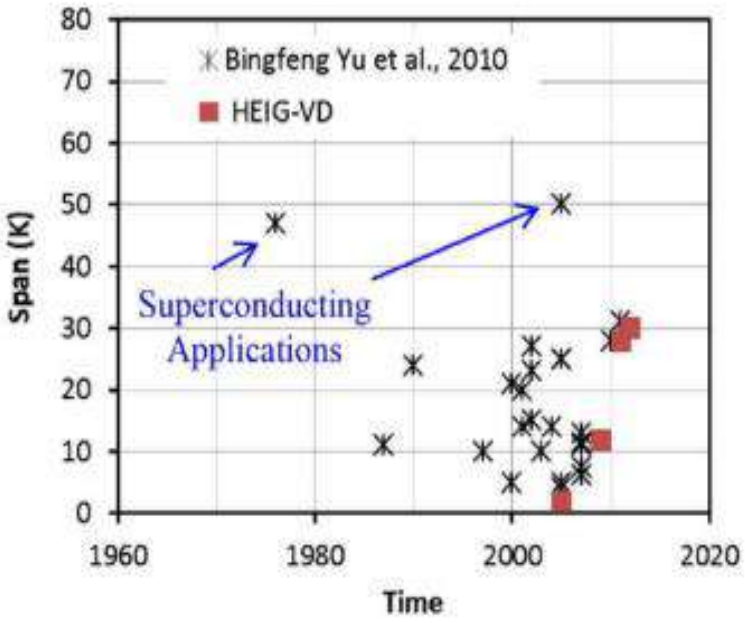



**Figure I. 15.** Évolution des écarts de température entre la source chaude et froide de démonstrateurs de HE-ESO par rapport aux autres démonstrateurs conçus dans le monde **(13)**

### I.2.H Autres démonstrateurs

Parmi les démonstrateurs qui sont construits récemment, on cite celui de Riso en Danemark par l'équipe de Riso DTU **(28)**. 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. D'autre part, ces derniers résultats obtenus par l'équipe des Danois ont été confirmés par le travail de Bahl et al. Qui a été présenté d'abord dans la conférence internationale de réfrigération magnétique près de la température ambiante en septembre 2012 à Grenoble, Thermag V puis récemment publié **(29)**. En somme, plusieurs d'autres prototypes de réfrigération magnétique opérant près de la température ambiante ont été conçus comme le rapporte les travaux réalisés par Gschneidner Jr et al.2008 **(15)**, Yu et al.2010 **(17)**, Romero Gómez et al.2013 **(30)** et Aprea et al.2013 **(31)**.

## I.3 Considérations physiques et thermodynamiques

Pour la description de l'eet magnétocalorique d'un matériau magnétocalorique soumis à un champ magnétique, il est nécessaire de définir certaines fonctions qui caractérisent les propriétés thermodynamiques **(32)**. L'énergie interne d'un système suivant le premier principe de la thermodynamique est décrit par la relation :

$$dU = \delta Q + \delta W \qquad (\mathbf{I.1})$$

Où $\boldsymbol{\delta Q}$ et $\boldsymbol{\delta W}$ représentent respectivement la quantité de chaleur échangée et le travail fourni par le système. Introduisant les relations suivantes :

$$\delta Q = TdS \quad (\mathbf{I.2})$$

$$\delta W = -MdB = -BdM \quad (\mathbf{I.3})$$

L'équation (I.1) devient

$$dU = TdS - MdB = TdS - BdM \quad (\mathbf{I.4})$$

L'énergie libre d'un système est exprimée par la relation :

$$F = U - TS \quad (\mathbf{I.5})$$

La dérivée totale de l'énergie libre peut s'écrire selon l'équation :

$$dF = -SdT - MdB \quad (\mathbf{I.6})$$

L'enthalpie libre d'un système est exprimée par la relation :

$$G = H - TS \quad (\mathbf{I.7})$$

Où l'enthalpie peut s'exprimer par l'expression :

$$H = U + pV \quad (\mathbf{I.8})$$

La dérivée de l'enthalpie et de l'enthalpie libre sont données comme suit : Pour le cas du solide :

$$dH = dU \quad (\mathbf{I.9})$$

L'utilisation des relations (I,4), (I,7) et (I,9) donne :

$$dG = dH - TdS - SdT = -SdT - MdB = -SdT - BdM \quad (\mathbf{I.10})$$

L'entropie, le moment magnétique, la pression et le volume peuvent s'écrire en fonction des dérivées partielles de l'énergie libre et l'enthalpie libre comme suit :

$$\boldsymbol{S}(T,B,V) = -\left(\frac{\partial F}{\partial T}\right)_{B,V} \quad (\mathbf{I.11})$$

$$M(T,B,V) = -\left(\frac{\partial F}{\partial B}\right)_{T,V} \quad (\mathbf{I.12})$$

$$p(T,B,V) = -\left(\frac{\partial F}{\partial V}\right)_{T,B} \quad (\mathbf{I.13})$$

$$S(T,B,p) = -\left(\frac{\partial G}{\partial T}\right)_{B,p} \quad (\mathbf{I.14})$$

$$M(T,B,p) = -\left(\frac{\partial G}{\partial B}\right)_{T,p} \quad (\mathbf{I.15})$$

$$V(T,B,p) = \left(\frac{\partial G}{\partial p}\right)_{T,B} \quad (\mathbf{I.16})$$

$$B = \left(\frac{\partial G}{\partial M}\right)_{T,p} \quad (\mathbf{I.17})$$

La combinaison des équations (I.14) et (I.15), (I.16) et (I.17) permet de définir les équations de Maxwell

$$\left(\frac{\partial S}{\partial B}\right)_{T,p} = \left(\frac{\partial M}{\partial T}\right)_{B,p} \quad (\mathbf{I.18})$$

$$\left(\frac{\partial S}{\partial M}\right)_{T,p} = -\left(\frac{\partial B}{\partial T}\right)_{M,p} \quad (\mathbf{I.19})$$

La chaleur spécifique d'une substance peut s'écrire suivant la relation :

$$c = T\left(\frac{\partial S}{\partial T}\right) \quad (\mathbf{I.20})$$

La dérivée totale de l'entropie en fonction des paramètres température, champ et pression est définie comme suit :

$$dS = \left(\frac{\partial S}{\partial T}\right)_B dT + \left(\frac{\partial S}{\partial B}\right)_T dB \quad (\mathbf{I.21})$$

Pour une transformation isentropique l'équation (I.21) devient

$$\frac{C_B}{T} dT = -\left(\frac{\partial M}{\partial T}\right)_B dB \quad (\mathbf{I.22})$$

La dérivée totale de température donne :

$$dT = -\frac{T}{C_B}\left(\frac{\partial M}{\partial T}\right)_B dB \quad (\mathbf{I.23})$$

Intégration de l'équation (I.23) dénie l'effet magnétocalorique :

$$\Delta T_{ad} = -\int_0^B \frac{T}{C_B}\left(\frac{\partial M}{\partial T}\right)_B dB \quad (\mathbf{I.24})$$

## I.4 Théorie du champ moléculaire

Le modèle de Weiss est fondé sur le théorème de champ moléculaire (mean field theory) qui permet de déterminer l'effet magnétocalorique et les propriétés thermomagnétiques des matériaux magnétocaloriques selon les bases de magnétisme et les relations thermodynamiques. Les caractéristiques importantes d'un matériau magnétique sont son entropie totale et l'entropie de son sous-système (l'entropie magnétique, l'entropie de réseau et l'entropie électronique) qui peut être modifiée par la variation du champ magnétique. Les relations suivantes décrivent les propriétés thermomagnétiques d'un matériau magnétocalorique de seconde d'ordre **(33, 32)** :

$$S(B,T) = S_M(B,T) + S_l(B,T) + S_e(T) \quad (\mathbf{I.25})$$

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

$$S_M(B,T) = R\left[\ln\sinh\left(\frac{2J+1}{2J}x\right) - \ln\sinh\left(\frac{1}{2J}x\right) - XB_J(x)\right] \quad (\mathbf{I.26})$$

Avec :

$$X = \frac{g_J J \mu_B}{k_B T} + \frac{3T_C J B_J(x)}{T(J+1)} \quad (\mathbf{I.27})$$

Où, $\mu_B$ est la magnéto de Bohr, $g_J$ est le facteur de Landé, J est le nombre quantique du moment angulaire total et $k_B$ est la constante de Boltezmann.

Et

$$B_J(x) = \frac{2J+1}{2J}\coth\left(\frac{2J+1}{2J}x\right) - \frac{1}{2J}\coth\left(\frac{1}{2J}x\right) \quad (\mathbf{I.28})$$

Est la fonction de Brillouin :

$$S_l(B,T) = R\left[-3\ln\left(1-e^{\frac{T_D}{T}}\right) + 12\left(\frac{T}{T_D}\right)^3 \int_0^{\frac{T_D}{T}} \frac{x^3}{e^x-1}dx\right] \quad (\mathbf{I.29})$$

Où, $T_D$ est la température de Debye.

$$S_e(T) = \gamma T \quad (\mathbf{I.30})$$

Où, $\gamma$ est le coefficient de capacité calorifique électronique. La chaleur spécifique d'un matériau magnétocalorique peut se calculer suivant la relation suivante

$$C(B,T) = T\left(\frac{\partial S}{\partial T}\right)_B \quad (\mathbf{I.31})$$

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

$$\Delta T_{ad} = -\int_{B_i}^{B_f} \frac{T}{c(B,T)}\left(\frac{\partial S}{\partial B}\right)_T dB \quad (\mathbf{I.32})$$

## I.5 Matériaux magnétocaloriques

Généralement, on distingue deux types de matériaux magnétocaloriques utilisés en réfrigération magnétique : matériaux de premier ordre et matériaux de seconde d'ordre **(31, 34, 35)**. Le gadolinium (Gd) est un matériau de terres rares de second d'ordre qui cristallise sous forme hexagonale à la température ambiante.

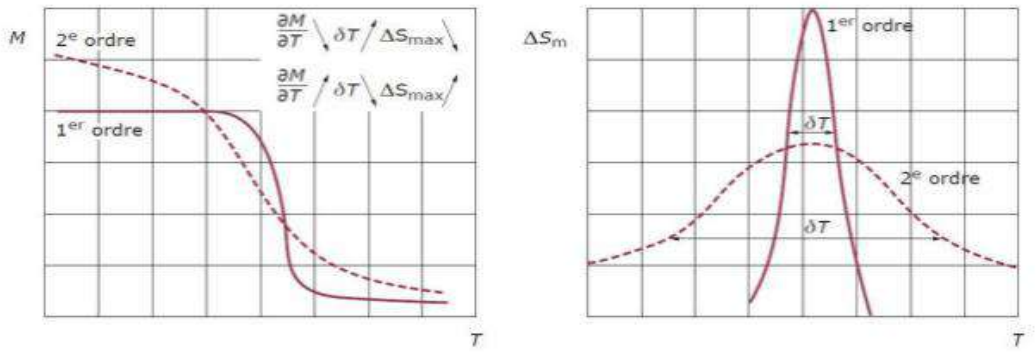



**Figure I. 16.** Types de matériaux magnétocaloriques **(34)**

Il est utilisé dans plusieurs domaines comme la supraconductivité, l'imagerie par résonnance magnétique nucléaire (RMN) etc. Le gadolinium présente un comportement ferromagnétique à basses températures. Au voisinage de la température ambiante, plus précisément à sa température de Curie (TC = 294K), il change de phase magnétique et devient paramagnétique. Ce changement de phase qualité de second ordre est accompagné par une forte variation de l'entropie du matériau, d'où l'intérêt suscité dans le domaine de la réfrigération magnétique au voisinage de la température ambiante. A la température de Curie et sous l'application d'un champ magnétique externe, le Gd passe d'un état magnétique désordonné à un état ordonné, ce qui diminue l'entropie magnétique et augmente l'agitation du réseau atomique et par conséquent augmente la température du matériau. Ce fort pouvoir magnétocalorique, fait de Gd une référence pour les matériaux magnétocaloriques. Précédemment, le Gd est parmi les matériaux le plus utilisé dans la majorité des systèmes de réfrigération magnétique, mais son prix trop élevé, son oxydation facile et son application limitée à la température ambiante ont poussé des chercheurs à recourir à de nouveaux matériaux moins dispendieux, plus propres et performants.

Aujourd'hui, les recherches sur les matériaux à EMC géant autour de la température ambiante s'orientent vers des transitions de phase du premier ordre qui offrent une large variété de compositions à explorer. Il s'agit de trouver des compositions permettant de disposer d'une EMC élevée sous un champ magnétique faible **(34)**. Compte tenu de l'équation de la variation de l'entropie magnétique (I.24) décrite précédemment et caractérisant le comportement magnétocalorique, une EMC géante peut être obtenu même pour une densité de moments magnétiques faibles en jouant sur la nature de la transition de phase comme le montre la figure (I.16). En effet, une transition du premier ordre (brusque) peut amplifier considérablement la variation de l'entropie. Cela ne peut se faire cependant qu'au détriment de la plage de température d'utilisation $\delta T$ qui s'en trouve réduite **(34)**.

La figure (I.17) montre clairement la variation de l'entropie magnétique et la température adiabatique pour les différents matériaux magétocaloriques utilisés en réfrigération magnétique, ce qui permet de choisir tout simplement les matériaux appropriés.

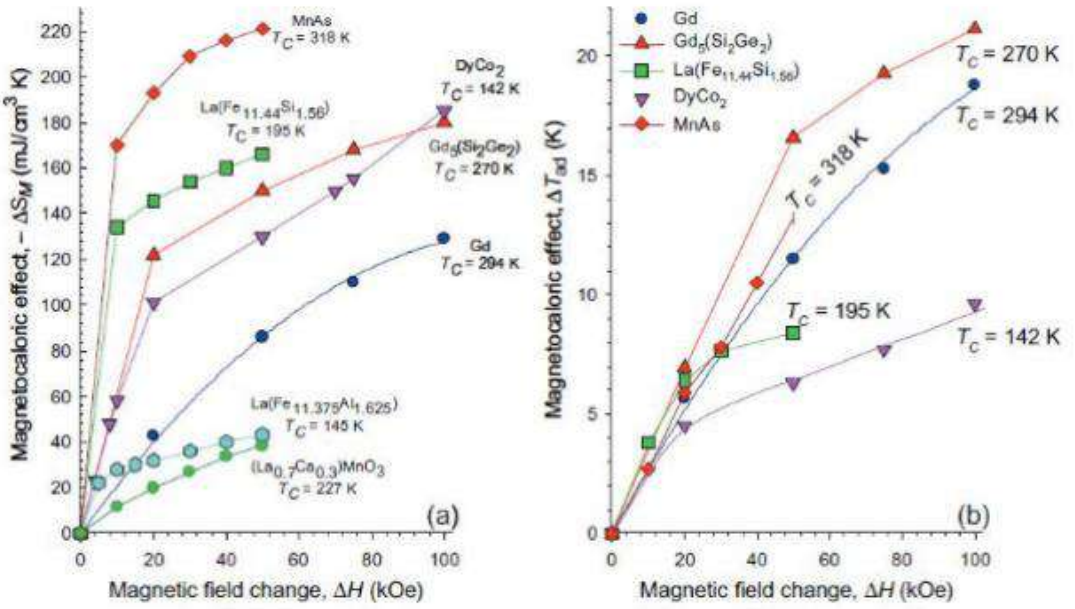



**Figure I. 17.** Variation de l'effet magnétocalorique et l'entropie magnétique en fonction de fonction de champ magnétique pour différents matériaux magnétocaloriques **(12)**

## I.6 Critères de sélection de réfrigérant magnétique et de fluide caloporteur

La performance d'un système de réfrigération magnétique dépend du fluide caloporteur, du réfrigérant, du type de cycle et de la source de champ magnétique. Pour avoir un réfrigérateur magnétique rentable et efficace, certaines conditions et critères sont requis :

- Grandes valeurs de changement d'entropie magnétique et de température adiabatique
- La température de transition appropriée doit être comprise dans l'intervalle de fonctionnement du réfrigérateur
- Un coût réduit du réfrigérant solide
- Une bonne stabilité chimique
- Absence de l'hystérésis et de corrosion.
- Faible impact sur l'environnement
- Bonnes propriétés mécaniques
- Haute résistance électrique afin d'éviter des courants de Foucault dans les processus de changement rapide dans le champ magnétique
- Une faible capacité calorifique et haute conductivité thermique du fluide caloporteur pour favoriser le transfert de chaleur avec le réfrigérant magnétique
- Une faible viscosité du fluide pour minimiser les pertes de charge
- Non toxique et non corrosif

# CHAPITRE II

## modéle mathématique

## II.1 Introduction

Le premier cycle de réfrigération magnétique à régénération active (AMR) a été décrit en 1983 par Barclay **(37)**. Ce dernier a montré qu'il était possible d'atteindre des écarts de températures bien supérieurs entre la source chaude et la source froide suivant la variation de l'effet magnétocalorique du matériau magnétique en l'utilisant simultanément comme un régénérateur et réfrigérant. Plus tard, plusieurs travaux de recherches ont été effectués pour modéliser, simuler ou tester **(15, 17)** les matériaux magnétocaloriques dans les différents prototypes construits dans le monde. Récemment, de nombreux travaux entamés ce domaine de recherche en vue d'améliorer la rentabilité de ces systèmes et de mettre en œuvre de nouveaux matériaux magnétocaloriques, comme le montre à titre d'exemple, les travaux suivants : Smaïli [9], Rosca **(38)**, Balli **(39)**, Allab **(40)**, Bouchekara **(41)**, Roudaut **(42)**, Dupuis **(43)**, Sarlah **(44)** et Engelbrecht **(45)**. Les cycles thermodynamiques ont fait l'objet des recherches proposés récemment en réfrigération magnétique comme indiqué dans les travaux antérieurs **(35, 46)**. Ainsi les derniers travaux de Kitanovski **(47)** qui insistent sur la nécessité d'introduire de nouveau cycles thermodynamiques an d'améliorer le rendement des démonstrateurs ainsi que les pertes en travail magnétique.

## II.2 Cycles de réfrigération magnétique

### II.2.1 Cycle magnétique de Carnot

La Figure (II.1) représente le schéma de base d'un réfrigérateur magnétique à régénération externe fonctionnant suivant le cycle Carnot. Il consiste en deux transformations isothermiques et deux transformations isentropiques. Celles-ci sont dénies comme suit ; 1 → 2 : Aimantation isentropique, elle est due à l'application adiabatique du champ, par conséquent la température augmente jusqu'à TH.

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

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

-4 → 1 : Absorption de chaleur au niveau de la source froide à la température TC dénoté par QC, en démagnétisant le réfrigérant d'une façon isotherme à la température TC Le rendement du cycle de Carnot est donné par l'expression suivante :

Cop $= \frac{1}{\frac{T_H}{Tc} - 1}$ 2.1

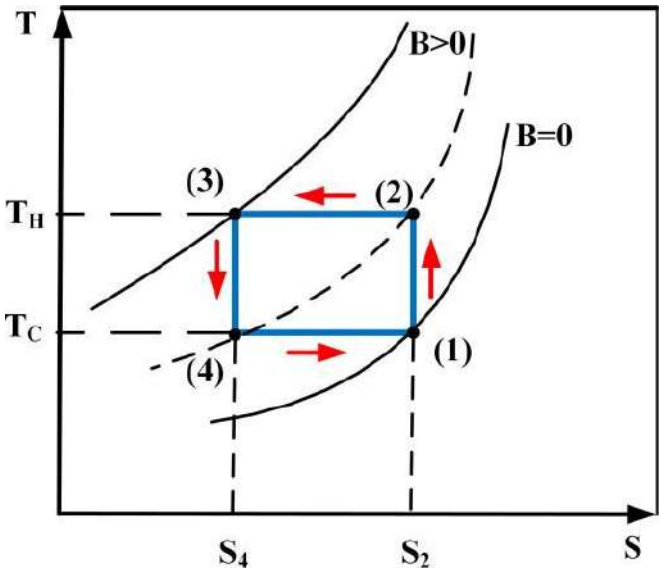



**Figure II. 1.** Cycle magnétique de Carnot

### II.2.2 Cycle magnétique d'Ericsson

La Figure (II.2) représente le schéma de base d'un réfrigérateur magnétique à régénération externe fonctionnant suivant le cycle d'Ericsson. Il consiste en deux transformations isothermiques et deux transformations iso champs **(48)**. Celles-ci sont dénies comme suit :

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

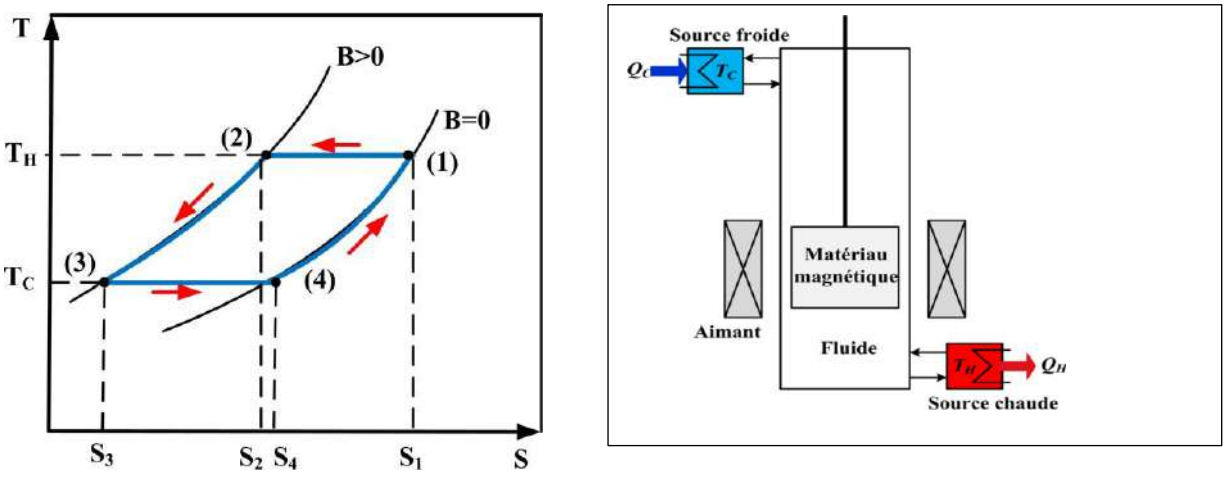



**Figure II. 2.** Cycle magnétique d'Ericsson

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

$$COP = \frac{Q_C}{W_{mag} + T_H \cdot \Delta S_{Irr}} \qquad \text{II.2}$$

Où, $\Delta_{SIrr}$ est la génération d'entropie. et $W_{mag}$ est le travail magnétique donné par

$$W_{mag} = Q_H - Q_C \qquad \text{II.3}$$

Dautre part, on a :

$$Q_C = T_C \Delta S_C \qquad \text{II.4}$$

$$Q_H = T_H \Delta S_H \qquad \text{II.5}$$

où $\Delta_{SC}$, $\Delta_{SH}$ représentent les changements d'entropie isothermes produits respectivement aux sources froides et chaudes. En pratique, tous les cycles sont irréversibles car n'existe pas de transformation sans production d'entropie (pertes thermiques) ce qui permet d'écrire d'après le deuxième principe de la thermodynamique l'inégalité

$$\Delta S_H \geq \Delta S_C \qquad \text{II.6}$$

OÙ

$$\Delta S_H = \Delta S_C + \Delta S_{Irr} \qquad \text{II.7}$$

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

$$COP = \frac{T_C \Delta S_C}{T_H \Delta S_H - T_C \Delta S_C + \Delta S_{Irr}} \qquad \text{II.8}$$

Pour une transformation réversible, i.e. ΔS = Cste, le COP d'Ericsson devient égal à celui de cycle de Carnot

$$COP = \frac{T_C}{T_H - T_C} \qquad \text{II.9}$$

### II.2.3 Cycle magnétique de Barytone :

La Figure (II.3) représente le schéma de base d'un réfrigérateur magnétique à régénération externe fonctionnant suivant le cycle Brayton. Il consiste en deux transformations deux adiabatiques et deux transformations isochamps **(49 ;50)**. Celles-ci sont dénies comme suit : Les processus thermodynamiques de ce cycle sont définis comme suit ;

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

$$Q_H = -\int_e^{T_H+\Delta T(\Delta B,T_H)} c_B(B,T)dT \qquad \text{II.10}$$

3 → 4 : Démagnétisation adiabatique qui résulte de l'abaissement de la température du matériau magnétique dans le sens négatif de variation de température adiabatique ΔT(ΔB, TC) et cela peut

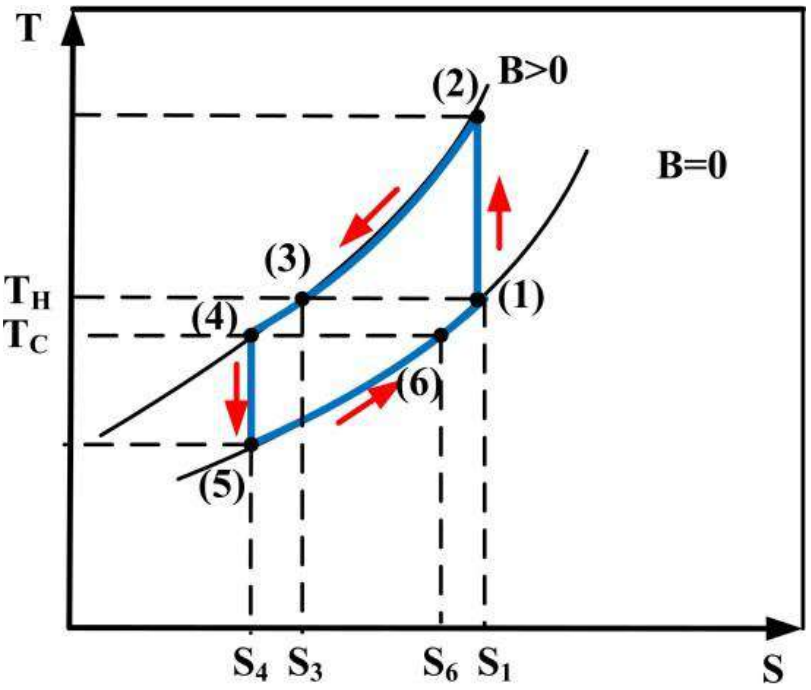



**Figure II. 3.** Cycle magnétique de Brayton

S'écrire comme suit :

$S\ (0, T_C + \Delta T\ (\Delta B, T_C)) = S\ (B, T_C)$ *II.11*

4 → 5 : La chaleur est absorbée au niveau de la source froide QC

$$Q_C = \int_{T_C - \Delta T(\Delta B, T_C)}^{T_C} c_B(0,T)dT$$ II.12

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

$$Q_{rf} = \int_{T_H}^{T_C} c_B(B,T)dT$$ II.13

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

$$Q_{fr} = \int_{T_C}^{T_H} c_B(0,T)dT$$ *II.14*

6 → 1 : Magnétisation adiabatique qui résulte l'accroissement de la température de matériau magnétique dans le sens positif de variation de température adiabatique ΔT (ΔB, TH) et cela p

S'écrire comme suit :

$$S(0,T_H) = S\big(B, T_H + \Delta T(\Delta B, T_H)\big)$$ II.15

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

$dU = \delta Q + \delta W$ II.16

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

$$W = -\big(Q_C + Q_H + Q_{rf} + Q_{fr}\big)$$ II.17

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

$$COP = \frac{Q_C}{W}\quad .$$ II.18

**II.3 Étude du cycle AMR**

**2.3.1 Description du cycle AMR**

La figure (II.4) représente le schéma de principe d'un réfrigérateur magnétique active comprend quatre transformations suivantes : 1. Aimantation adiabatique du matériau : elle est provoquée par l'application du champ magnétique, d'où l'augmentation de la température du matériau. 2. Réchauffement du fluide circulant à travers le régénérateur à champ constant : le

fluide entre à une température égale TC (celle de la source froide), en échangeant de la chaleur avec le matériau, la température de fluide augmente et devient égale à $T_f$,$T_H$ , à la sortie (source chaude). Ainsi, en passant à travers l'échangeur de chaleur à la source chaude, le fluide rejette la quantité de chaleur QH 3. Désaimantation adiabatique du matériau : elle est due à l'enlèvement adiabatique du champ, par conséquent la température diminue. 4. Refroidissement du fluide s'écoulant à travers le régénérateur à champ nul : à l'entrée la température de fluide est égale à TH (celle de la source chaude), en échangeant de la chaleur avec le matériau elle diminue à $T_f$ ,$T_C$ à la sortie. En traversant l'échangeur de chaleur à la source froide, le fluide peut absorber la quantité de chaleur Q

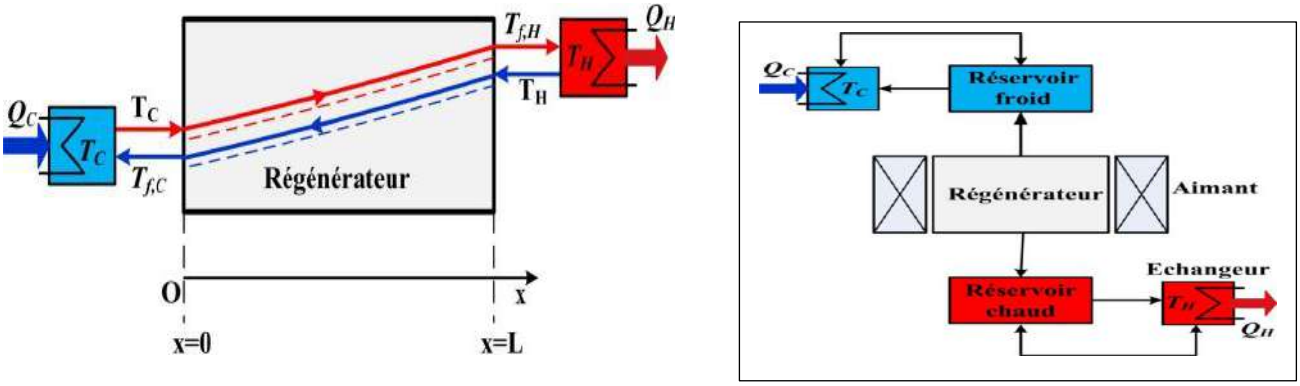



**Figure II. 4.** Cycle de réfrigérateur AMR L'efficacité du cycle de réfrigération magnétique active est donné par la relation

$$COP=\frac{Qc}{W^{\cdot} mag + W^{\cdot} P + W^{\cdot} F}$$

où, $W^{\cdot}_{mag}$ , $W^{\cdot}_{P}$ , $W^{\cdot}_{F}$ et $Q_C$ représentent le travail magnétique, travail fourni par la pompe, les pertes dus aux courants de Foucault et la puissance frigorifique respectivement.

$$\int \vec{F}.\overrightarrow{dl} \qquad \text{II.20}$$

$$Wp = V\frac{\Delta P}{\eta P} \qquad \text{II.21}$$

$$Qc = mf.cf(Tc - Tfc) \qquad \text{II.22}$$

### II.3.2 Bref historique des modèles de cycle AMR

Récemment, plusieurs travaux ont été réalisés sur la simulation numérique des dispositifs de réfrigération magnétique près de la température ambiante, dans le cas monodimensionnel et bidimensionnel. Le Tableau II.1, récapitule les principaux travaux publiés pour les modèles numériques du cycle AMR **(51)**

**Tableau II. 1**. État de l'art sur les modèles numériques du cycle AMR

| References | Rang | Fluid | Materiau | Geornetrie | Perte d'éharge | B |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Tura et al. 2012, **(52)** | 2D | Eau | Gd/ unique | Plaques parallels | Non | 1.47 T |
| Vuarnoz et al. 2012, **(53)** | 1D | Eau | Gd/ unique | Barres rne-talliques | Oui | 1.00 T |
| Aprca et al. 2012, **(54)** | 1D | Eau | $Gd_xDy_{1-x}$ | Spheres | Oui | 1.5 T |
| Dikkos et al. 2012, **(55)** | 1D | Heliurn | $Gd - Gd_{0.85}Er_{0.15}$ | Spheres | Non | 2 T |
| Nikkola e t al.2014, **(56)** | 1D | Eau | Gd/unique | Plaques parallele | Oui | 1.5 T |
| Tusck et al.2011, **(57)** | 1D | Eau | Gd/ unique | Spheres | Oui | 1 T |
| Kirn ct al. 2011, **(58)** | 1D | Heliurn | Gd/ unique | Spheres | Oui | 1.57 |

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Liu et al. 2011, **(59)** | 2D | Eau | Gd/ unique | Spheres | Non | 2.18 T |
| Srnaili et Al.2011, **(60)** | 1D | Hydrogen | Gd/ unique | Plaques paralléle | Oui | 3a7 T |
| Kawanarni et al.2011, **(61)** | 1D | eau | Gd/ unique | Spheres | Non | 1 T |
| Roudaut et al.2011, **(62)** | 1D | Eau | Gd/ unique | Plaques paralléle | Non | 0.5 T |
| Aprca et al.2011, **(63)** | 1D | Eau | Multicouehes | Spheres | Oui | 1.5 T |
| Tagliafico et al.2010, **(64)** | 1D | Eau | Gd/ unique | Spheres | Oui | 1.7 T |
| Risscr et al.2010, **(65)** | 1D | Zitrcc | Gd/ unique | Channel | Oui | 1.65 T |

### II.3.3 Description de démonstrateur de HES-SO

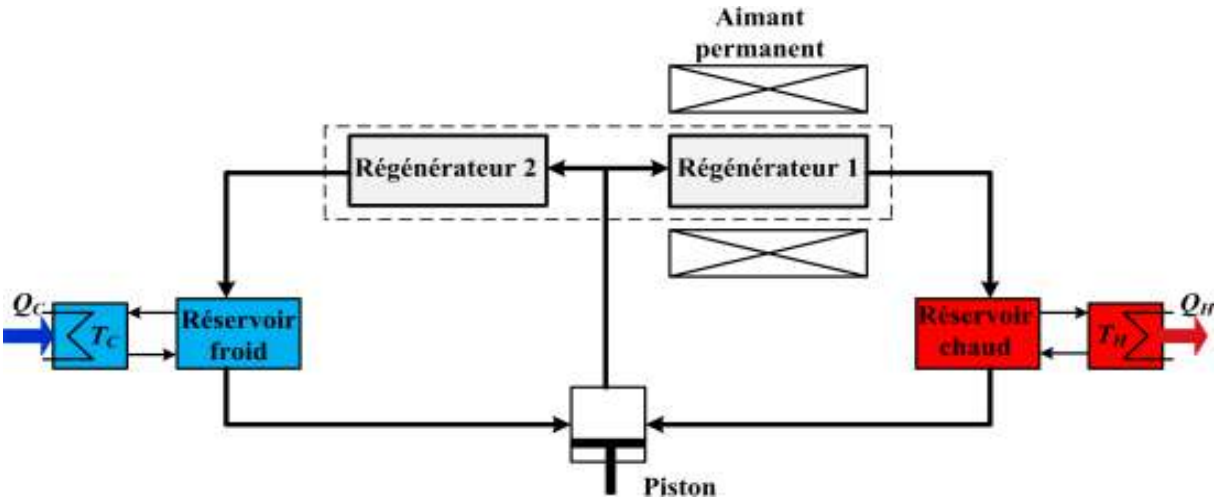



**Figure II. 5.** Schéma du démonstrateur de réfrigération magnétique de HES-SO

La figure (II.5), représente un schéma d'un dispositif de réfrigération magnétique, qui est constitué de (i)

1. deux blocs de régénérateur.
2. un piston pour faire circuler le fluide caloporteur à travers les régénérateurs,
3. Un fluide caloporteur pour récupérer le flux de chaleur échangé au niveau des régénérateurs. Le cycle de fonctionnement d'un réfrigérateur magnétique se compose de quatre processus :

1. Aimantation adiabatique : Le lit de régénérateur est magnétisé d'une façon adiabatique lors de l'application du champ magnétique, sans écoulement.
2. Réchauffement de fluide : Le fluide servit pour récupérer l'énergie thermique au niveau de la source chaude, tel que à l'entrée du lit, la température du fluide s'élève le long de la direction d'écoulement, et il quitte le lit à la température moyenne de la sortie d'eau chaude, Tavh, supérieure à la température de la source chaude, TH. En traversant l'échangeur de chaleur chaud, la température du fluide baisse à TH en rejetant une quantité de taux de chaleur.
3. Désaimantation adiabatique : En éliminant le champ magnétique d'une manière adiabatique sans pompage de fluide.
4. Refroidissement de fluide : Le fluide servit pour récupérer la chaleur au niveau de la source froide. Tel que, à l'entrée de lit de régénérateur, la température du fluide est égale à celle de la source chaude, TH, et la température du fluide décroit le long de la direction d'écoulement et il quitte le lit à la température moyenne de la sortie d'eau froide Tavc, inférieure à la température de la source froide, TC. En traversant l'échangeur de chaleur froid, la température du fluide s'élève jusqu' à TC en absorbant une quantité de taux de chaleur

### II.3.4 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. 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.6) et (II.7) ont été considérées.

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

$(1-\varepsilon)\ \rho_r c_r\ (B,\theta)\ Ar\ \frac{\partial\theta}{\partial x}dx$: Représente l'accumulation de l'énergie thermique dans le solide.

$hp\ (\theta - T)\ dx$ : Représente l'échange de chaleur par convection entre le fluide et le solide

$\dot{m}_f c_f T$ : Représente le transfert d'énergie thermique dû à l'écoulement du fluide.

$-k_f A_f \frac{\partial t}{\partial x}$: 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.

$\left|\frac{f m_f^3}{2\rho_f^2 A_f^2 D_h}\right|$: Représente les pertes de charge dues au frottement dans le fluide.

$hp(T-\theta)\ dx$ : Représente le taux de chaleur par convection entre le fluide et le solide.

En considérant les bilans énergétiques des éléments du fluide et du solide, on peut obtenir les équations reliant les températures du fluide caloporteur et du réfrigérant solide en fonction de la cordonnées spatial x et temporelle t :

$$\begin{cases} \varepsilon\rho_f c_f A_f \dfrac{\partial T}{\partial t} + m_f c_f \dfrac{dt}{dx} = hp(\theta - T) + A_f K_f \left(\dfrac{\partial^2 T}{\partial x^2}\right) + \left|\dfrac{f m_f^3}{2\rho_f^2 A_f^2 D_h}\right| \\ (1-\varepsilon)\rho_r c_r A_r \dfrac{\partial\theta}{\partial t} = hp(T\ -\ \theta) + A_r K_r \left(\dfrac{\partial^2\theta}{\partial x^2}\right) \end{cases} \qquad II.24$$

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

$\alpha = 1 - \frac{e_r}{e_r + e_f}$

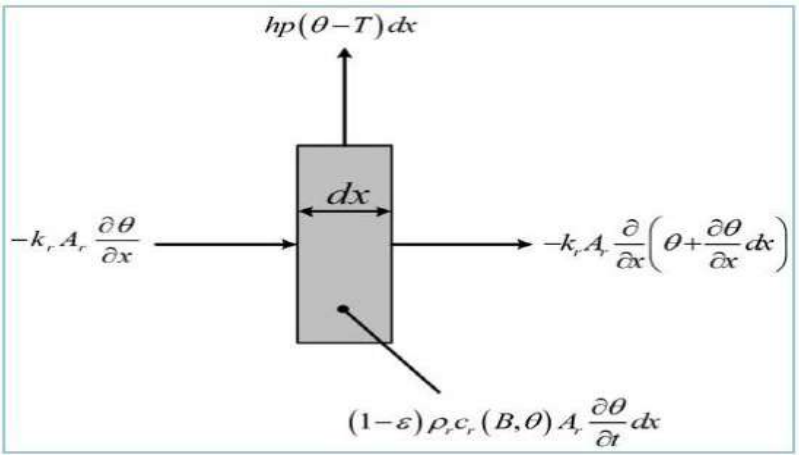



**Figure II. 6.** Bilan énergétique dans un élément solide

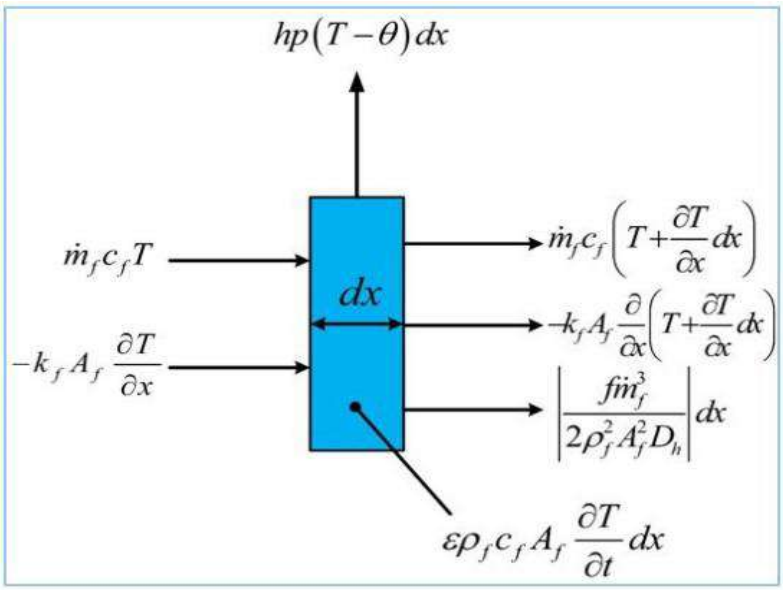



**Figure II. 7.** Bilan énergétique dans un élément fluide

### II.3.5 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.

#### 2.3.5.1 L'utilisation

L'utilisation est le rapport entre la masse thermique du fluide et la masse thermique du solide

$$U = \frac{m_f T_f c_f}{M_r c_r} \qquad \text{II.26}$$

$$\text{Avec} c_r = c_r(\theta = T\text{Curie}, B = 0) \qquad \text{II.27}$$

$$Tp = \frac{d}{v} \qquad \text{II.28}$$

Où

- TP: Représente le temps de pompage du fluide.

- d : Représente la course du vérin pneumatique.

- v : Représente la vitesse du fluide.

#### II.3.5.2 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

$$NUT = \frac{hA_{rf}}{\dot{m}_f c_f} \qquad \text{II.29}$$

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 :

$$u_L = \frac{m_f c_f \tau_p}{(1-\varepsilon) A \rho_r c_r A} \qquad \text{II.30}$$

$$NTU = \frac{hA_{rf} L}{m_f c_f} \qquad \text{II.31}$$

L'équation de bilan devient comme suit :

$$\begin{cases} \Psi \frac{\partial \mathrm{T}}{\partial \mathrm{t}} + U_L \frac{\partial \mathrm{T}}{\partial \mathrm{x}} = \mathrm{NT\ U.UL\ (\theta\ -\ T)} + \frac{1}{C_r}\frac{\partial}{\partial x}\left(K_F \frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{1}{C_r}\left|\frac{\lambda m_f^3}{2\rho_f^2 A_f^2 D_H}\right| \\ \frac{\partial \theta}{\partial t} = NTU.U_L(T-\theta) + \frac{1}{c_r}\frac{\partial}{\partial x}\left(K_r \frac{\partial \theta}{\partial x}\right) \end{cases} \quad \text{II.32}$$

Avec

$$\Psi = \frac{\varepsilon \rho_f c_f}{(1-\varepsilon)\rho_r c_r} \quad \text{II.33}$$

$$C_R = \frac{(1-\varepsilon)\,\mathrm{AL}\rho_r c_r}{\tau_p} \quad \text{II.34}$$

$$K_f = \frac{\varepsilon \mathrm{A} K_f}{L} \quad \text{II.35}$$

$$K_r = \frac{(1-\varepsilon)\mathrm{A}K_r}{L} \quad \text{II.36}$$

### II.3.5.3 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 sphère, régime de l'écoulement, la position des sphères, 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 sphères en parallèles, pour calculer le coefficient d'échange par convection on utilise la relation suivante proposée par Bejan **(66, 67)** pour des écoulements laminaires :

$$\mathrm{N_{uf}} = \text{ Cste} \quad \text{II.37}$$

$$\mathrm{h} = \frac{K_f N_{uf}}{D_h} \quad \text{II.38}$$

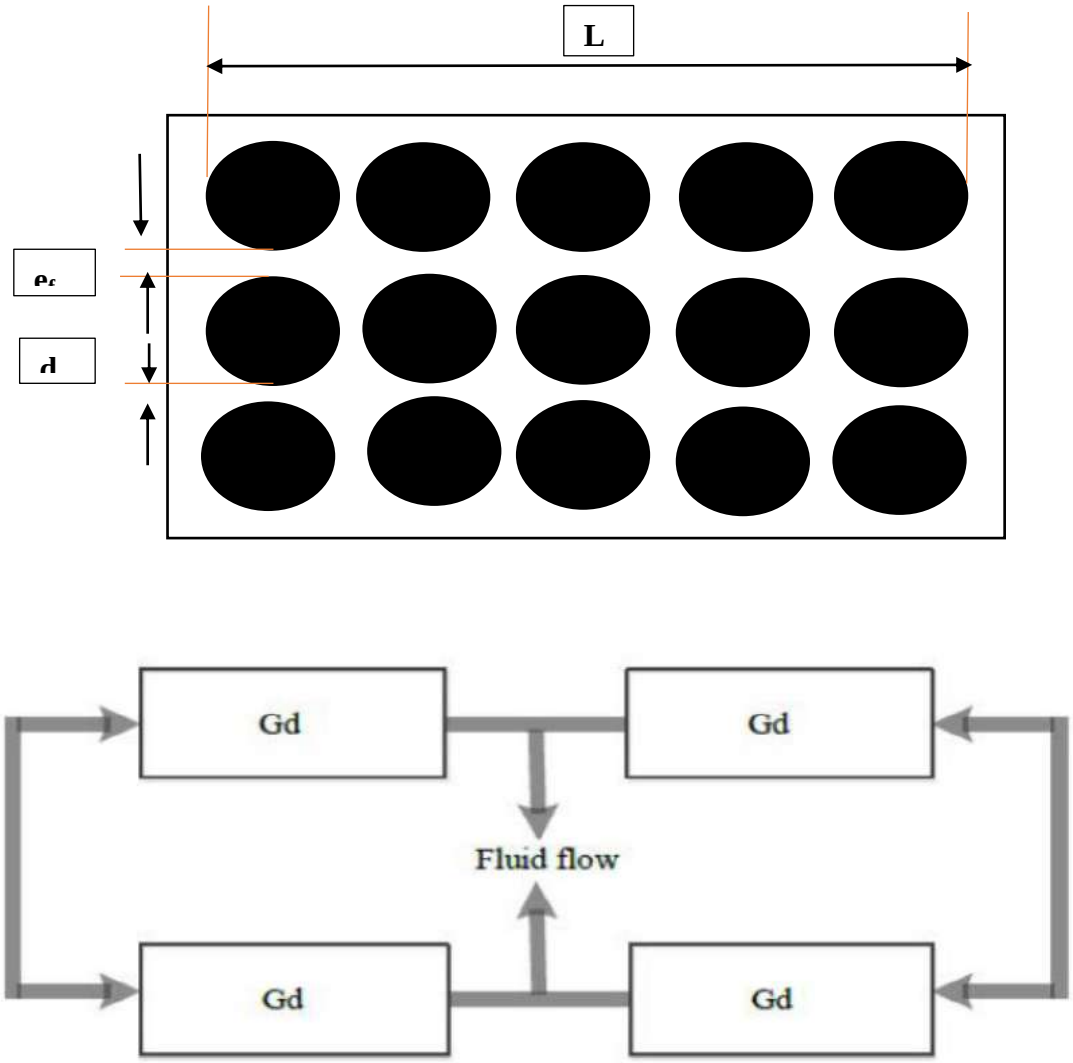



**Figure II. 8.** Configuration des régénérateurs de réfrigérateur

# CHAPITRE III

## RESULTATS ET DISCUSSION

### III.1 Introduction

Ce chapitre, est consacré à l'analyse des résultats de la simulation numérique obtenu pour réfrigérateur magnétique actif (AMR) travaillant autour température ambiante. La modélisation numérique est basé sur la résolution des équations de l'énergie par utilisation l'outil de CFD ansys.

L'étude des grandeurs ; de pression, de vitesse a été effectué et une comparaison entre les résultats a été faites pour visualiser le bon fonctionnement du modèle. Nous avons donc utilisé le gadolinium sous forme des boules.

### III.2 Simulation numérique de système de réfrigération magnétique

Nous proposons le modèle de réfrigération magnétique illustré à la figure 1 où ce système se compose d'un ensemble de billes de diamètre 0,003mm en gadolinium dans une zone de 0,15mm de long et 0,059 de large. Nous avons séparé les boules de l'espace dans lequel l'eau passe et avons coupé le modèle en utilisant le logiciel ANSYS multi physiques.

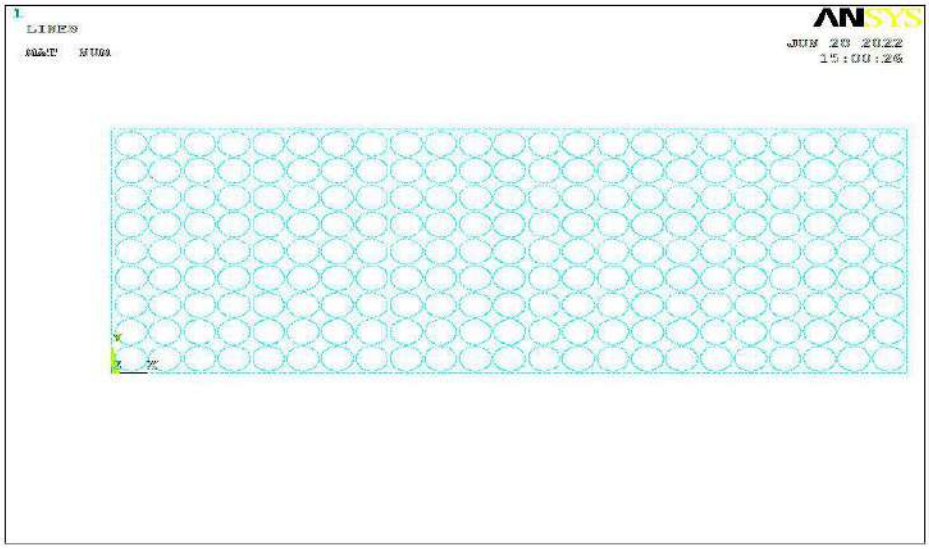



**Figure III 1 :** Distribution des sphères dans le lit de régénérateur

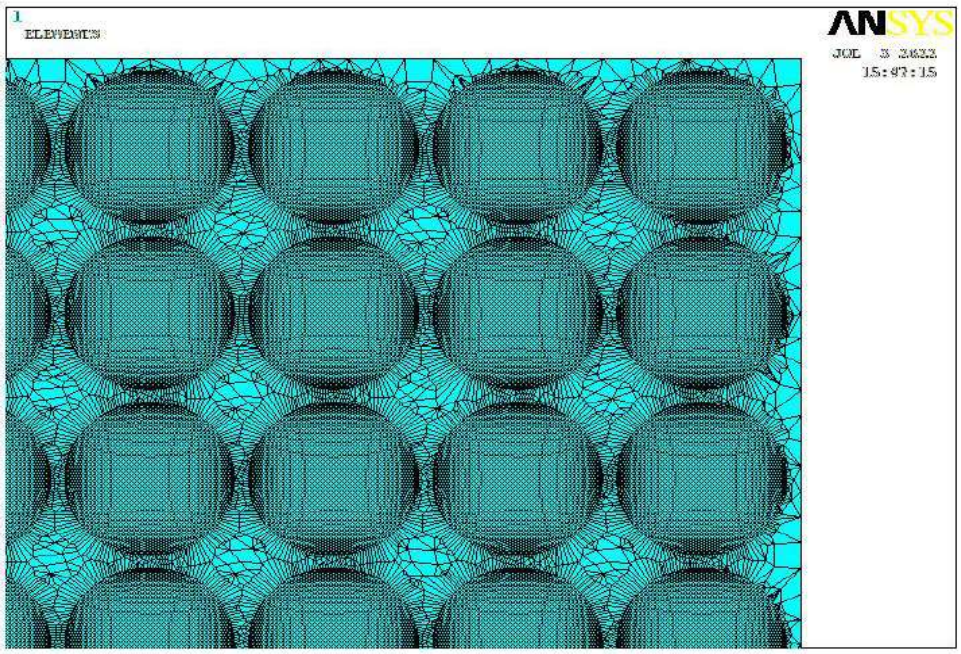



**Figure III 2 :** maillage de Modèle suggéré

### III.3. Envolement de fluide dans le lit de régénérateur

#### III.3.1. Ecoulement laminaire

Les figures montrent le champ des températures et le champ des pressions du fluide caloporteur, les résultats sont issus de la simulation numérique via le logiciel Ansys.

La simulation numérique a été effectuée en régime laminaire

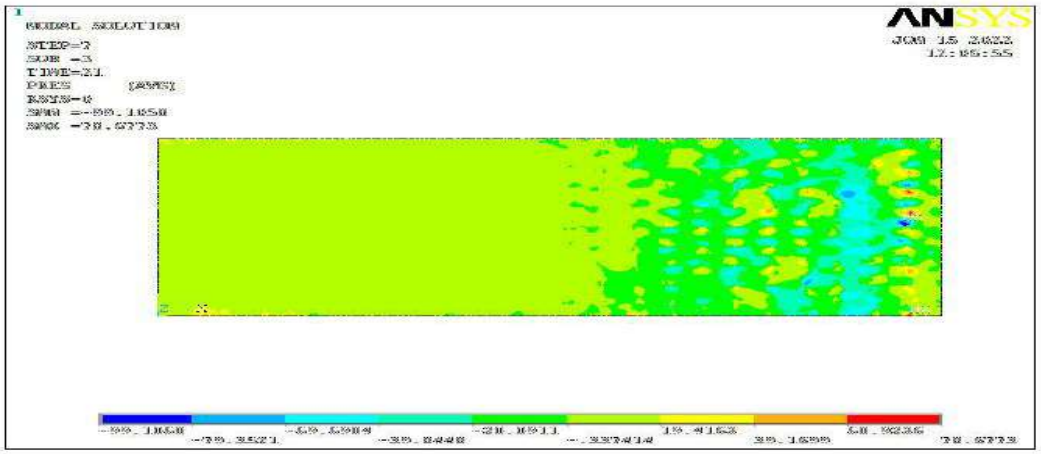



**Figure III 3 :** contour de la température

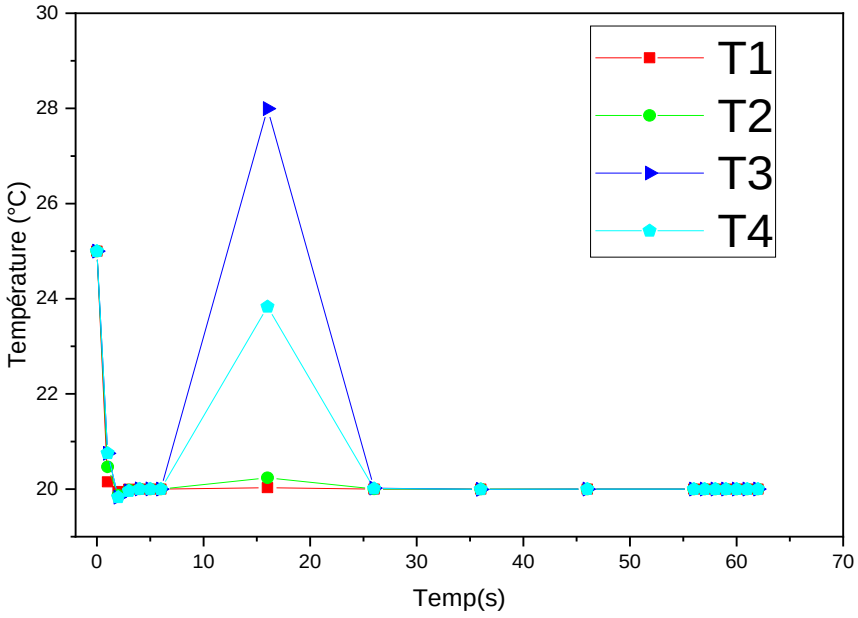



**Figure III 4** : la variation de température de fluide en régime laminaire

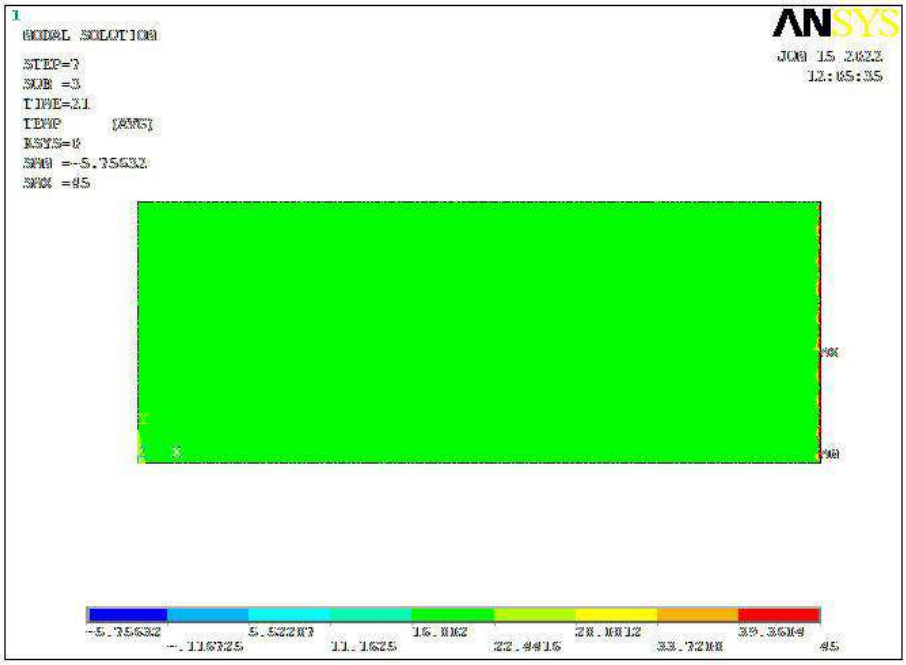



**Figure III 1 :** contour de la pression

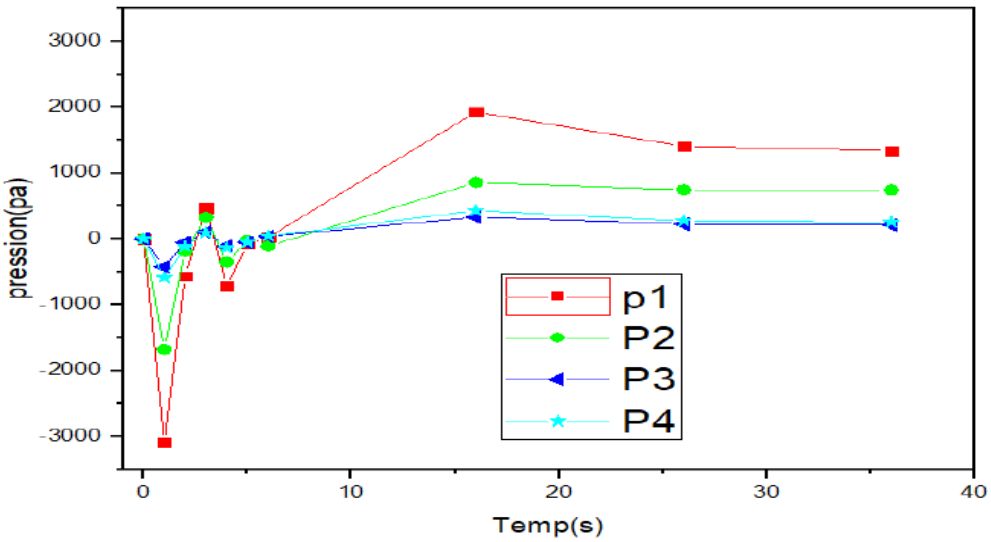



**Figure III 6 :** la variation de pression en régime laminaire

Les figures III.3, III.4, III.5 et III.6 illustrent une distribution homogène de la température et de la pression à travers le lit de régénérateur.et ceci, à cause de type de l'écoulement laminaire du fluides (les vitesses très faibles).

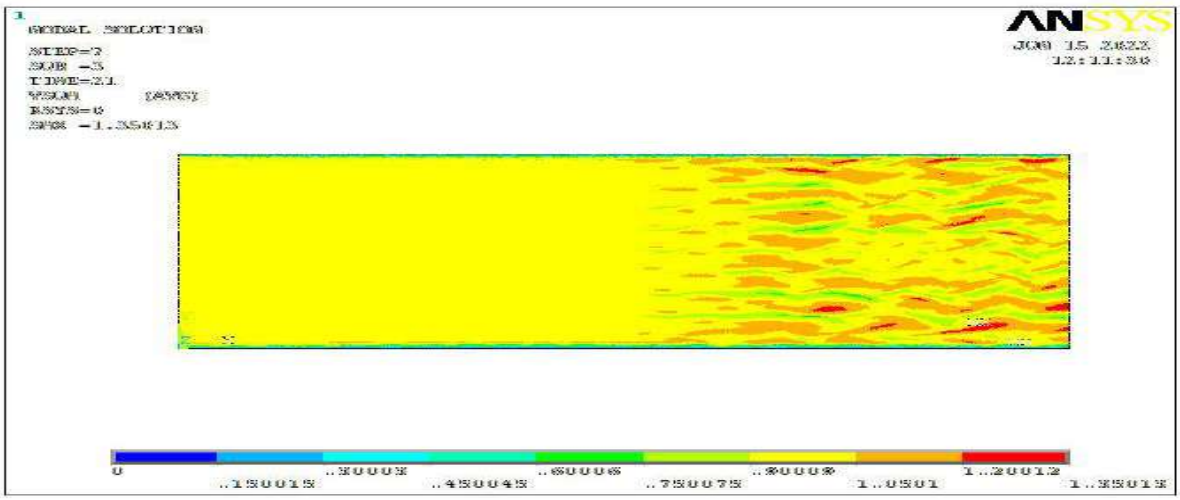



**Figure III 7:** contour de la vitesse

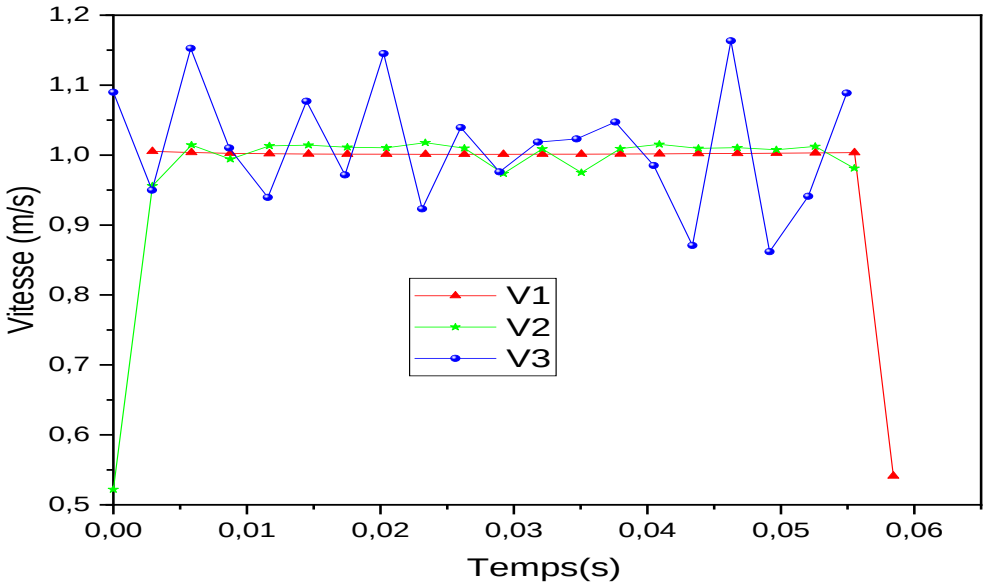



**Figure III .9 :** la variation de la vitesse en régime laminaire

La figure III.8 et la figure III.9 représente le champ des vitesses et la variation des vitesses du fluide caloporteur en fonction du temps. Le profil des vitesses prend une allure homogène durant l'écoulement dans le lit du régénérateur. Donc, une bonne distribution de vitesse le long du régénérateur.

### III.3.2. Ecoulement turbulent

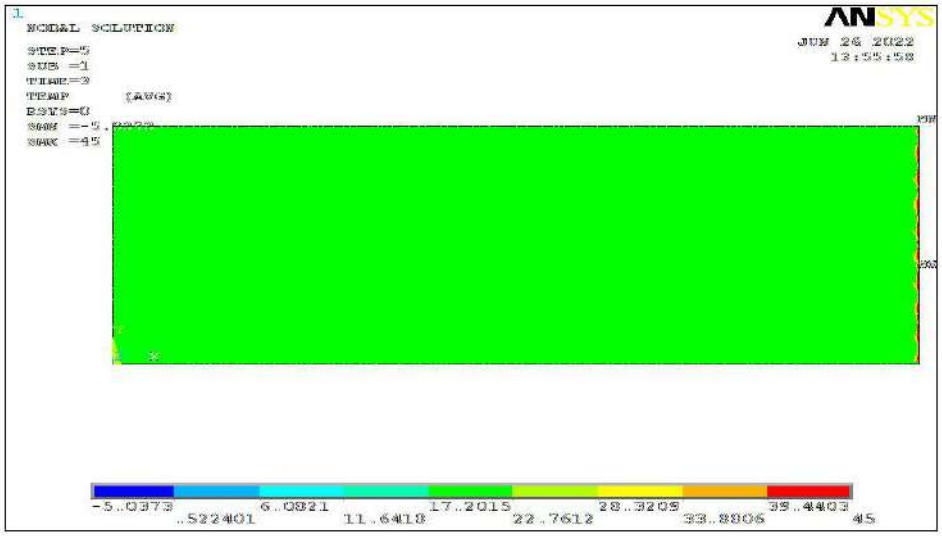



**Figure III.10** : contour de la température

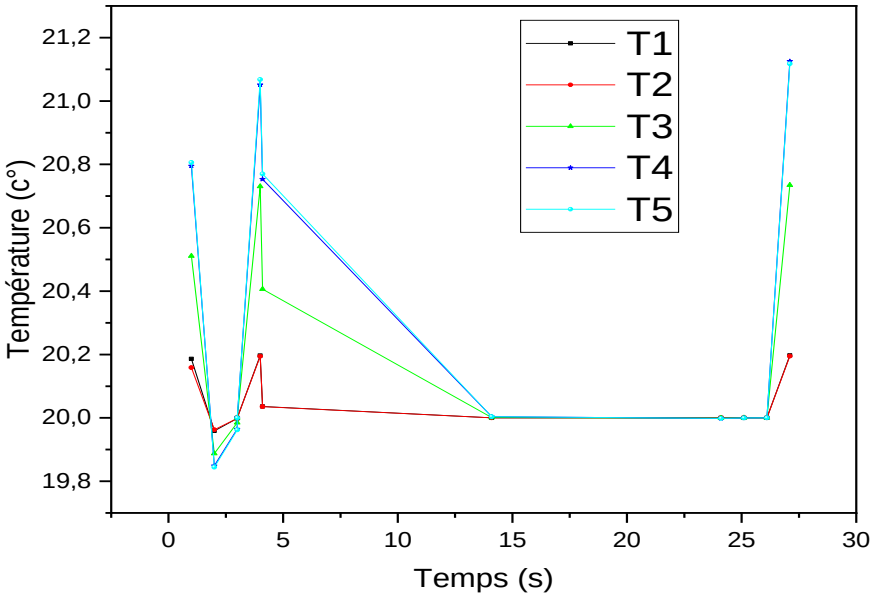



**Figure III.11.** La variation de température en régime turbulent

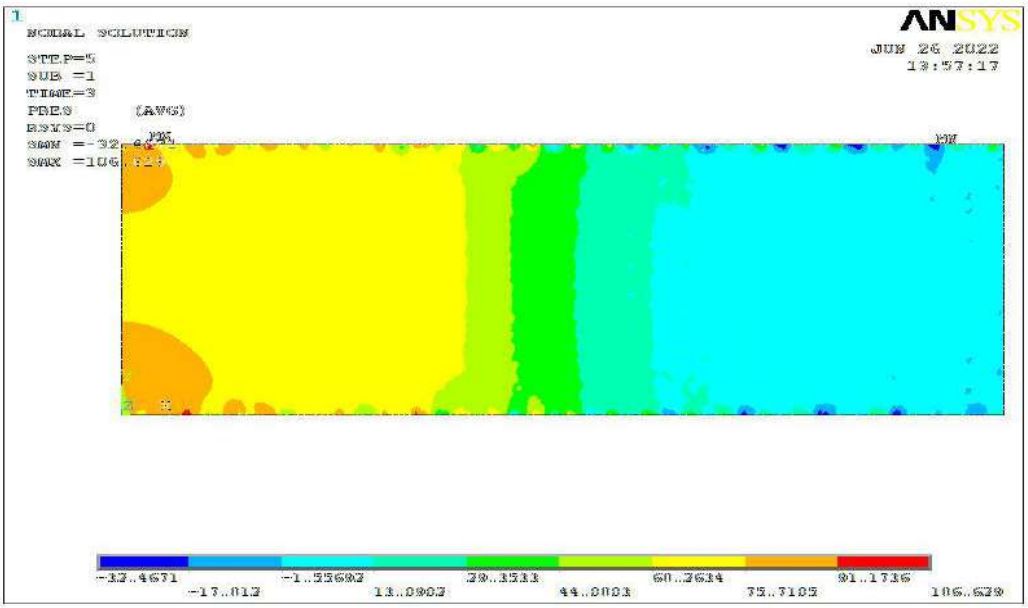



**Figure III.12.** La variation de pression en régime turbulent

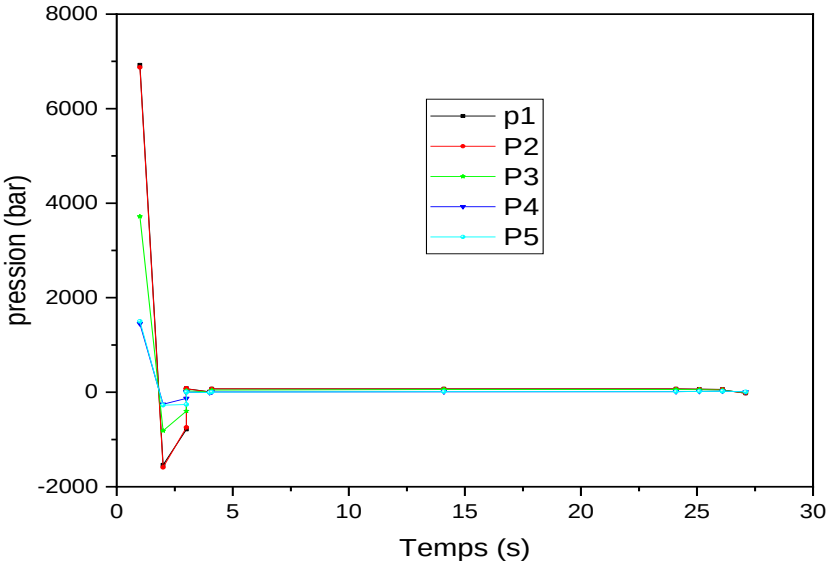



**Figure III 12 :** la variation de pression en régime turbulent

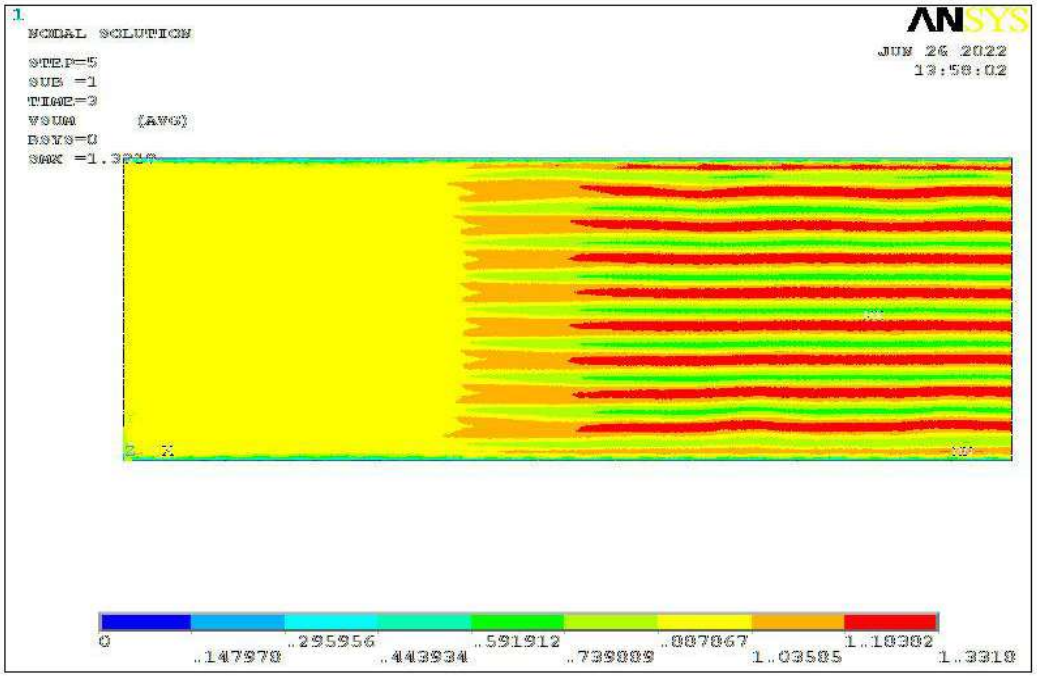



**Figure III 13 :** contour de la vitesse

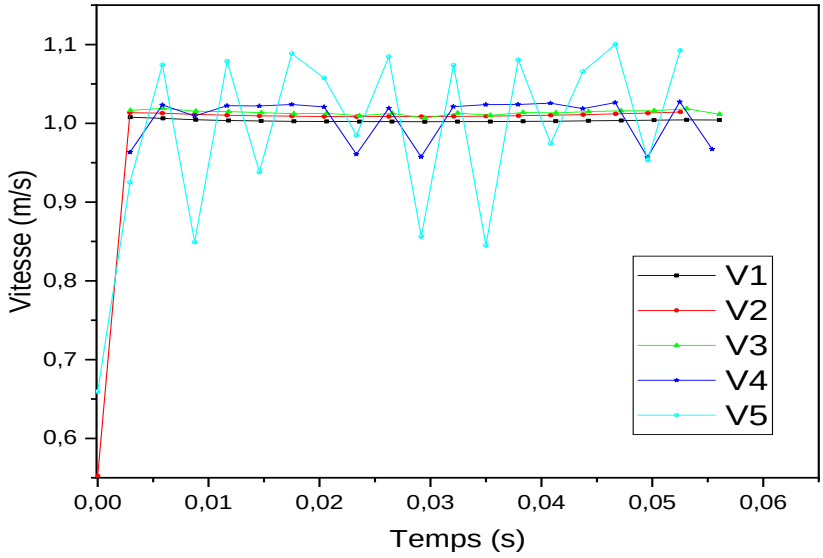



**Figure III 14 :** la variation de la vitesse en régime turbinant

Les figures III.10, III.11, III.12, III.13 et III.14 sont issus de l'écoulement turbulent. Comme la montre les figures pour le champ de température, pression et vitesse du fluide caloporteur. Les profils de chaque grandeur est différent à celle établit dans le cas d'un écoulement laminaire. Tout façon, les dispositifs de réfrigération magnétique autour de la température ambiante préfèrent des vitesses faibles pour avoir une bonne transfert de chaleur entre le fluide caloporteur et les matériaux solides sphériques. Les résultats obtenus seront validés avec d'autre travaux de recherche en future.

# CONCLUSION GENERALE

# Conclusion

L'utilisation de la réfrigération magnétique a récemment connu une augmentation dans le monde entier. Bien que cette technologie se développe, elle est encore moins utilisée en raison des questions sans réponse de nombreux chercheurs. Dans ce travail de master, le transfert de chaleur à travers le régénérateur et le fluide  a été étudié. Une simulation numérique via l'ansys a été  effectuée pour décrire l'échange de chaleur entre le fluide caloporteur et les particules sphériques. Les équations de l'énergie pour le fluide caloporteur et le matériau solide ont été utilisées pour la compréhension des phénomènes mise en jeux dans le lit de régénérateur. Un outil de simulation CFD a été proposé pour résoudre les équations de bilan.

À des vitesses d'écoulement de fluide élevé, une fréquence accrue permet d'augmenter coefficient de performance et capacité de refroidissement. Le diamètre des particules sphériques est l'un des paramètres affectant les performances du système de réfrigération magnétique, qui est inverse lié à la basse pression. Par conséquent, en menant une étude pivot ale sur le débit massique de liquide et diamètre des particules sphériques dans chaque cas de travail, peut être basse pression dans cette étude, on a proposé une méthode numérique efficace qui temps de calcul et réduire les erreurs numériques.

# Références bibliographiques


1- Younes Chiba, Arezki Smaïli, Cyril Mahmed, Mohamed Balli, Osmann Sari, Thermal investigations of an experimental active magnetic regenerative refrigerator operating near room temperature, International journal of refrigeration, 36-42, 2014
2- Warburg, E. G. (1881), Magnetische Untersuchungen, Ann. Phys. (Leipzig), volume 249
3- Debye P., Einige Bemerkungen zur Magnetisierung bei tiefer Temperatur, (1926), Ann. Phys. (Leipzig), volume 81
4- Giauque, W. F. ; MacDougall, D. P. (1933), Attainment of Temperatures Below 1° Absolute by Demagnetization of Gd2(SO4)3·8H2O, Phys. Rev. Lett. 43
5- Brown G.V. (1976), Magnetic heat pumping near room temperature, J. Appl. Phys., Vol. 47
6- Gschneidner, K. A. Jr. ; Pecharsky, V. K. ; Bautista, R. G. ; et al. (1997), eds, Rare Earths : Science, Technology and Applications III. Warrendale, PA : The Minerals, Metals and Materials Society
7- Zimm, C ; Jastrab, A. ; Sternberg, A. ; Pecharsky, V.K. ; Gschneidner, K.A. Jr. ; Osborne, M. ; Anderson, I. (1998), Description and Performance of a Near-Room Temperature Magnetic Refrigerator, Adv. Cryog
8- Gschneidner, K.A., Pecharsky, V.K. (2008), Thirty years of near room temparature magnetic cooling : where we are today and futurs prospects, Int. J. Ref., volume 31
9- Younes CHIBA, << Contribution á l'étude d'un réfrigérateur á régénération magnétique active opérant près de la température ambiante : considérations thermo fluides >>, Thèse de DOCTORAT, Ecole Nationale Polytechnique,2015
10- P. W. Egolf and S. Gama. The 5th international conference on magnetic refrigeration, {THERMAG} v, in grenoble. International Journal of Refrigeration, 36(5) :1584 - 1586, 2013.
11- H. Auracher and D. Coulomb. A tribute to peter w. egolf. International Journal of Refrigeration,2014
12- K. A. Gschneidner, V. K. Pecharsky, and A. O. Tsokol. Recent developments in magnetocaloric materials. Rep. Prog. Phys, 68 :1479-1539, 2005
13- O. Sari and M. Balli. From conventional to magnetic refrigerator technology. International Journal of Refrigeration, 37 :8-15, 2014.
14- O. Tegus, E. Brück, K.H.J. Buschow, and F.R. Deboer. Transition-metal-based magnetic refrigerants for room temperature applications. Nature,2002
15- K. A. GschneidnerJr and V. K. Pecharsky. Thirty years of near room temperature magnetic cooling : Where we are today and futurs prospects. International Journal of Refrigeration, 31 :945-961, 2008
16- G. V. Brown. Magnetic heat pumping near room temperature. Journal of appleid physics, 47 (8) :3673-3680, 1976.

17- B. Yu, M. Liu, P. W. Egolf, and A. Kitanovski. A review of magnetic refrigerator and heat pump prototypes built before the year 2010. International Journal of Refrigeration, 33(6) : 1029 - 1060, 2010.
18- S. Jacobs, J. Auringer, A. Boeder, J. Chell, L. Komorowski, J. Leonard, S. Russek, and C. Zimm. The performance of a large-scale rotary magnetic refrigerator. International Journal of Refrigeration, 37(0) :84 - 91, 2014.
19- 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.
20- A. Rowe and A. Tura. Experimental investigation of a three-material layered active magnetic regenerator. International Journal of Refrigeration, 29(8) :1286 - 1293, 2006
21- A. Tura and A. Rowe. Permanent magnet magnetic refrigerator design and experimental characterization. International Journal of Refrigeration, 34 :628-639,2011
22- D.S. Arnold, A. Tura, A. Ruebsaat-Trott, and A. Rowe. Design improvements of a permanent magnet active magnetic refrigerator. International Journal of Refrigeration, 37 :99-105, 2014
23- F. Allab, A. Kedous-Lebouc, J.-M. Fournier, and J. P Yonnet. Numerical modeling for active magnetic regenerative refrigeration. Magnetics, IEEE Transactions on, 41(10) :3757-3759, 2005.
24- U. Legait, F. Guillou, A. Kedous-Lebouc, V. Hardy, and M. Almanza. An experimental comparison of four magnetocaloric regenerators using three different materials. International Journal of Refrigeration, 37 :147 - 155, 2014.
25- J.M. Gatti, C. Muller, C. Vasile, G. Brumpter, P. Haegel, and T. Lorkin. Magnetic heat pumps configurable hydraulic distribution for a magnetic cooling system. International Journal of Refrigeration, 37 :165 - 175, 2014.
26- O. Sari, P. W. Egolf, N. Alber, and N. Erbeau. Démonstrateur magnétique. Rapport final : Bundesamt für Energie BFE, pages 01-14, 2006.
27- 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.
28- K. Engelbrecht, D. Eriksen, C.R.H. Bahl, R. Bjørk, J. Geyti, J.A. Lozano, K.K. Nielsen, F. Saxild, A. Smith, and N. Pryds. Experimental results for a novel rotary active magnetic regenerator. International Journal of Refrigeration, 35(6) :1498- 1505, 2012.
29- C.R.H. Bahl, K. Engelbrecht, D. Eriksen, J.A. Lozano, R. Bjørk, J. Geyti, K.K. Nielsen, A. Smith, and N. Pryds. Development and experimental results from a 1 kw prototype {AMR}. International Journal of Refrigeration, 37 :78 - 83, 2014.
30- J. Romero Gómez, R. Ferreiro Garcia, J. Carbia Carril, and M. Romero Gómez. A review of room temperature linear reciprocating magnetic refrigerators. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 21 :1 - 12, 2013.
31- C. Aprea, A. Greco, and A. Maiorino. The use of the first and of the second order phase magnetic transition alloys for an {AMR} refrigerator at room

temperature : A numerical analysis of the energy performances. Energy Conversion and Management, 70 :40 - 55, 2013
32- A.M. Tishin and Y.I. Spichkin. The magnetocaloric effect and its applications. Series in Condensed Matter Physics. Institute of Physics, Bristol, 2003.
33- A. Smaïli and R. Chahine. Thermodynamic investigations of optimum active magnetic regenerators. Cryogenics, 38 :247-252, 1998.
34- A. Lebouc, F. Allab, J. Fournier, and J. P. Yonnet. Réfrigération magnétique. Techniques d'Ingénieur, RE28, 2005
35- J. Romero Gómez, R. Ferreiro Garcia, A. De Miguel Catoira, and M. Romero Gómez. Magnetocaloric effect : A review of the thermodynamic cycles in magnetic refrigeration. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 17 :74 - 82, 2013.
36- A. Smaïli. Développement de matériaux composites pour la réfrigération magnétique. Ph. D. Thesis, Université du Québec, Canada, 1997.
37- J.A. Barclay. Wheel-type magnetic refrigerator, 1983. US Patent 4,408,463.
38- M. Rosca. Matériaux de type LaFe13-xSix à fort pouvoir magnétocalorique Synthèse et optimisation de composés massifs et hypertrempés Caractérisations fondamentales. Thèse de doctorat, l'Institut Néel, Grenoble, France, 2010.
39- M. Balli. Etude structurale et magnétique en vue de la mise en œuvre de nouveaux matériaux à effet magnétocalorique géant. Thèse de doctorat, l'Institut Néel, Grenoble, France, 2007
40- F. Allab. Étude et conception d'un dispositif de réfrigération magnétique basé sur l'effet magnétocalorique géant. Thèse de doctorat, Laboratoire de Génie Electrique de Grenoble G2Elab, France, 2008.
41- H. R. E. Bouchekara. Recherche sur les systèmes de réfrigération magnétique. Modélisation numérique, conception et optimisation. Thèse de doctorat, Laboratoire de Génie Electrique de Grenoble G2Elab, France, 2008
42- J. Roudaut. Modélisation et conception de systèmes de réfrigération magnétique autour de la température ambiante. Thèse de doctorat, Laboratoire de Génie Electrique de Grenoble G2Elab, France, 2011.
43- C. Dupuis. Matériaux à effet magnétocalorique géant et systèmes de réfrigération magnétique. Thèse de doctorat, Laboratoire de Génie Electrique de Grenoble G2Elab, France, 2009.
44- A. Sarlah. Thermo-hydraulic properties of heat regenerators in magnetic refrigerator. Ph.D. Thesis University of Ljubljana, Slovénie, 2008.
45- K. Engelbrecht. A numerical model of an active magnetic refrigerator with experimental validation. Ph. D. Thesis University of Wisconsis-Madison, Madison, USA, 2008.
46- B.F Yu, Q Gao, B Zhang, X.Z Meng, and Z Chen. Review on research of room temperature magnetic refrigeration. International Journal of Refrigeration, 26(6) :622 - 636, 2003
47- A. Kitanovski, U. Plaznik, J. Tuek, and A. Poredo. New thermodynamic cycles for magnetic refrigeration. International Journal of Refrigeration, 37(0) :28 - 35, 2014.

48- A. Smaïli and R. Chahine. Composite refrigerants for an Ericsson cycle : New method of selection using a numerical approach. Advances Cryogenic Engineerin, 42 A g :445-450, 1997.
49- G. Diguet, G. Lin, and J. Chen. Effect of geometrical shape of the working substance gadolinium on the performance of a regenerative magnetic brayton refrigeration cycle. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 326 :103 - 107, 2013.
50- G. Diguet, G. Lin, and J. Chen. Performance characteristics of magnetic brayton refrigeration cycles using gd, gd0.74tb0.26 and (gd3.5tb1.5) si4 as the working substance. International Journal of Refrigeration, 35(4) :1035 - 1042, 2012
51- Younes Chiba, Yacine Marif, Noureddine Henini, Abdelhalim Tlemcani. Modeling of magnetic refrigeration device by using artificial neural networks approach. International Journal of Energy Optimization and Engineering (IJEOE), 2021
52- A. Tura, K.K. Nielsen, and A. Rowe. Experimental and modeling results of a parallel platebased active magnetic regenerator. International Journal of Refrigeration, 35(6) :1518 - 1527, 2012.
53- D. Vuarnoz and T. Kawanami. Numerical analysis of a reciprocating active magnetic regenerator made of gadolinium wires. Applied Thermal Engineering, 37 :388 - 395, 2012.
54- C. Aprea, A. Greco, and A. Maiorino. Modelling an active magnetic refrigeration system : A comparison with different models of incompressible flow through a packed bed. Applied Thermal Engineering, 36 :296 - 306, 2012.
55- J. Dikeos and A. Rowe. Validation of an active magnetic regenerator test apparatus model. International Journal of Refrigeration, 36 :921 - 931, 2012.
56- P. Nikkola, C. Mahmed, M. Balli, and O. Sari. 1d model of an active magnetic regenerator. International Journal of Refrigeration, 37 :43 - 50, 2014.
57- Jaka Tuek, Andrej Kitanovski, Ivan Prebil, and Alojz Poredo. Dynamic operation of an active magnetic regenerator (amr) : Numerical optimization of a packed-bed {AMR}. International Journal of Refrigeration, 34(6) :1507 - 1517, 2011
58- Y. Kim and S. Jeong. Numerical simulation and its verification for an active magnetic regenerator. International Journal of Refrigeration, 34(1) :204 - 215, 2011.
59- M. Liu. And B. Yu. Numerical investigations on internal temperature distribution and refrigeration performance of reciprocating active magnetic regenerator of room temperature magnetic refrigeration. International Journal of Refrigeration, 34(3) :617 - 627, 2011.
60- A. Smaïli, S. Aït-Ali, and R. Chahine. Performance predictions of a first stage magnetic hydrogen liquefier. International Journal of Hydrogen Energy, 36(6) :4169 - 4177, 2011.
61- T. Kawanami, S. Hirano, K. Fumoto, and S. Hirasawa. Evaluation of fundamental performance on magnetocaloric cooling with active magnetic regenerator. Applied Thermal Engineering, 31 (67) :1176 - 1183, 2011.

62- J. Roudaut, A. Kedous-Lebouc, J.-P. Yonnet, and C. Muller. Numerical analysis of an active magnetic regenerator. International Journal of Refrigeration, 34(8) :1797 - 1804, 2011.
63- C. Aprea, A. Greco, and A. Maiorino. A numerical analysis of an active magnetic regenerative refrigerant system with a multi-layer regenerator. Energy Conversion and Management, 52 (1) :97 - 107, 2011.
64- G. Tagliafico, F. Scarpa, and F. Canepa. A dynamic 1-d model for a reciprocating active magnetic regenerator ; influence of the main working parameters. International Journal of Refrigeration, 33(2) :286 - 293, 2010.
65- M. Risser, C. Vasile, T. Engel, B. Keith, and C. Muller. Numerical simulation of magnetocaloric system behaviour for an industrial application. International Journal of Refrigeration, 33(5) : 973 - 981, 2010.
66- . A. Bejan and A.D. Kraus. Heat transfer handbook. John Wiley and Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2003.
67- 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.