REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA
FACULTE DE TECHNOLOGIE

Mémoire de fin d'études de Master

Filière : Génie mécanique

Spécialité : Energétique

Thème

Conception d'un système de réfrigération magnétique opérant autour de la température ambiante

Présenté par :

M. Faris HAMIDI

M. Aymen BLET

Proposé et Dirigé par :

Prof. Younes CHIBA

Prof. Arezki SMAILI

Promotion 2022/2023

REMERCIEMENTS

Nous tenons tous d'abord remercions « Allah » qui nous donne le courage et le pouvoir pour étudier et résoudre tous les problèmes.

Nous exprimons nos profonds remerciements à nos promoteurs, Prof. CHIBA Younes et Prof. SMAILI Arezki pour l'aide compétente qu'il nous a apportée, pour sa patience, sa confiance, son encouragement, et Son œil critique qui nous a été très précieux pour structurer le travail,

Nos remercîments vont aussi aux membres de jury pour avoir accepté d'examiner et

De juger notre travail.

Nous souhaiterions également remercier tous les enseignants ayant assurés mes cours pendant nos années d'études.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à mes très chers parents
pour qui je tiens à exprimer
l'amour et le respect les plus distingués
A mon frère et ma sœur
Sans oublier tous nos amis qui
ont contribué de près ou de loin à la
Réalisation de notre projet.

Faris.....

Je dédie ce modeste travail à mes parents, qui m'ont toujours soutenu et aidé, à qui je tiens à dire que je les aime profondément, et aussi à mes frères, ma sœur et mes petites nièces.
Sans oublier aussi tous mes amis(es), avec qui j'ai passé des années mémorables.

Aymen.....

LA SOMMAIRE :

Résumé

Liste des figures et des tableaux

NOMENCLATURE

chapiter I : Généralité sur la réfrigération magnétique 4

I.1. L'effet magnétocalorique: 5

I.1.1. Principe physique: 5

I.1.2. Matériaux magnétocalorique : 6

I.2. Les principes de base: 7

I.3. REFRIGERATION MAGNETIQUE: 8

I.3.1. Les cycles de réfrigération magnétique 9

I.3.2. PRINCIPAUX DEMONSTRATEURS DE REFRIGERATION MAGNETIQUES 13

chapiter II : Modélisation de cycle de réfrigération magnétique active (AMR) 17

II.1. Introduction..... 18

II.2. Description du cycle AMR : 19

II.3. Équations gouvernant le problème physique: 20

II.3.1. -Paramètres thermo fluides et performance du cycle AMR: 23

II.3.2. Le nombre d'unité de transfert: 24

II.3.3. Transfert de chaleur 24

chapiter III : Résultats et discussions 18

III.1. Introduction..... 27

III.2. Ansys électronique : 27

III.3. La structure n 1 : 29

III.4. la structure n2 : 35

III.5. la structure n 3 : 39

III.6. Conclusion..... 46

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

BIBLIOGRAPHIE

الملخص

الهدف الرئيسي من عملنا هو تصميم المصدر المغناطيسي لجهاز تبريد مغناطيسي يعمل وفق مغناطيس دائم با ستخدم الجادولينيوم كوسيط صلب للتبريد. للقيام بذلك ، تم استخدام أداة CFD لمحاكاة الهياكل المقترحة المختلفة لمصدر توليد المجال المغناطيسي وذلك لتشغيل نظام التبريد المغناطيسي حول درجة حرارة الغرفة. النتائج التي تم الحصول عليها واعدة، ولقد تم تحليلها ومناقشتها.

الكلمات المفتاحية : تبريد مغناطيسي ، تأثير مغناطيسي ، مجالات مغناطيسية ، محاكاة عددية.

Résumé

L'objectif principal de notre travail est de concevoir la source magnétique d'un dispositif de réfrigération magnétique fonctionnant à base d'aimants permanents utilisant le gadolinium comme refrigerant solide. Pour ce faire, un outil CFD a été utilisé pour simuler différentes structures proposées de la source de production de champ magnétique afin de générer un champ magnétique pour faire fonctionner le système de réfrigération magnétique autour de la température ambiante. Les résultats obtenus sont prometteurs, ils sont donc analysés et discutés.

Mots clés : Réfrigération magnétique, Effet magnétocalorique, Champs magnétique, Simulation numérique.

Abstract

The main objective of our work is to design the magnetic source of a magnetic refrigeration device operating based on permanent magnets using gadolinium as solid refrigerant. For this purpose, a CFD tool was used to simulate different proposed structures of the magnetic field generating source to generate a magnetic field to operate the magnetic refrigeration system around room temperature. The results obtained are promising, so are analyzed and discussed.

Keywords: Magnetic refrigeration, Magnetocaloric effect, Magnetic field, Numerical simulation.

Liste des figures et des tableaux

-Chapitre I-

1- **Fig I.1** Schématisation de l'effet magnétocalorique.
2- **Fig I .2** Transition de phase et variation de l'entropie en fonction du type de Matériau
3- **Fig I.3** Schéma du démonstrateur de réfrigération magnétique à régénération active de HES-SO
4- **Fig I.4** Cycle magnétique de Brayton
5- **Fig I.5** Cycle magnétique d'Ericsson
6- **Fig I.6** 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 quiest utilisé pour tous les étages
7- **Fig I.7** Cycle à régénération magnétique active (AMR)
8- **Fig I.8** Démonstrateur de NASA réalisé par Brown et son équipe
9- **Fig I.9** Démonstrateur de RM développé par Chubu Electric/Toshiba
10- **Fig I.10** Schéma du prototype de Rowe et al.
11- **Fig I.11** Démonstrateur de RM linéaire développé par HES-SO en 2010 : Cristal-1
12- **Fig I.12** Démonstrateur de RM linéaire développé par HES-SO en 2012 : Cristal-2
13- **Fig I.13** 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.

-Chapitre II-

14- **Figure II.1** Bilan énergétique dans un élément solide
15- **Figure II.2** Bilan énergétique dans un élément fluide

-Chapitre III-

16- **FigIII.1** Ansys maxwell
17- **Fig III.2** géométrie sur ansys maxwell
18- **Fig III.3** géométrie de 1er structure
19- **Fig III.4** le champ magnétique (T) et flux ligne (Wb/m) de 1er structure
20- **Fig III.5** les graphes de champ magnétique de 1er structeur en fonction de y
21- **Fig III.6** le graph des forces de 1er structure en fonction de y
22- **Fig III.7** la géométrie de 2éme structure

23- **Fig III.7** le champ magnétique (T) et flux ligne (Wb/m) de 2eme structure
24- **Fig III.9** la position de matériau magnétocalorique en y (mm)
25- **Fig III.10** le graph des champs magnétique de 2eme structure en fonction de y
26- **Fig III.11** le graph des forces de 2eme structure en fonction de y
27- **Fig III.12** geométrie de 3eme structure
28- **Fig III.13** le champ magnétique (T) et flux ligne (Wb/m) de 3eme structure
29- **Fig III.14** la position de matériau magnétocalorique en deg (°)
30- **Fig III.15** les graphes de champ magnétique en fonction de y
31- **Fig III.16** les forces z en fonction de deg°
32- **Fig III.17** les couples en fonction de deg°
33- **Table III.1** les graphes champ magnetique et geométrie de 3 cas de 3 cas De 1er structure
34- **Table III.2** les graphes de force et les géométries de 3 cas de 3 cas De 1er structure
35- **Table III.3** les graphes champ magnetique et geométrie de 3 cas De 2eme structure
36- **Table III.4** les graphes de force et les géométries de 3 cas de 3 cas De 2eme structure
37- **Table III.5** les graphes champ magnetique et geométrie de 3 cas De 3eme structure
38- **Table III.6** les graphes de force et les géométries de 3 cas de 3 cas De 3eme structure
39- **Table III.7** les graphes de couple et les géométries de 3 cas de 3 cas De 3eme structure

NOMENCLATURE

Abréviations

AMRR: Active Magnetic Regenerative Refrigeration. (Réfrigération magnétique active à récupération)

CFC : Chlorofluorocarbure

MCM : matériau Magnétocalorique

EMC : Effet Magnétocalorique

HCFC : Hydro chlorofluorocarbure

RM : Réfrigérateur Magnétique

Gd : Gadolinium

Lettres Latines

B : Induction magnétique [Tesla]

$\mathbf{COP}_{ca}$: Coefficient de Performance du cycle de Carnot

COP : Coefficient de Performance

$\boldsymbol{C_f}$: Chaleur spécifique [J/kg. K]

$\boldsymbol{Q_c}$: Taux de chaleur absorbée de la source froide [W]

$\boldsymbol{Q_c}$: Taux de chaleur rejetée à la source chaude [W]

$\boldsymbol{R_e}$: Nombre de Reynolds

$\boldsymbol{S_e}$: Entropie électronique [J/kg. K]

$\boldsymbol{S_l}$**:** Entropie du réseau [J/kg. K]

$\boldsymbol{S_m}$: Entropie magnétique [J / kg. K]

$\boldsymbol{T_H}$: Température à la source chaude [ºC]

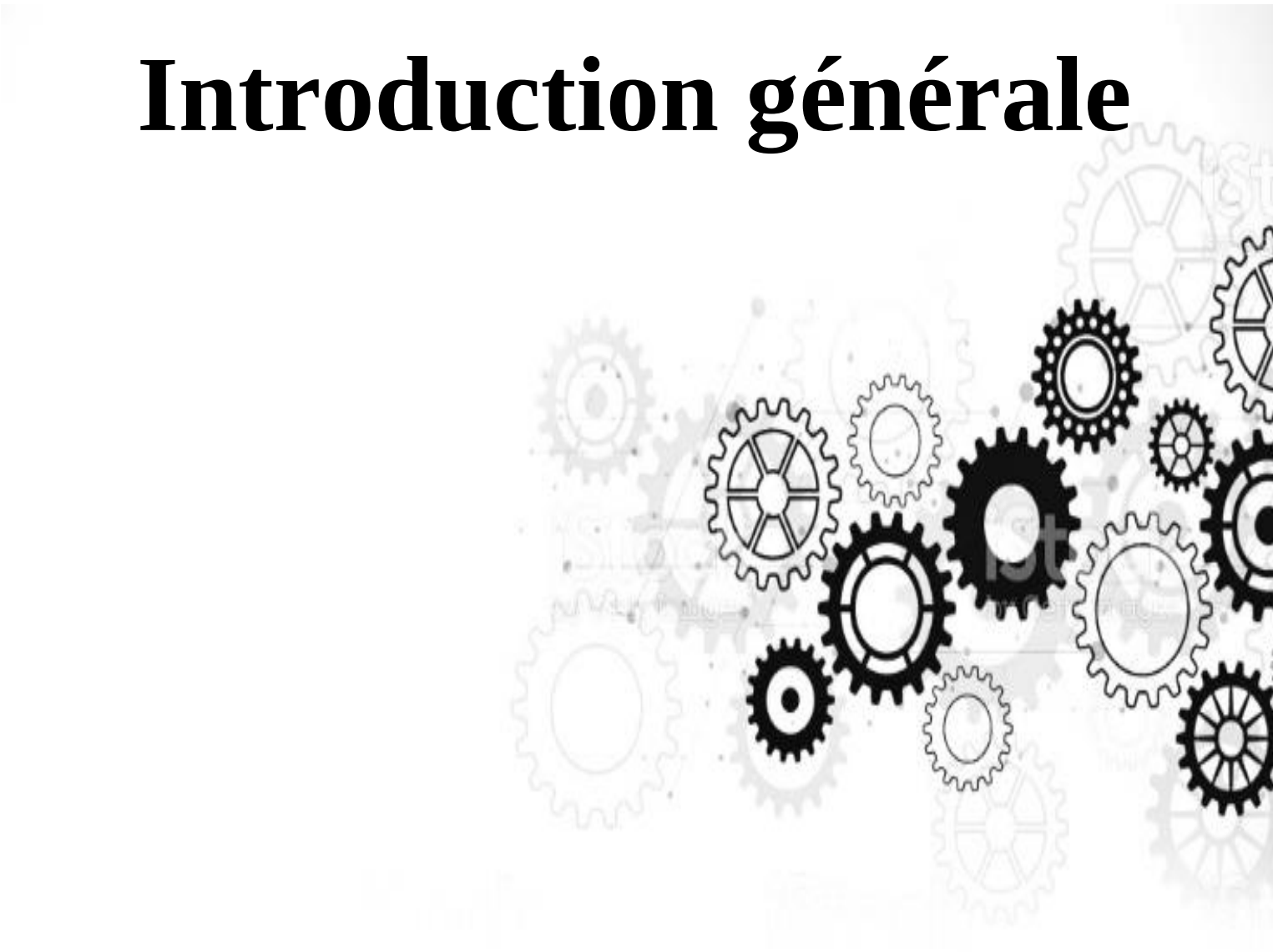
$\boldsymbol{T_c}$: Température à la source froide [ºC]

$\boldsymbol{\tau_p}$: Le temps de pompage du fluide.

d : la course du vérin pneumatique

v : la vitesse du fluide.

Introduction générale



INTRODUCTON GENERALE

En 1834, Jacob Perkins brevète la première machine de réfrigération à compression mécanique, et ça fait, le début du secteur de la réfrigération et de la climatisation ce qui a grandement contribué à l'augmentation du bien-être dans les pays développés et qu'il a permis de profonds changements dans les habitudes famille [Perkins, 1835]

L'évolution des machines frigorifiques à usage domestique incite les entreprises spécialisées dans le domaine de froid, à améliorer leurs produits pour satisfaire la demande d'un marché qui va correspond,

La diversité du climat en Algérie, comprenant les climats méditerranéen, semi-aride et aride, nécessite une politique solide visant à réduire les frais d'importation et à minimiser la consommation d'énergie électrique, en particulier pendant l'été. L'industrie du secteur du froid en Algérie est axée sur la conception et la fabrication de systèmes de climatisation décentralisés, tels que des climatiseurs d'une puissance variant de 9000 à 24000 BTU, des armoires de climatisation d'une puissance variant de 48000 à 60000 BTU, ainsi que des réfrigérateurs de modèles petits et grands, avec une capacité variant de 160 à 520 litres [ENIEM,2005.]

Ces dispositifs sont commercialisés par la compagnie étatique "Entreprise Nationale d'Industrie Électroménagère" (ENIEM), située à Tizi-Ouzou. Selon une étude réalisée par une commission européenne en collaboration avec le ministère de la Petite et Moyenne Entreprise et de l'Artisanat, le potentiel de production locale d'appareils électroménagers en Algérie s'est considérablement renforcé ces dernières années [M. Boidin, 2004]. À titre d'exemple, les chiffres fournis par la société ENIEM en 2005 indiquent que près de 204 768 réfrigérateurs et 9 439 climatiseurs ont été fabriqués et vendus en Algérie [ENIEM,2005.]

Les réfrigérateurs et les climatiseurs ne consomment certainement pas mal d'énergie, surtout lorsqu'ils fonctionnent en continu dans des climats chauds. Mais ils contiennent également des produits chimiques qui absorbent facilement la chaleur de l'environnement lorsqu'ils se transforment d'un liquide froid en un gaz. Lorsqu'ils redeviennent liquides, ils libèrent la chaleur vers l'extérieur - soit à l'extérieur d'un bâtiment, soit à l'extérieur d'un réfrigérateur - avant d'être recyclés pour recommencer le processus de refroidissement.

Ces mêmes produits chimiques sont également utilisés dans certains types de mousse isolante et comme propulseur dans les bombes aérosols.

Le type de réfrigérant le plus courant était autrefois les chlorofluorocarbures, plus connus sous leur acronyme CFC. Mais après qu'il a été découvert que les CFC appauvrissaient la couche d'ozone, il y a eu un effort mondial pour les éliminer progressivement. Le Protocole de Montréal de 1987 - un accord environnemental historique signé par plus de 200 pays - signifie que ces produits chimiques nocifs pour l'environnement ne sont plus produits. [O. Sari 2014] [A. Smaïli 1997]

Mais les efforts pour se débarrasser des CFC ont conduit de nombreux fabricants de produits chimiques à choisir de les remplacer par deux groupes de produits chimiques présentant un problème différent : les hydrofluorocarbures (HFC) et les hydro chlorofluorocarbures (HCFC). Ces réfrigérants décomposent beaucoup moins les molécules d'ozone, mais sont des gaz à effet de serre extrêmement puissants. Leur capacité à réchauffer l'atmosphère - mesurée en tant que potentiel de réchauffement global - est des milliers de fois supérieure à celle du dioxyde de carbone, certains étant jusqu'à 13 850 fois plus puissants. En effet, les HFC et les HCFC - ainsi que les CFC - absorbent également le rayonnement infrarouge, emprisonnant la chaleur dans l'atmosphère plutôt que de la laisser s'échapper dans l'espace, créant un effet de serre qui réchauffe la planète. [O. Sari 2014] [K. GschneidnerJr 2008]

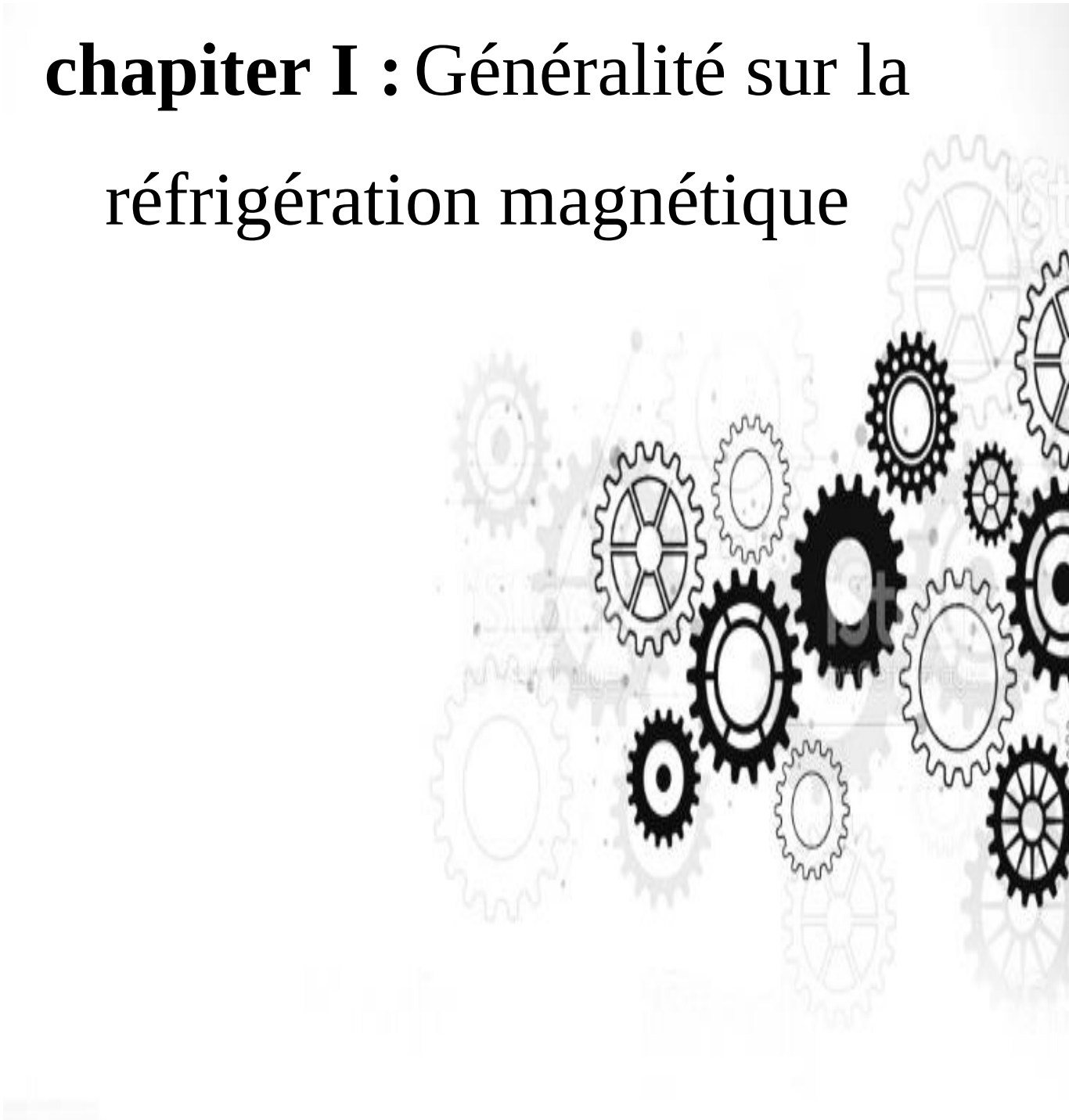
Dans notre étude, nous avons proposé une solution de conception de la source du champ magnétique dans un réfrigérateur magnétique opérant autour de la température ambiante à base de Gadolinium comme un réfrigérant solide.

Le premier chapitre est consacré à une recherche bibliographique sur l'état de l'art portant sur les travaux antérieurs sur les différents matériaux magnétocaloriques utilisés comme réfrigérants et sur les différents systèmes de réfrigération magnétique opérant près de la température ambiante.

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.

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

chapiter I : Généralité sur la réfrigération magnétique



I.1. 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, [Warburg.1881] 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

Depuis les années 30, la réfrigération magnétique a été appliquée avec succès en physique des basses températures. Longtemps après, en 1976, il construit Braun a été le premier réfrigérateur magnétique. [Brown G.V,1976] Cette étape a été franchie, un brevet a été déposé et un grand nombre de réfrigérateurs de ce type ont été construits. Le premier réfrigérateur a été construit Un magnétron à température ambiante équipé d'un aimant permanent a été introduit en 2001 par l'American Astronaute Organisation. Kitanovski, Egolf et Sari ont proposé de nouveaux systèmes de cycle de réfrigération thermodynamique. Pour ces réfrigérateurs, l'utilisation de simulations numériques est faite Des COP très élevés sont prévisibles, mais ils ne sont pas encore publiés Ces machines, encore en phase de développement, doivent fonctionner sous Conditions similaires aux réfrigérateurs à compression/expansion conventionnels ou aux pompes à chaleur [Kitanovski, A 2006].

En 1997, Gschneidner a découvert des "matériaux à effet magnétique géant" dans température ambiante dans les alliages de gadolinium-germanium-silicium (Ga-Ge-Si) avec EMC = 3,65 K/Tesla autour de la température de Curie TC = 276 K [Gschneidner, K .1997] . C'est le concept Ce qui a révolutionné le domaine du refroidissement ambiant magnétique.

I.1.1. Principe physique:

La réfrigération magnétique est un système de « réduction d'entropie d'un matériau paramagnétique » ou même ferromagnétique, reposant sur la propriété physique de certains matériaux magnétiques qui voient leur température intrinsèque s'élever quand ils sont soumis à un champ magnétique ; inversement la désaimantation entraîne un refroidissement. Ce phénomène dénommé effet magnétocalorique ou « EMC ». Cet effet repose sur la transition critique paramagnétique (spins orientés au hasard) /ferromagnétique spins alignés et parallèles)

du matériau, qui se traduit par une augmentation de la température lorsqu'on lui applique rapidement un champ magnétique ; inversement la désaimantation entraîne un refroidissement.

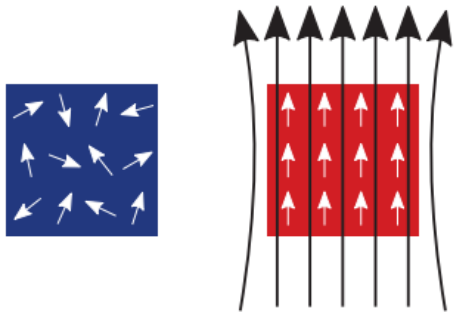


Fig I.1 – Schématisation de l'effet magnétocalorique. A gauche : sans champ magnétique appliqué, les moments magnétiques sont dirigés de façon aléatoire. A droite : Lorsqu'on applique un champ magnétique, les moments magnétiques s'alignent et la température du matériau augmente.

I.1.2. 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 [C. Aprea,2013, A. Lebouc,2005].

Les matériaux du premier ordre conduisent donc à des variations d'entropie importantes mais sur une faible plage de température, comme illustré sur la Figure I.2. A l'inverse, les matériaux du second ordre ont des variations d'entropie plus faibles mais sur une large plage de température.

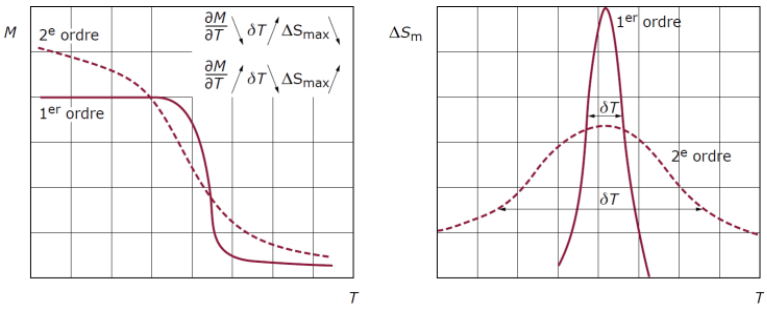


Fig I .2 – Transition de phase et variation de l'entropie en fonction du type de matériau [A. Lebouc,2005].

I.2. Les principes de base:

Pour mieux comprendre l'origine physique de l'effet magnétocalorique, il est utile de rappeler les propriétés thermodynamiques d'une substance magnétique plongée dans un champ magnétique. Premièrement on sait que 'entropie désigne l'état de désordre d'un système [Tech l'ingénieur,1976], avec T température du matériau et B champ magnétique appliqué.

$$dS = (\frac{\delta Q}{T})_R \qquad \text{(Eq.I.1)}$$

Dans le cas d'une transformation réversible, la différentielle de l'entropie S peut s'écrire selon l'Eq. 2 :

$$dS(T,B)=(\frac{\partial S}{\partial T})_B + (\frac{\partial S}{\partial B})_T dB \qquad \text{(Eq.I.2)}$$

La capacité calorifique spécifique iso magnétique du matériau CB est :

$$C_B = (\frac{\partial S}{\partial T})_B T \qquad \text{(Eq.I.3)}$$

La relation de Maxwell–Weiss

$$(\frac{\partial S}{\partial \vec{B}})_T = (\frac{\partial \vec{M}}{\partial T})_{\vec{B}} \qquad \text{(Eq.I.4)}$$

En remplaçant les deux relations l'Eq.3 et l'Eq.4 c'est-à-dire la capacité calorifique spécifique iso magnétique du matériau et la relation de Maxwell–Weiss qui relie l'entropie et l'aimantation dans l'Eq. 2, la différentielle de l'entropie S sera exprimée par l'Eq. 5 :

$$dS(T,B) = \frac{C_B}{T} dT + (\frac{\partial M}{\partial T})_B dB \qquad \text{(Eq.I.5)}$$

Dans le cas d'une transformation adiabatique, l'effet magnétocalorique est exprimé par l'Eq. 6:

$$EMC = \Delta T_{ad} = \frac{T}{C_B} \int_{B_t}^{B_f} (\frac{\partial M}{\partial T})_B \, dB \qquad \text{(Eq.I.6)}$$

Ou encore par l'Eq. 7 :

$$EMC = \Delta T_{ad} = \frac{T.\Delta S_m(T,\Delta B}{C_B(T,B)} \qquad \text{(Eq.I.7)}$$

D'un point de vue thermodynamique, l'entropie d'un composé magnétocalorique est une combinaison de l'entropie magnétique SM, l'entropie de réseau Sr, et l'entropie électronique Se. L'entropie magnétique se caractérise par les moments magnétiques propres aux électrons. L'entropie de réseau porte sur le réseau cristallin des atomes et l'entropie électronique est associée à la contribution thermique des électrons dans le matériau. Cette dernière peut être considérée comme négligeable dans certains matériaux. De ce fait, lorsque le composé à la température T est soumis à un champ magnétique B, l'entropie totale de ce dernier peut se traduire par l'Eq. 8 :

$$\mathbf{S_{totale}(T,B) = S_m(T,B) + S_r(T) + S_e(T)} \qquad \text{(Eq.I.8)}$$

Ou simplement par l'Eq.9 :

$$\mathbf{S_{totale} = S_m + S_{TH}} \qquad \text{(Eq.I.9)}$$

Il est clair que pour que le matériau possède un EMC géant, il faut qu'il réunisse au mieux les conditions suivantes :

1-variation d'entropie magnétique ΔSM élevée. Cela se traduit par un moment magnétique élevé ;

2-faible capacité thermique massique CB.

I.3. REFRIGERATION MAGNETIQUE:

Les systèmes de réfrigération magnétique se composent de différents éléments, comme illustré dans la FigureI.3. 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.

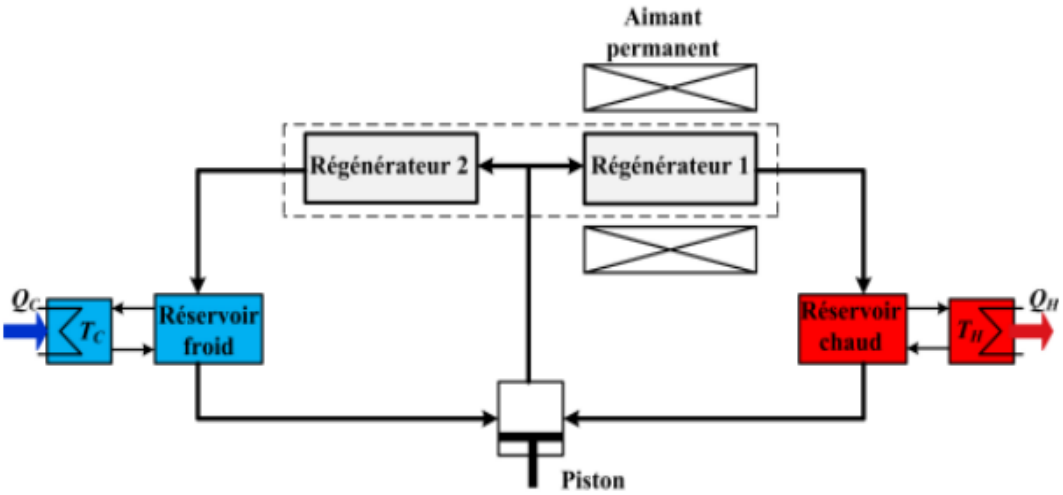


Fig I.3 Schéma du démonstrateur de réfrigération magnétique à régénération active de HES-SO **[**Y. Chiba 2015**]**

I.3.1. Les cycles de réfrigération magnétique

I.3.1.1 Cycle de Brayton magnétique

Qui est le cycle de réfrigéra on magnétique le plus simple. Il 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.

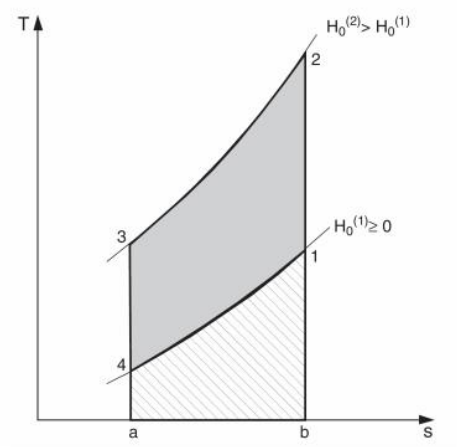


Fig 1.4 Cycle magnétique de Brayton [Kitanovski, A 2006].

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.

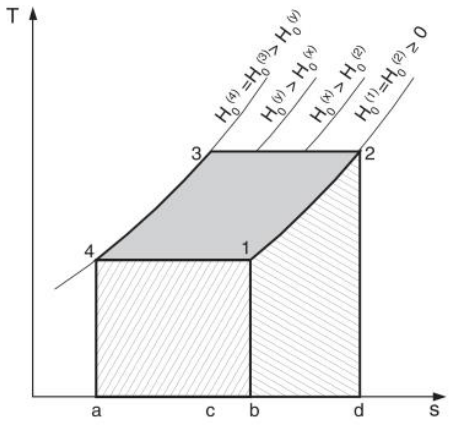


Fig I.5 Cycle magnétique d'Ericsson [Kitanovski, A 2006]

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.6 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.

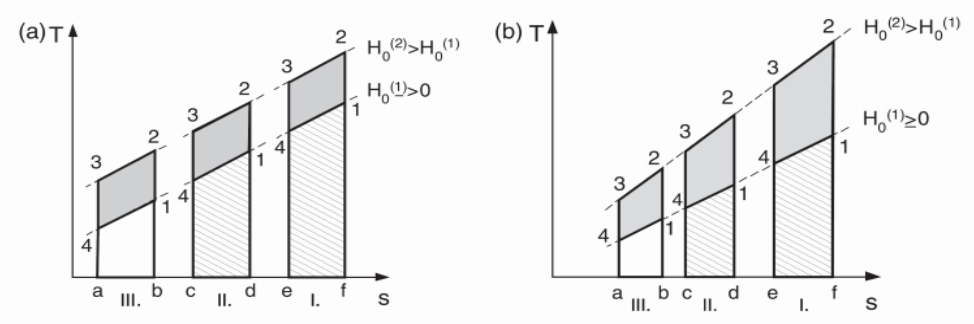


Fig I.6 Système multi-étage basé sur le cycle de Brayton. Dans la configuration (a) chaque étage utilise un matériau optimal alors que pour la configuration (b) c'est le même matériau qui
est utilisé pour tous les étages [Kitanovski, A 2006].

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 [Barclay,1982]. 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.

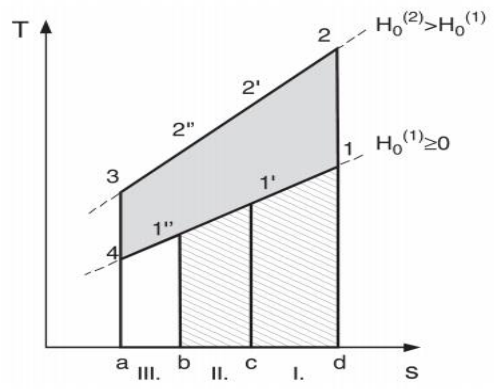


Fig I.7 Cycle à régénération magnétique active (AMR) [Kitanovski, A 2006].

I.3.2. PRINCIPAUX DEMONSTRATEURS DE REFRIGERATION MAGNETIQUES

I.3.2.1 Prototype magnétique de Brown (1976):

En 1976, Brown [Brown G.V, 1976. B. Yu,2010] Giauque a conçu le premier démonstrateur de réfrigération magnétique près de la température ambiante la figure (1.7) 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 [B. Yu,2010], il a pu atteindre un $\Delta T = 80K$ en utilisant le cycle de Stirling avec le même dispositif.

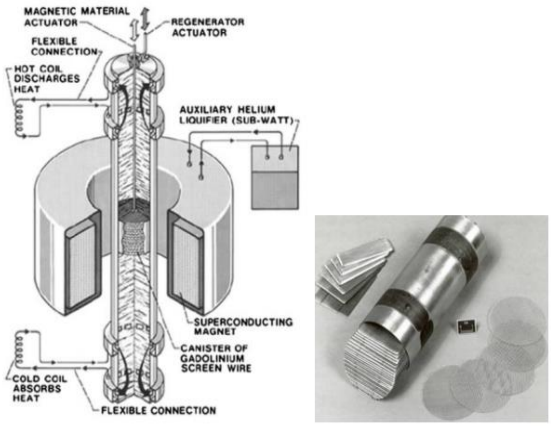


Fig I.8 Démonstrateur de NASA réalisé par Brown et son équipe [B. Yu,2010]

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 [K. GschneidnerJr 2008. T. Okamura,2006].

En 2006, l'entreprise Chubu Electics et Tokyo Institute de technologie ont conçu un autre démonstrateur rotatif (figure (1.9)) 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 [K. GschneidnerJr 2008]

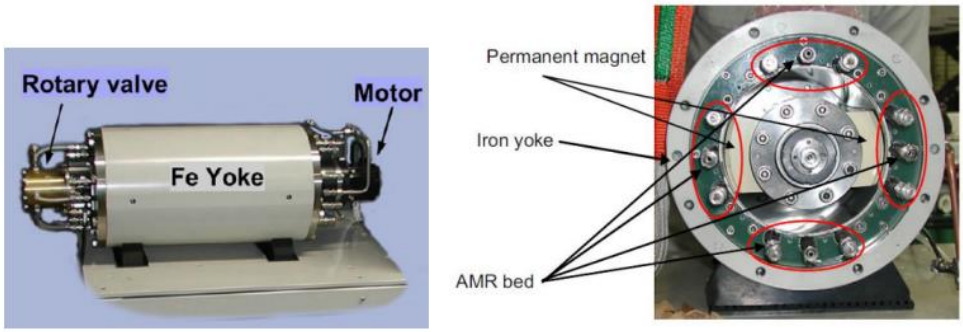


Fig I.9 Démonstrateur de RM développé par Chubu electric/Toshiba [T. Okamura,2006]

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 [K. GschneidnerJr 2008]. 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).

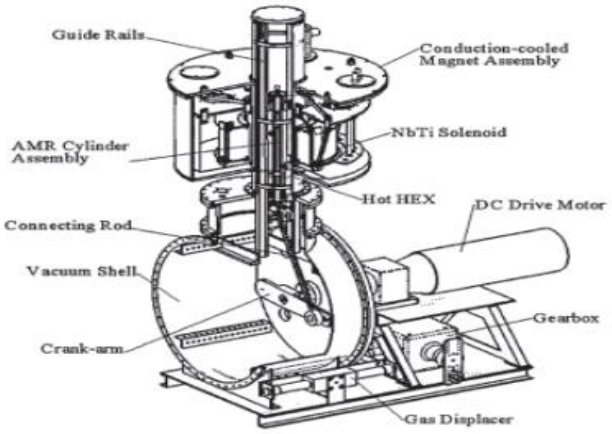


Fig I.10 Schéma du prototype de Rowe et al. [Rowe, A.2006].

Le prototype utilise un régénérateur multicouche composé de trois matériaux : Gd (TC = 294 K), Gd0,74Tb0,26 (TC = 278 K) et Gd0,85Er0.15 (TC = 265 K). Cela lui permet d'atteindre un écart de température important (50K avec un champ de 2 Tesla). [K. GschneidnerJr 2008]

I.3.2.4 Prototype de Balli et al. (2010) :

Le prototype développé par Balli et al. [M. Balli,2012] 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.

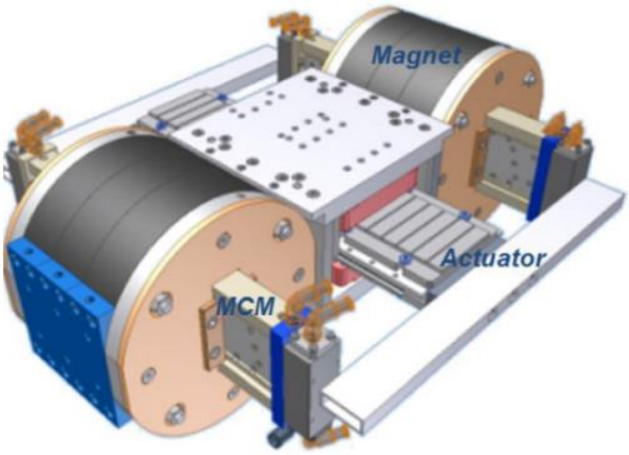


Fig I.11 Démonstrateur de RM linéaire développé par HES-SO en 2010 : Cristal-1 [M. Balli,2012]

Récemment des améliorations importante sont été introduites sur cette machine pour augmenter sa performance (la figure(1.12)) ce qui permet d'avoir des écarts de température qui pouvaient dépassés les 32C, comme le montre la figure(1.13) [O. Sari 2014]

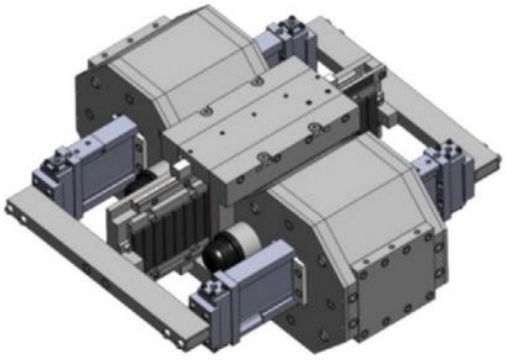


Fig I.12 Démonstrateur de RM linéaire développé par HES-SO en 2012 : Cristal-2

[Y. Chiba, 2014]

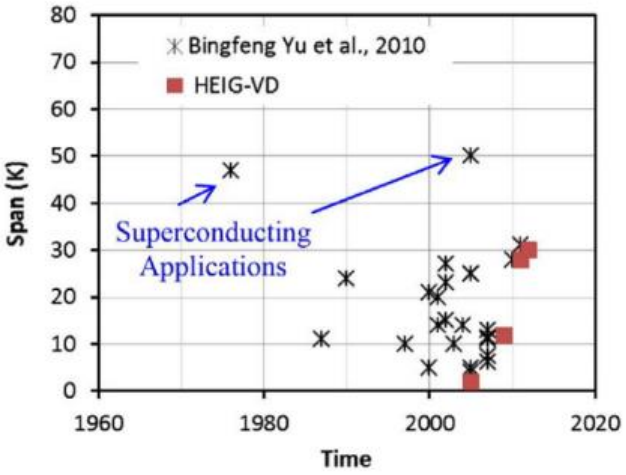


Fig I.13 Évolution des écarts de température entre la source chaude et froide de démons trateurs de HE-ESO par rapport aux autres démonstrateurs conçus dans le monde

[Y. Chiba, 2014]

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



II.1. Introduction

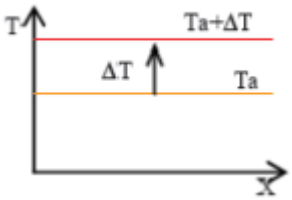
L'utilisation directe de l'effet magnétocalorique géant à température ambiante est restreinte en raison de la capacité limitée des matériaux magnétoélectriques existants à générer des écarts de température élevés. Par exemple, un échantillon de gadolinium à proximité de la température ambiante produit 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 [Engelbrecht, K.L,2005].

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), [Engelbrecht, K.L,2005]. 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 [*Yu, B.f,2003*].

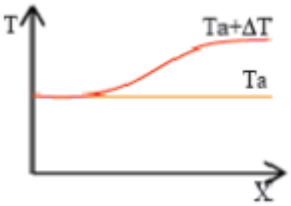
Dans les cycles à régénération externe, le régénérateur joue un rôle crucial en permettant au fluide de circuler alternativement entre la source chaude et la source froide. Auparavant, une limitation de ce principe était la nécessité de maintenir un gradient de température stable le long de la colonne 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 :

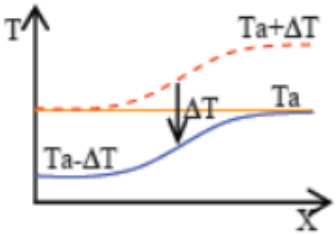
Etape 1 : Aimantation du matériau à partir d'un état initial où tout le système est à température Ta. Chaque point du matériau régénérateur voit sa température augmenter de ΔT suite à l'application du champ magnétique.



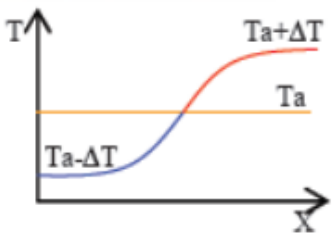
Etape 2 : Ecoulement du fluide de la source froide vers la source chaude. La chaleur de l'aimantation est évacuée par le fluide circulant de la source froide TC à la source chaude TH : ont créé ainsi un gradient thermique le long du lit.



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



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



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

$$\mathbf{COP} = \frac{\mathbf{Qc}}{\mathbf{W_{mag}+W_P+W_F}} \qquad \text{(Eq.II.1)}$$

où, $\mathbf{W_{mag}}$, $\mathbf{W_P}$, $\mathbf{W_F}$ et $\mathbf{Qc}$ représentent le travail magnétique, travail fourni par la pompe, les pertes dus aux courants de Foucault et la puissance frigorifique respectivement

$$\mathbf{W_{mag}} = \int \vec{\mathbf{f}}.\ \vec{\mathbf{dl}} \qquad \text{(Eq.II.2)}$$

$$\mathbf{W_P} = \mathbf{V}\frac{\Delta \mathbf{P}}{\mathbf{n_p}} \qquad \text{(Eq.II.3)}$$

$$\mathbf{q_c} = \mathbf{m_f c_f}\left(\mathbf{t_c} - \mathbf{t_{f,c}}\right) \qquad \text{(Eq.II.4)}$$

$$\overline{\mathbf{T}}_{\mathbf{f,c}} = \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{T}} \int \mathbf{T}(\mathbf{x} = \mathbf{L}, \mathbf{t})\mathbf{dt} \qquad \text{(Eq.II.5)}$$

II.3. Équations gouvernant le problème physique:

La simulation numérique du cycle de réfrigération magnétique actif repose sur les équations de conservation de la quantité de mouvement et de la continuité pour le fluide, ainsi que sur les équations d'énergie pour le fluide et le solide, afin de décrire le transfert de chaleur entre le solide et le fluide. En outre, nous avons pris en compte 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.

- $-k_r A_r \frac{\partial \theta}{\partial x}$: 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.
- $m_f c_f T$: Représente le transfert d'énergie thermique dû à l'écoulement du fluide.
- $-k_f A_d \frac{\partial T}{\partial x}$: 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:

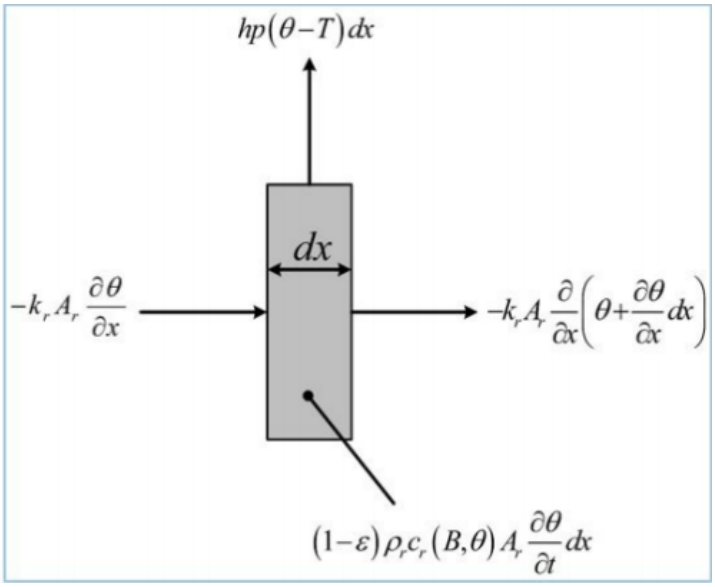


Figure II.1 Bilan énergétique dans un élément solide [Y. Chiba 2015**]**

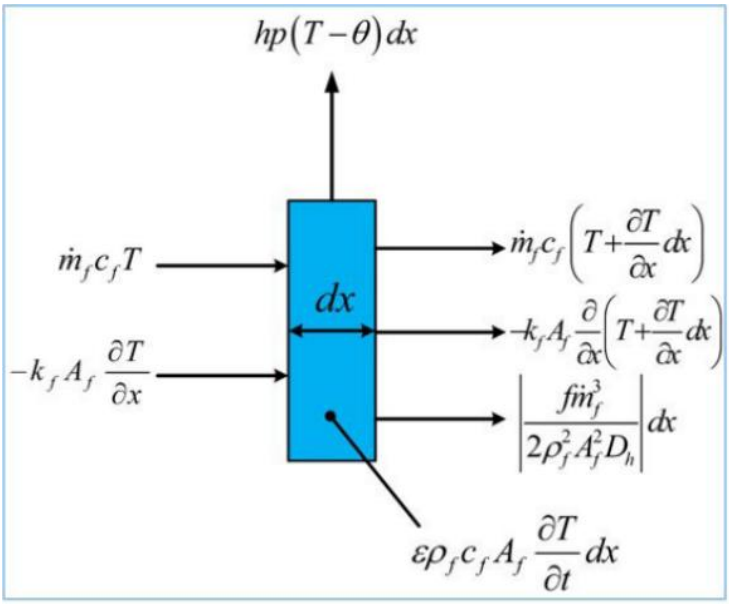


Figure II.2 Bilan énergétique dans un élément fluide [Y. Chiba 2015**]**

$$\begin{cases} \varepsilon\rho_f c_f A_f \frac{\partial T}{\partial t} + m_f c_f \frac{\partial T}{\partial x} = h_p(\theta - T) + A_f k_f \left(\frac{\partial^2 T}{\partial^2 x}\right) + \left|\frac{f m_f^3}{2\rho_f^2 A_f^2 D_h}\right| \\ (1-\varepsilon)\rho_r c_r A_r \frac{\partial \theta}{\partial t} = h_p(T - \theta) + A_r k_r \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial_{x^2}}\right) \end{cases} \quad \text{(Eq.II.6)}$$

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

$$\alpha = 1 - \frac{e_r}{e_r + e_f} \quad \text{(Eq.II.7)}$$

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. [y.chiba these,2015]

II.3.1.1 L'utilisation:

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

$$U = \frac{m_f c_f \tau_p}{M_r c_r} \quad \text{(Eq.II.8)}$$

$c_r = c_r$ ($\theta = T_{curie}$, B = 0)

$$\tau_p = \frac{d}{v} \quad \text{(Eq.II.9)}$$

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

$$\boldsymbol{NTU} = \frac{\boldsymbol{hA_{rf}}}{\boldsymbol{m_f c_f}} \quad \text{(Eq.II.10)}$$

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 :

$$\boldsymbol{U_l} = \frac{\boldsymbol{m_f c_f \tau_p}}{\boldsymbol{(1-\varepsilon) A \rho_r c_r L}} \quad \text{(Eq.II.11)}$$

$$\boldsymbol{NTU} = \frac{\boldsymbol{hA_{rf} L}}{\boldsymbol{m_f c_f}} \quad \text{(Eq.II.12)}$$

L'équation de bilan devient comme suit :

$$\begin{cases} \boldsymbol{\varphi}\frac{\partial \mathbf{T}}{\partial \mathbf{t}} + \mathbf{U_L}\frac{\partial \mathbf{T}}{\partial \mathbf{x}} = \mathbf{NTU}.\mathbf{U_L}(\boldsymbol{\theta} - \mathbf{T}) + \frac{1}{\mathbf{c_R}}\frac{\partial}{\partial \mathbf{x}}\left(\mathbf{K_f}\frac{\partial \mathbf{T}}{\partial \mathbf{x}}\right) + \frac{1}{\mathbf{c_R}}\left|\frac{\lambda \mathbf{m_f^3}}{2\rho_f^2 \mathbf{A_f^2 D_h}}\right| \\ \frac{\partial \boldsymbol{\theta}}{\partial \mathbf{t}} = \mathbf{NRU}.\mathbf{U_L}(\mathbf{T} - \boldsymbol{\theta}) + \frac{1}{\mathbf{c_R}}\frac{\partial}{\partial \mathbf{x}}\left(\mathbf{K_R}\frac{\partial \boldsymbol{\theta}}{\partial \mathbf{x}}\right) \end{cases} \quad \text{(Eq.II.13)}$$

Avec :

$$\boldsymbol{\varphi} = \frac{\boldsymbol{\varepsilon \rho_f C_f}}{\boldsymbol{(1-\varepsilon)\rho_r c_f}} \quad \text{(Eq.II.14)}$$

$$\mathbf{c_R} = \frac{\boldsymbol{(1-\varepsilon) A L \rho_r c_r}}{\boldsymbol{\tau_P}} \quad \text{(Eq.II.15)}$$

$$\mathbf{K_f} = \frac{\boldsymbol{\varepsilon A K_f}}{\mathbf{L}} \quad \text{(Eq.II.16)}$$

$$\mathbf{k_r} = \frac{\boldsymbol{(1-\varepsilon) A k_r}}{\mathbf{L}} \quad \text{(Eq.II.17)}$$

II.3.3. Transfert de chaleur

La détermination du coefficient d'échange de chaleur par transfert thermique dépend de plusieurs facteurs : la conductivité, la viscosité, la densité, la géométrie, la vitesse, le nombre

de plaques, le régime d'écoulement, la position des plaques, le nombre de Reynolds, le nombre de Prandtl, le nombre de Nusselt et le diamètre hydraulique renouvelé, etc. En général, de nombreuses formules empiriques sont utilisées pour calculer le coefficient d'échange de chaleur approximatif. Dans le cas des plaques en parallèle, on utilise la relation suivante proposée par Bejan [A. Bejan,2003] [F. P. Incropera, 2007] pour les écoulements lamellaires.

$$\mathbf{Nu_f = 7.54}$$

$$\mathbf{h = \frac{K_f Nu_f}{D_h}}$$

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

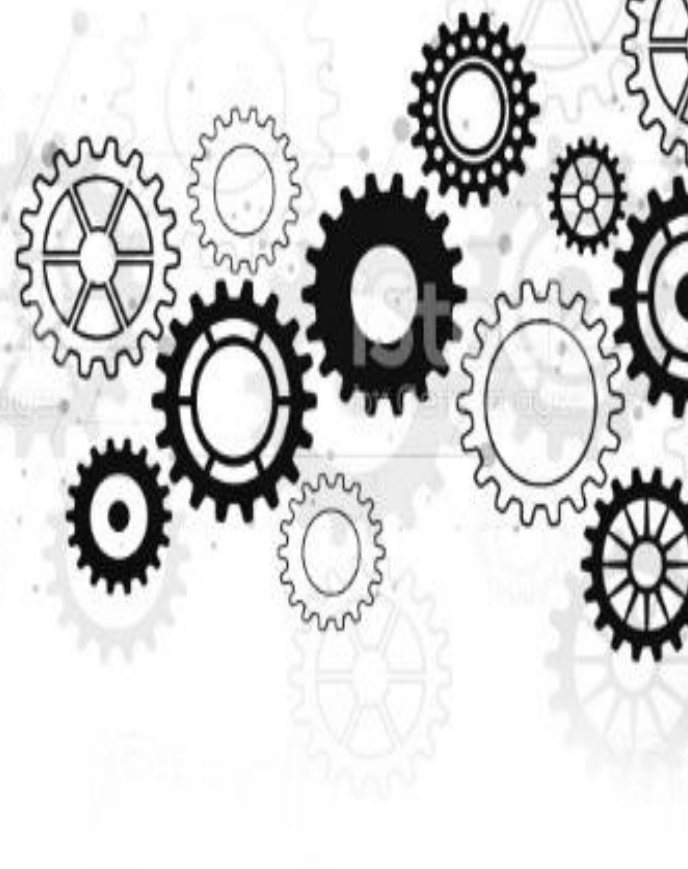
le nombre de Reynolds:

$$\mathbf{Re_f = \frac{\rho_f \vartheta D_h}{\mu_f}} \qquad \text{(Eq.II.18)}$$

le nombre de Prandlt:

$$\mathbf{Pr_f = \frac{c_f \mu_f}{K_f}} \qquad \text{(Eq.II.19)}$$

chapiter III : Résultats et discussions



III.1. Introduction

Nous avons constaté que les performances d'un système de réfrigération magnétique dépendent principalement du matériau utilisé et du champ magnétique appliqué. Dans ce chapitre, nous allons accorder une attention particulière aux sources de champ magnétique utilisées dans ces systèmes.

Tout d'abord, nous commencerons par dresser une liste des logiciels utilisés lors des phases de modélisation, d'analyse et d'optimisation des systèmes de réfrigération magnétique. Afin de regrouper plusieurs structures sous un même nom, nous les avons classées en trois catégories :

Structures de réfrigération magnétique de première génération : ces structures visent à étudier le principe de la réfrigération magnétique.

Structures de réfrigération magnétique de deuxième génération : il s'agit de systèmes de puissance moyenne.

Structures de réfrigération magnétique de troisième génération : ce dernier type de systèmes regroupe ceux qui visent à produire de grandes puissances frigorifiques.

III.2. Ansys électronique :

ANSYS Maxwell est un logiciel de simulation électromagnétique utilisé pour la conception et l'analyse de systèmes électromagnétiques. Il permet de modéliser et de résoudre des problèmes complexes liés aux champs électromagnétiques, tels que la distribution de courant, les forces électromagnétiques, la perte de puissance, le couplage électromagnétique, etc.

Voici quelques-unes des fonctionnalités clés d'ANSYS Maxwell :

Modélisation géométrique : Vous pouvez créer des modèles 2D ou 3D de vos systèmes électromagnétiques à l'aide d'outils de modélisation géométrique avancés.

Matériaux électromagnétiques : ANSYS Maxwell offre une vaste bibliothèque de matériaux électromagnétiques pour représenter les propriétés électriques et magnétiques des différents matériaux utilisés dans vos modèles.

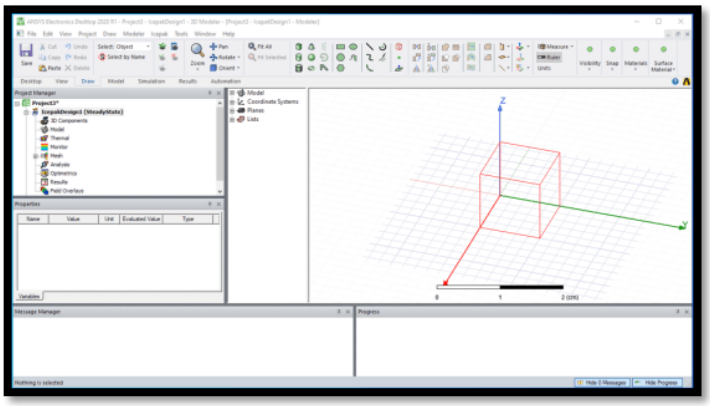
Analyse électromagnétique : Le logiciel utilise des méthodes de calcul numérique pour résoudre les équations électromagnétiques et déterminer les champs électromagnétiques, les courants, les tensions, les forces, les pertes de puissance, etc.

Analyse magnétostatique: ANSYS Maxwell permet d'effectuer des analyses de magnétostatique pour étudier les champs magnétiques statiques et les forces magnétiques dans les systèmes tels que les aimants permanents, les électroaimants, etc.

Analyse électromagnétique transitoire: Vous pouvez simuler les phénomènes électromagnétiques transitoires, tels que les surtensions, les transitoires de commutation, les phénomènes de coupure, etc., pour comprendre les effets temporaires dans vos systèmes électromagnétiques.

Couplage électromécanique: ANSYS Maxwell permet de prendre en compte le couplage entre les champs électromagnétiques et les structures mécaniques pour étudier les effets électromagnétiques sur les dispositifs mécaniques et vice versa.

Optimisation de conception : Vous pouvez utiliser ANSYS Maxwell pour optimiser vos conceptions électromagnétiques en utilisant des techniques d'optimisation intégrées pour maximiser les performances électromagnétiques, minimiser les pertes, améliorer l'efficacité. Ces fonctionnalités ne représentent qu'un aperçu des capacités d'ANSYS Maxwell. Le logiciel est utilisé dans diverses industries, notamment l'énergie, l'automobile, l'aérospatiale, l'électronique, etc., pour analyser et concevoir des systèmes électromagnétiques avancés



FigIII.1 Ansys maxwell

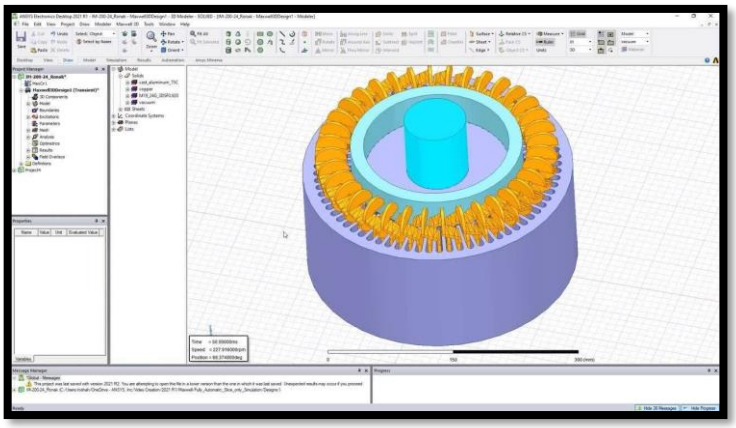


Fig III.2 géométrie sur Ansys maxwell

III.3. La structure n° 1 :

Comme expliqué dans l'introduction de ce chapitre, la première structure mentionnée existe actuellement à l'échelle du laboratoire. Notre objectif principal est de concevoir le circuit magnétique du système de réfrigération magnétique. Le cylindre de Halbach est construit à l'aide d'un nombre fini de pavés d'aimants, ce qui facilite sa fabrication, mais entraîne une diminution de 10% de l'induction dans l'entrefer (avec N = 8 segments).

Dans ce projet de master, les sources de champ utilisées pour ces systèmes sont construites avec des aimants permanents de type Ndfe30, ayant une perméabilité magnétique $\mu_r = 1.044$. Le matériau magnétocalorique utilisé est le gadolinium, qui a une perméabilité magnétique $\mu_r = 2$.

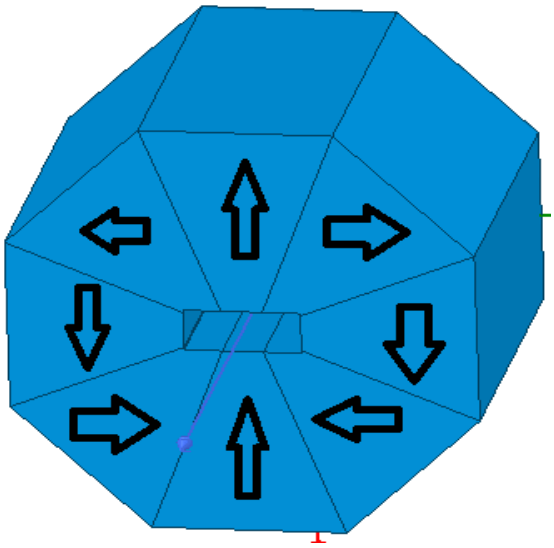


Fig III.3 géométrie de la 1ère structure

Tableau III.1. Dimensions de la première structure

Paramètre	Valeur [mm]
La hauteur de l'entrefer	100 mm
La largeur de l'entrefer	20 mm
La profondeur de l'entrefer	160 mm

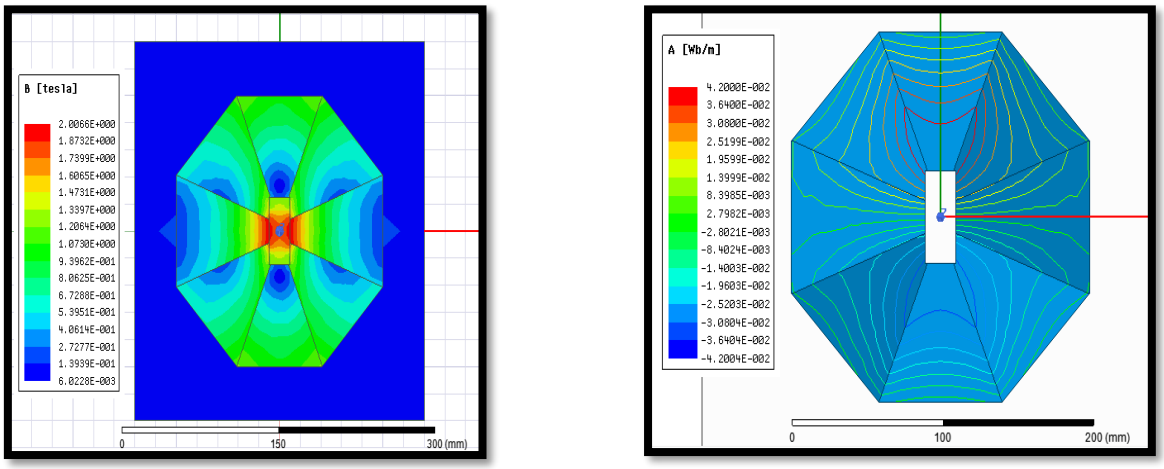


Fig III.4 Induction magnétique (T) et flux ligne (Wb/m) de 1ère structure

Dans cette section, nous étudions l'effet de la variation de la profondeur de l'entrefer de la source magnétique sur l'induction magnétique générée par les aimants permanents, dans le but d'obtenir les dimensions exactes de la source magnétique du réfrigérateur magnétique proposé.

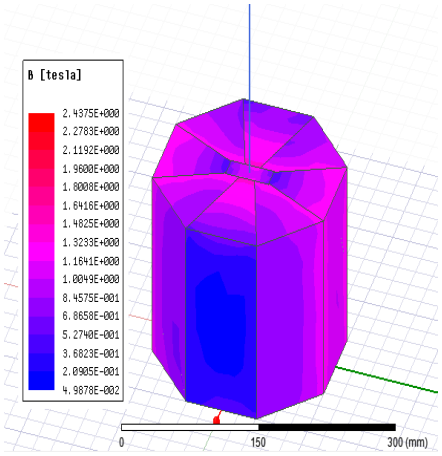
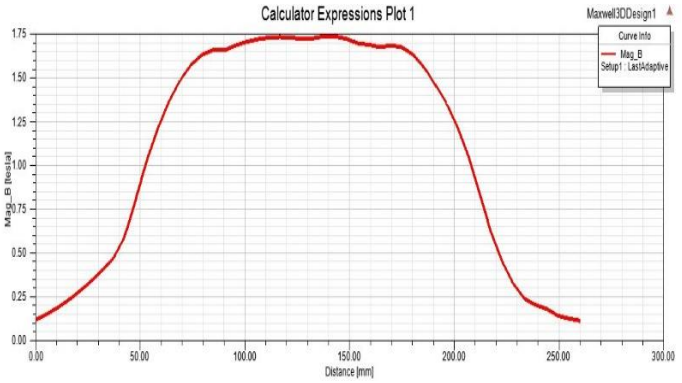
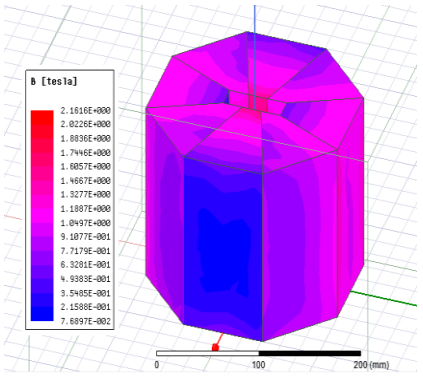
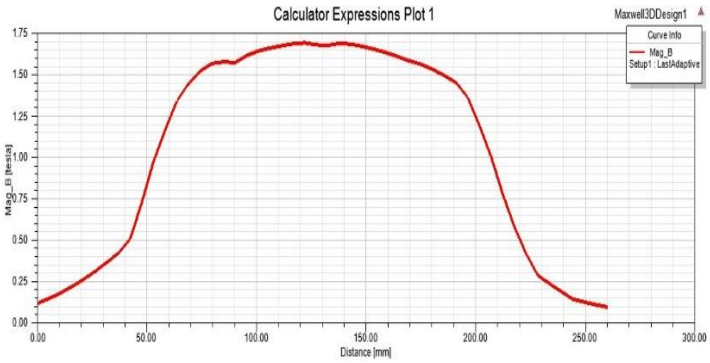
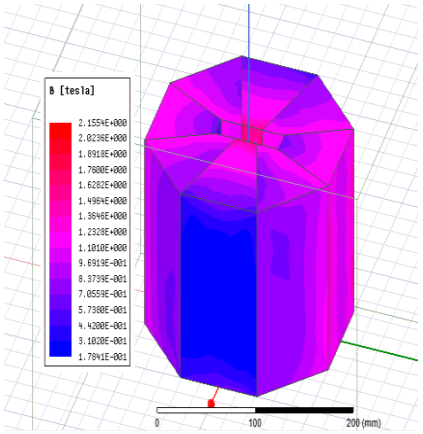
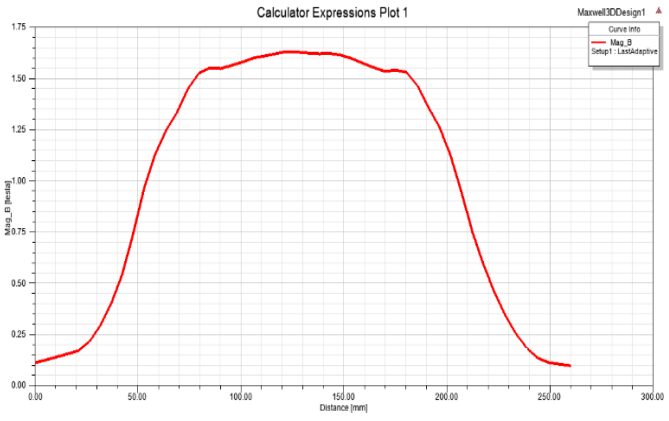
Le tableau III.2 illustre l'impact des différentes valeurs de la variation de la profendeur de l'entrefer de la source magnétique (H=50mm ; H=60mm ; H=70mm) sur l'induction magnétique pour la 1ère structure du circuit magnétique.

Nous remarquons que les graphiques de l'induction magnétique montrent une augmentation initiale jusqu'à atteindre une valeur maximale, puis se stabilisent pendant un certain temps avant de commencer à diminuer de manière symétrique à l'augmentation initiale de l'induction magnétique. Il est important de noter que la valeur maximale enregistrée du champ magnétique représente la valeur maximale fournie par la source magnétique.

Il est essentiel de noter que les graphiques de l'induction magnétique réelle peuvent varier considérablement en fonction des sources et des conditions spécifiques. La forme et le comportement exacts du graphique dépendront du système magnétique étudié, de la configuration des sources magnétiques et des paramètres physiques qui influencent le champ magnétique.

Le graphique de l'induction magnétique peut représenter les variations du champ en fonction d'une variable indépendante, telle que la distance, le temps ou une autre grandeur pertinente. La forme du graphique sera déterminée par la configuration des sources magnétiques et la distribution du champ magnétique dans l'espace.

Table III.2 Effet de la variation de la profendeur de l'entrefer sur l'induction magnétique pour la 1ère structure

	La géometrie en 3D	Les graphes de l'induction magnétique (T)
H = 50mm		
H = 60 mm		
H = 70 mm		

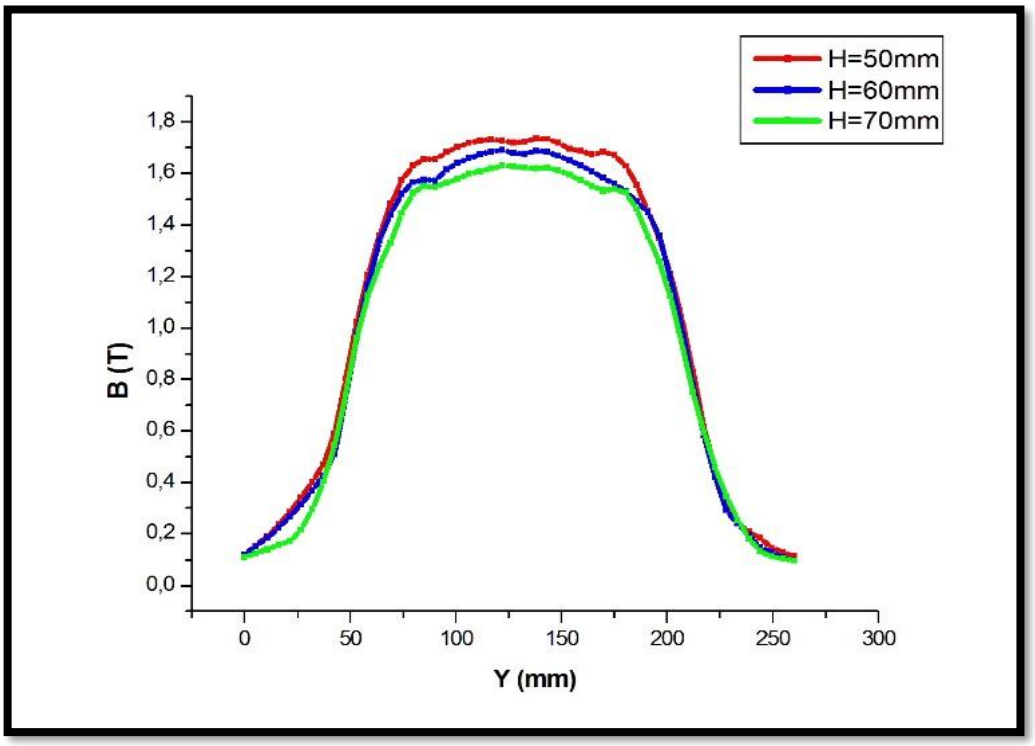


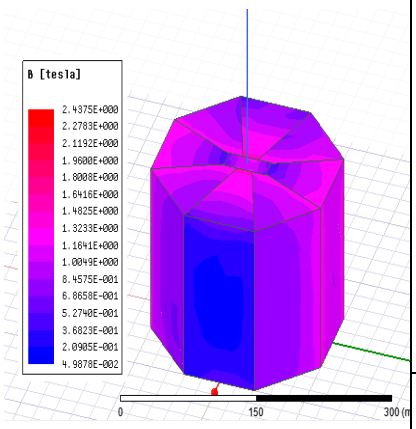
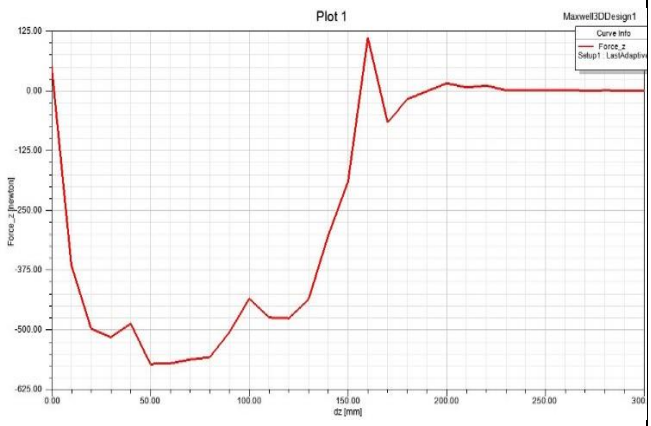
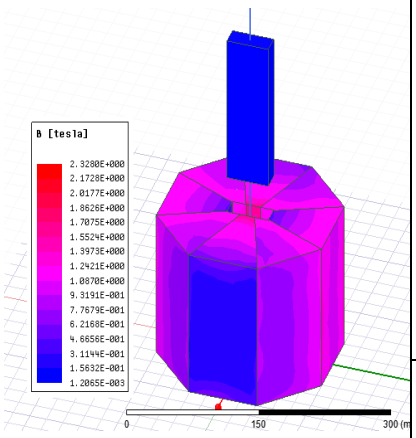
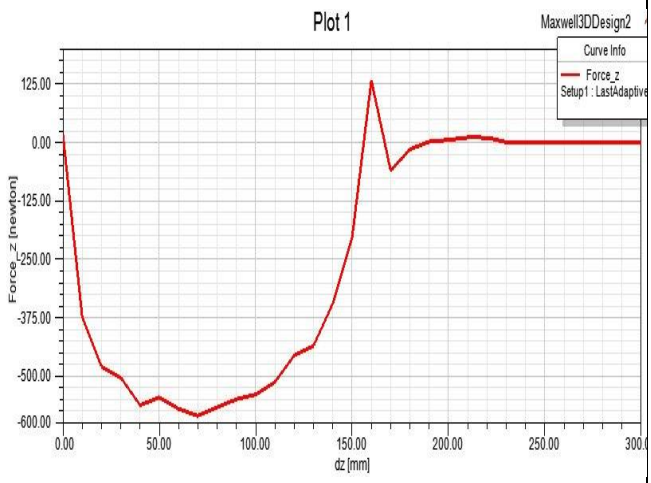
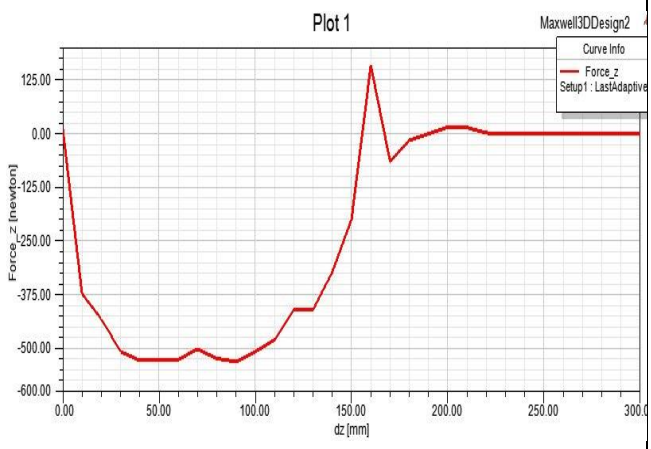
Fig III.5 Effet de la variation de la profondeur de l'entrefer sur l'induction magnétique

La Figure III.5 illustre de manière claire la valeur du champ magnétique fournie par le dispositif de réfrigération magnétique. En d'autres termes, pour différentes valeurs de la profondeur de l'entrefer, notre circuit magnétique basé sur les aimants permanents peut générer un champ magnétique de l'ordre de 1.7 Tesla.

Dimensionnement du moteur linéaire

Pour dimensionner le moteur linéaire, la force magnétique peut être évalué pour les différentes configurations de l'entrefer utilisé précédemment en considérons le matériau magnétocaloriques utilisé est le gadolinium.

Table III.3 Evolution de la force magnétique pour différentes valeur de l'entrefer pour la 1er structure pendant la magnétisation et la démagnétisation

Géométrie en 3D	H	Variations de la force magnétique
 Y= 0 mm	H = 50 mm	
 Y= 200 mm	H = 60mm	
	H = 70mm	

Le tableau III.3 montre que la force magnétique augmente à l'entrée de l'entrefer et atteint une valeur maximale puis se stabilise ainsi commence à diminuer à la sortie jusqu'à atteint une valeur nulle. La force magnétique joue un rôle important pour le choix du moteur linéaire pour faire mouvementer le régénérateur dans l'entrefer à l'intérieur de bloc des aimants c'est-à-dire le cas de magnétisation et devient nul en dehors des aimants c'est-à-dire le cas de démagnétisation.

La figure III.6 illustre l'impact de l'augmentation de la profondeur de l'entrefer en fonction de la distance. Nous constatons que les valeurs de la forces magnétique restent le mêmes pour différents valeurs de la profondeur de l'entrefer

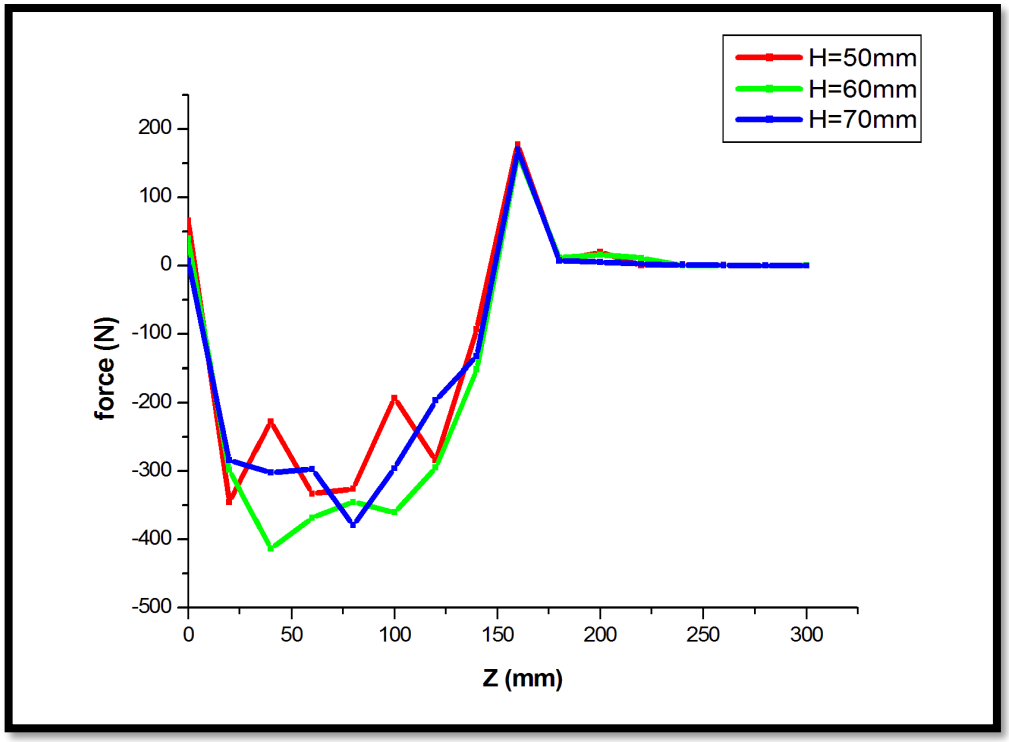


Fig III.6 Variation de la force magnétique pour différents valeurs de la profondeur de l'entrefer en fonction de la distance

Il faut noter que la valeur maximale de la force magnétique du moteur linéaire varie entre 300 et 400 N.

III.4. La structure n°2 :

Cette Structure est conçue par Vasile (INSA Strasbourg, France) et Muller (Cooletch Applications, France) est un système rotatif [Vasile, C.2006]. Il s'agit d'un cylindre de Halbach avec une ouverture pour permettre la rotation d'un disque.

La structure proposée peut être utilisé pour mesurer l'effet magnétocalorique d'une manière direct comme indiqué dans le papier de Chiba et al. 2015

La structure est composé d'aimants permanents NdFeB de perméabilité magnétique μ_r= 1.044

Et ajoute une culasse et Des pièces en matériau doux (acier) sont ajoutées pour compenser l'ouverture de la structure et pour concentrer le flux dans l'entrefer

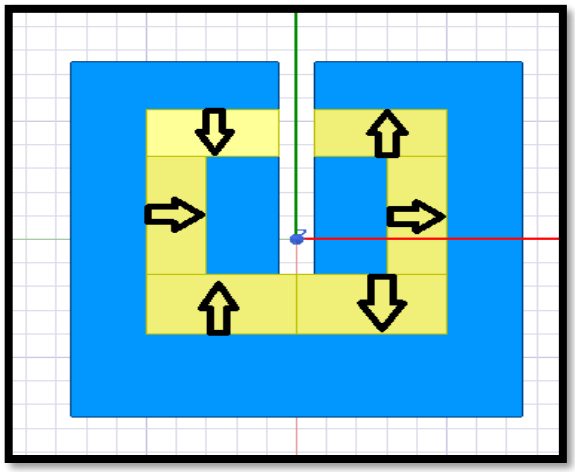


Fig III.7 La géométrie de 2éme structure

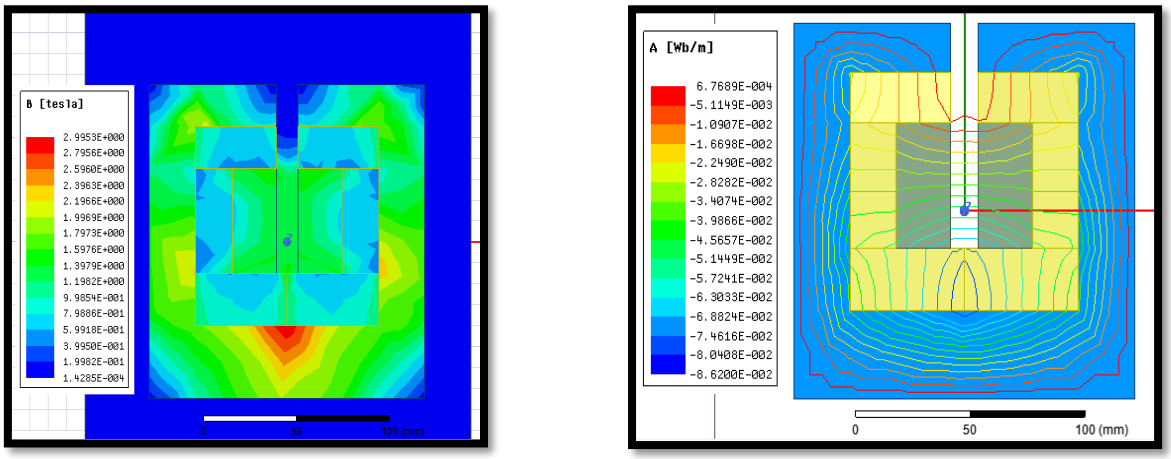
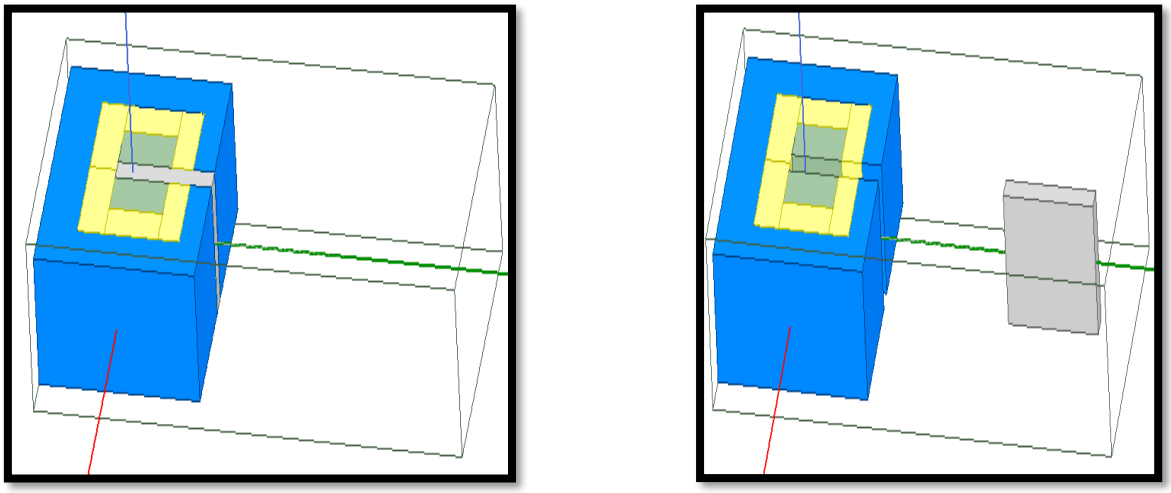


Fig III.8 l Induction magnétique (T) et ligne de flux l (Wb/m) pour la 2ème structure

Système linéaire pour mesurer l'effet magnétocalorique

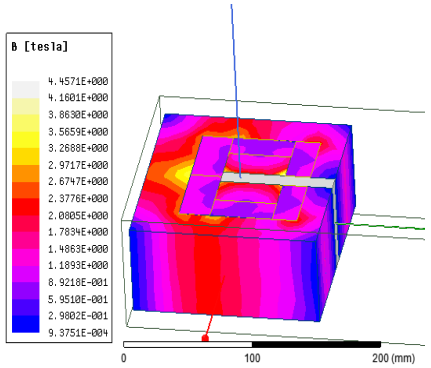
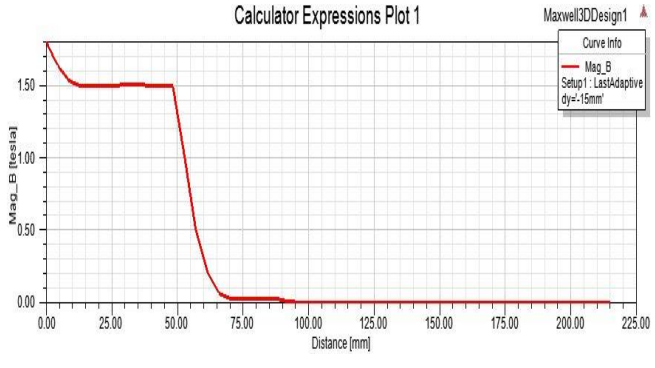


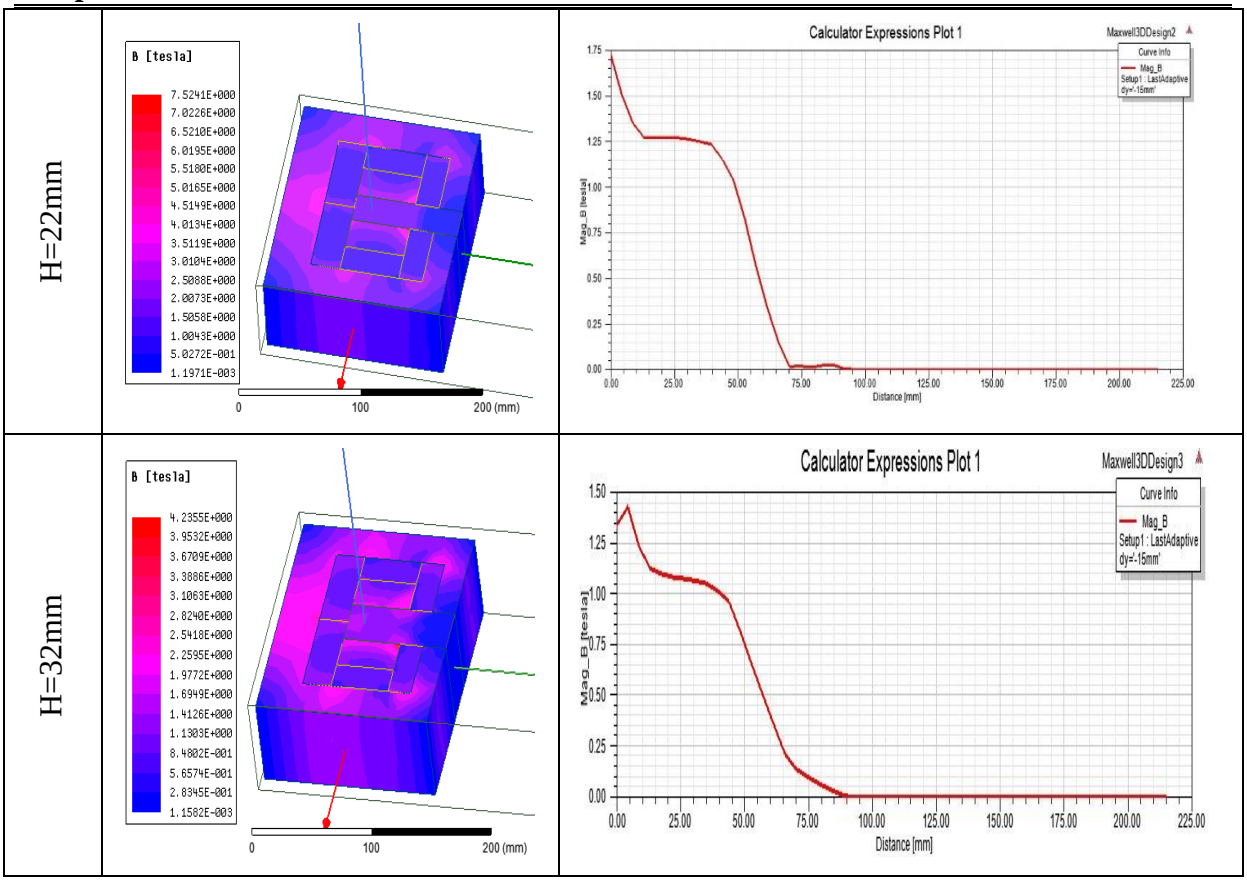
Y =0 mm Y =200mm

Fig III.9 Système linéaire pour mesurer l'effet magnétocalorique

Le tableau III.4 illustre que les graphiques de l'induction magnétique montrent une augmentation initiale jusqu'à atteindre une valeur maximale, puis se stabilisent pendant un certain temps avant de commencer à diminuer de manière symétrique à l'augmentation initiale de l'induction magnétique pour différentes valeurs de la profondeurs de l'enterfer (H=12mm ; H=22mm ; H=32mm).

Table III.4 Effet de la variation de la profendeur de l'entrefer sur l'induction magnétique pour la 2 ème structure

	Géométrie en 3D	Les graphes de champ magnétique (T)
H=12mm		



La Figure III.10 illustre de manière claire la valeur du champ magnétique fournie par le dispositif de réfrigération magnétique. En d'autres termes, pour différentes valeurs de la profondeur de l'entrefer, notre circuit magnétique basé sur les aimants permanents peut générer un champ magnétique de l'ordre de 1.5 Tesla.

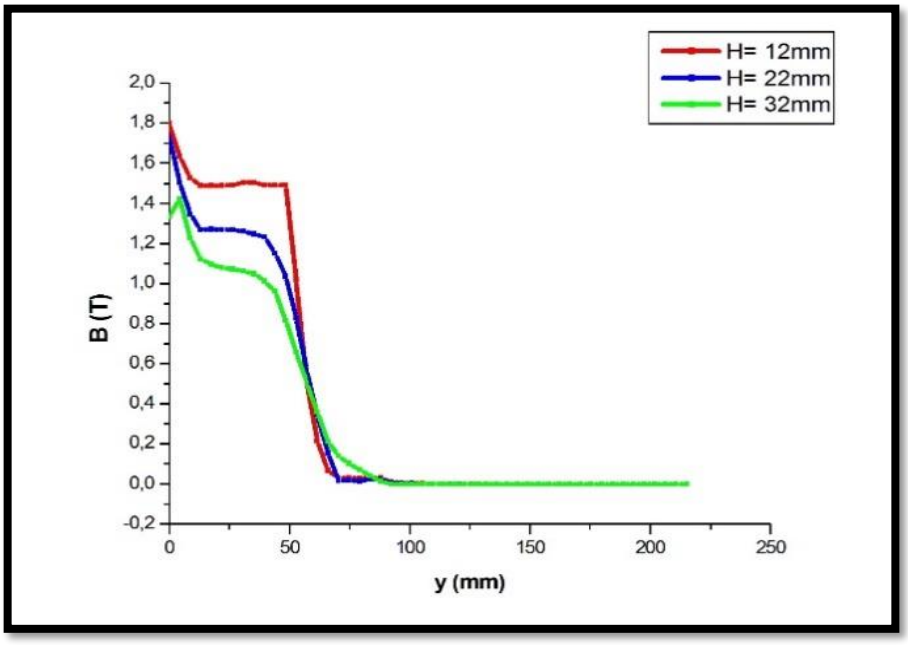
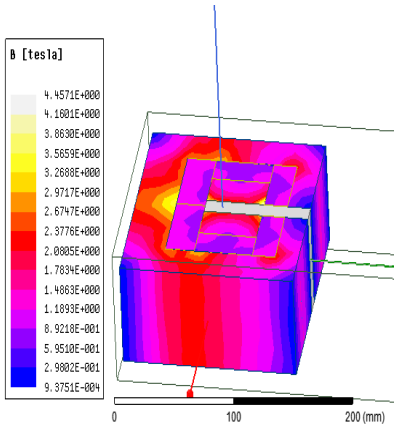
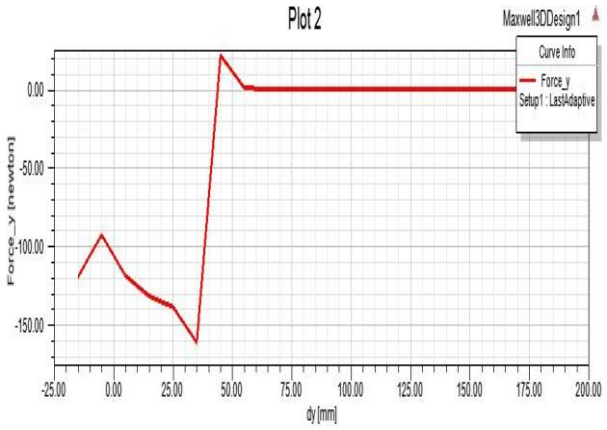
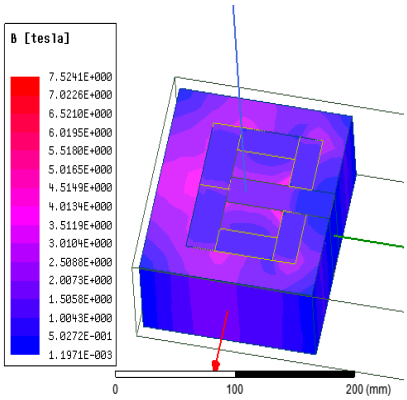
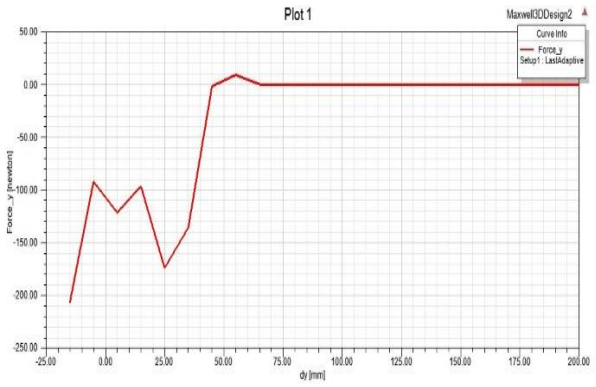
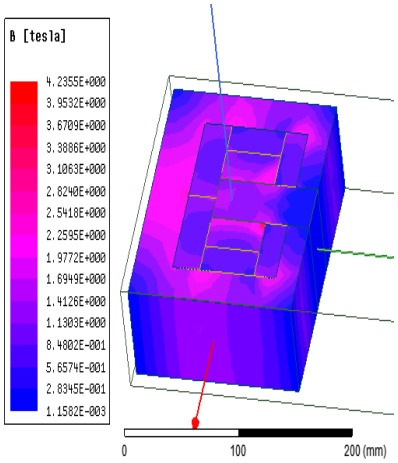


Fig III.10 Effet de la variation de la profondeur de l'entrefer sur l'induction magnétique

Le tableau III.5 illustre la variation de la force magnétique pour différentes valeurs de la profondeur de l'entrefer pour un champ magnétique enregistré de l'ordre de 1.5 T.

Table III.5 Evolution de la force magnétique pour différentes valeur de l'entrefer pour la 2ème structure pendant la magnétisation et la démagnétisation

	Géométrie en 3D	Variations de la force magnétique
H=12mm		
H=22mm		
H=32mm		

La figure III.11 montre l'évolution de la force magnétique en fonction de la distance pour différentes valeurs de la profondeur de l'entrefer. Un léger écart entre les différentes valeurs enregistré de la force magnétique pendant la variation de la profondeur.

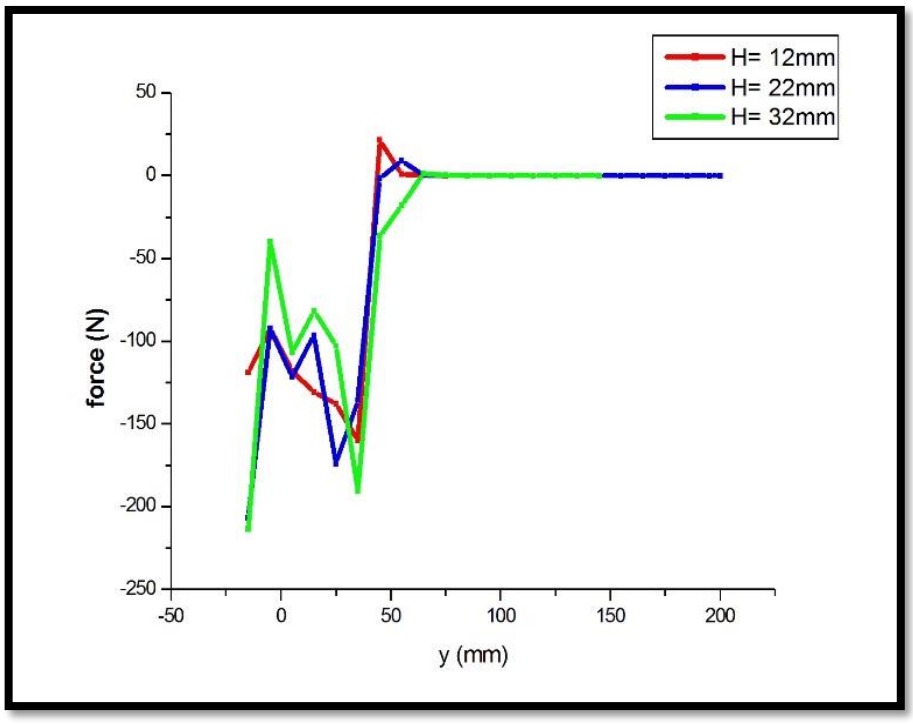


Fig III.11 Variation de la force magnétique pour différents valeurs de la profondeur de l'entrefer en fonction de la distance

III.5. La structure n° 3 :

Lee et al. (Ames Laboratory, USA) sont partis de la structure classique du cylindre de Halbach pour concevoir leur source de champ [Lee, S. J.2002]. Tout d'abord, le cylindre de Halbach est construit avec un nombre fini de pavés d'aimants, ce qui facilite sa fabrication mais conduit à une diminution de 10% de l'induction dans l'entrefer.

Dans cette section nous proposons une structure pour un réfrigérateur rotatif En utilisant des aimants NdFeB de perméabilité magnétique μ_r= 1.044 et de concentrateurs de flux en matériaux doux (acier) une telle structure permet d'obtenir une induction maximale.

La structure rotatif présente plusieurs avantages par rapport à la structure linéaire de point de vu compacité, l'espace et production du froid.

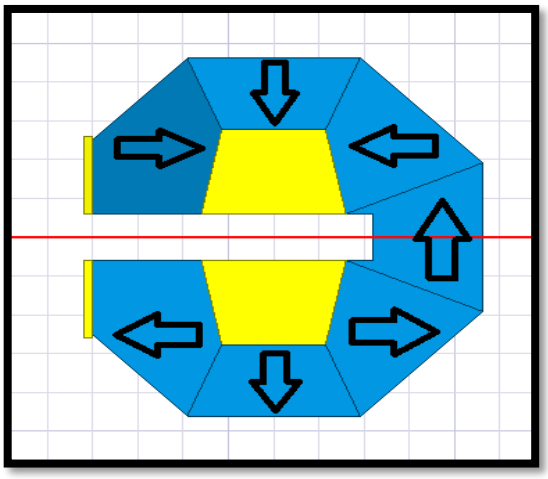


Fig III.12 geométrie de 3éme structure

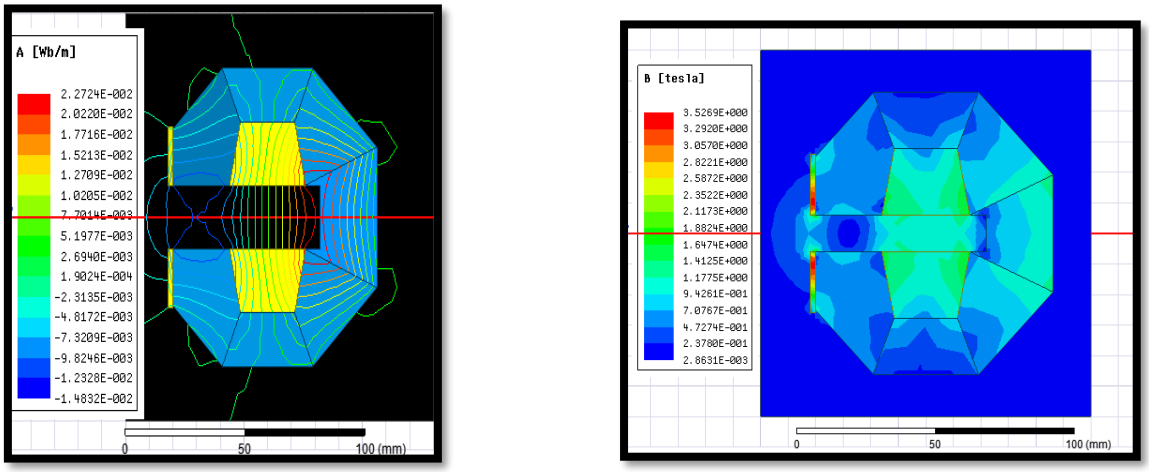
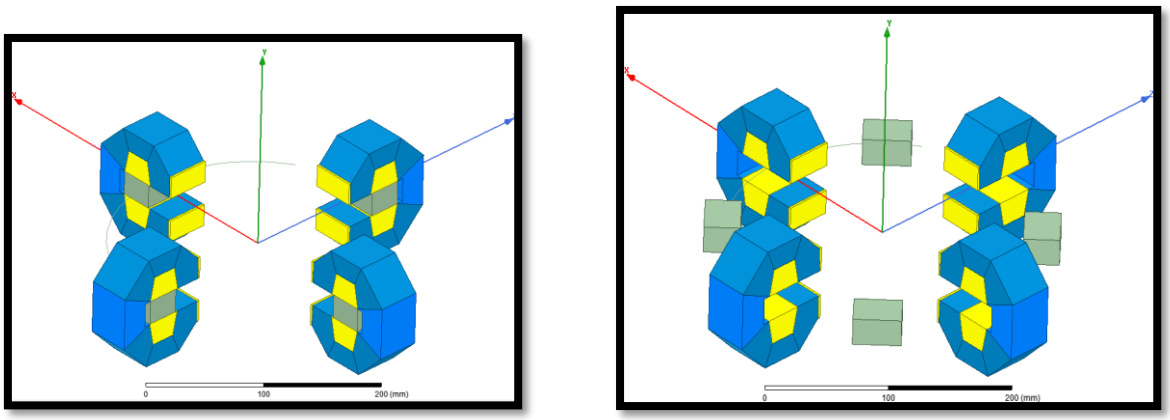


Fig III.13 Induction magnétique (T) et lignes de flux (Wb/m) de 3éme structure



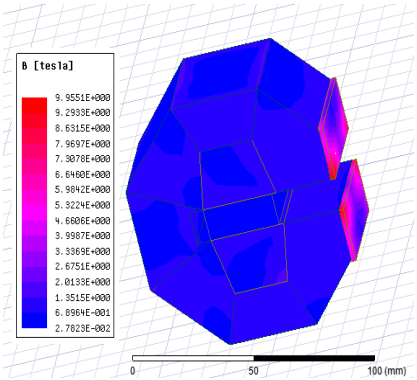
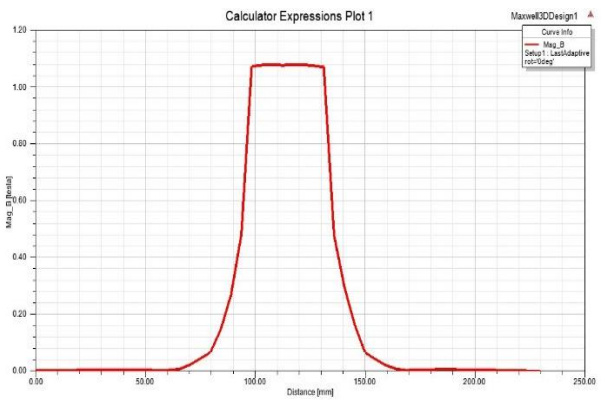
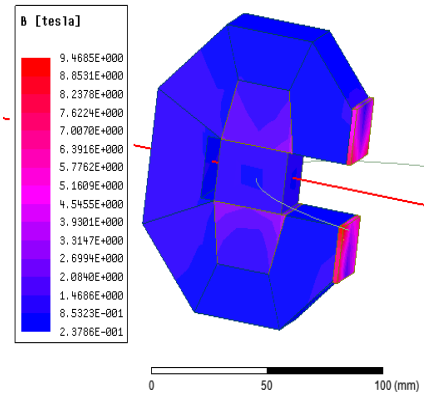
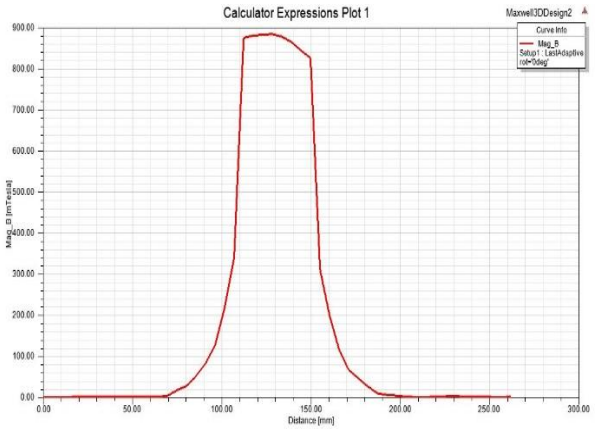
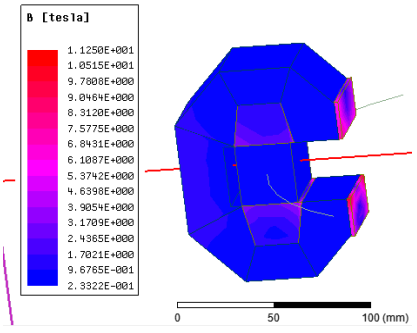
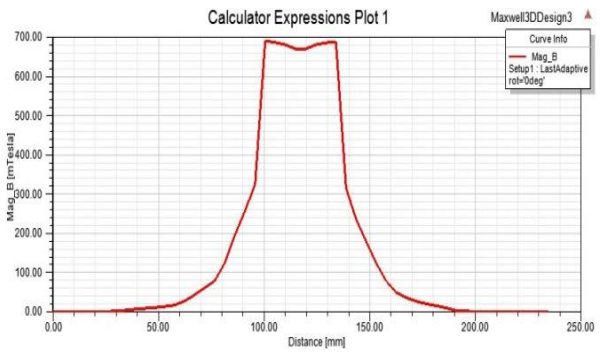
0° 45°

Fig III.14 La position de matériau magnétocalorique en degré (°)

Les figures III.12, III.13 et III.14 illustrent la géométrie de la troisième structure, l'induction magnétique avec les lignes de flux magnétique et la position du matériau magnétocalorique par rapport aux aimants permanents respectivement.

Le tableau III.6 illustre l'effet de la variation de la profendeur de l'entrefer sur l'induction magnétique pour la 3 ème structure

Table III.6 Effet de la variation de la profendeur de l'entrefer sur l'induction magnétique pour la 3 ème structure

	Géométrie en 3D	Les graphes de champ magnétique (T)
H = 12 mm		
H = 22mm		
H = 32 mm		

La figure III.15 résume l'impact de la variation de la profondeur de l'entrefer sur l'induction magnétique. L'effet de variation de la profondeur de l'entrefer présente un impact significatrice sur l'induction magnétique. La valeur maximale du champ magnétique est de l'ordre de 1.1 Tesla.

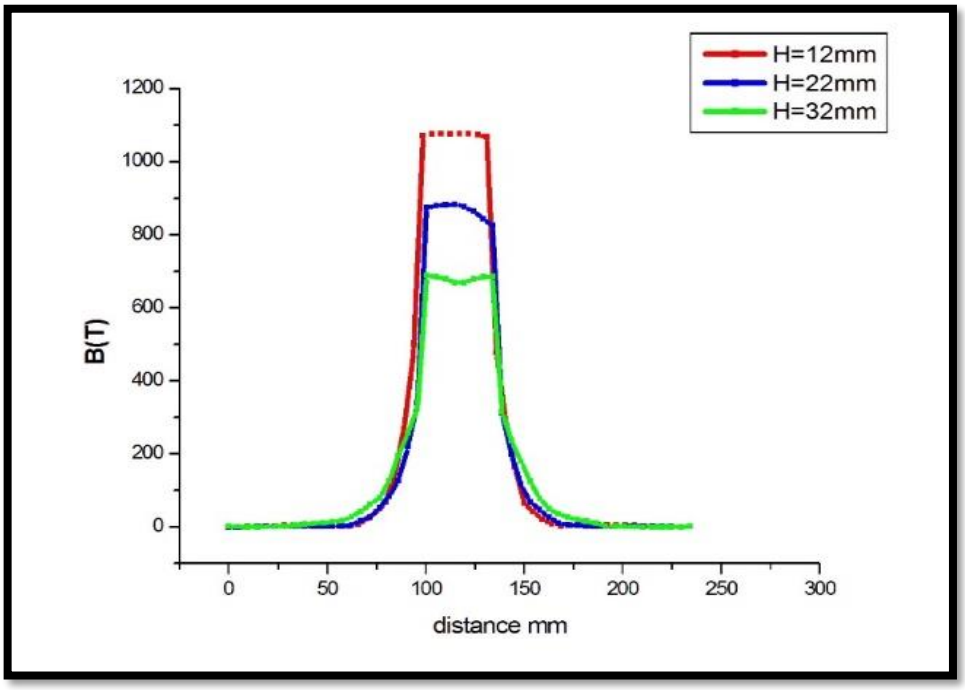
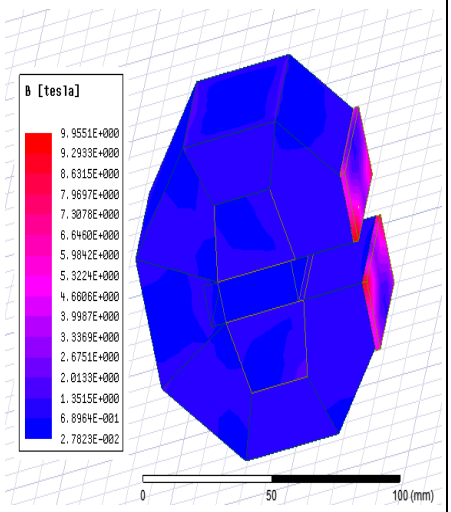
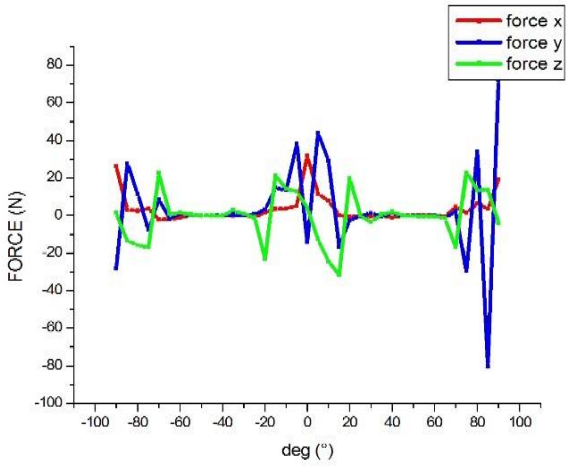
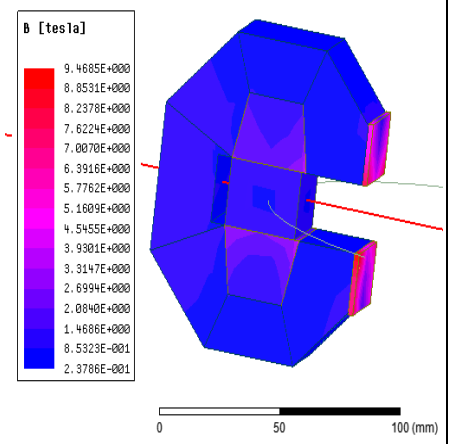
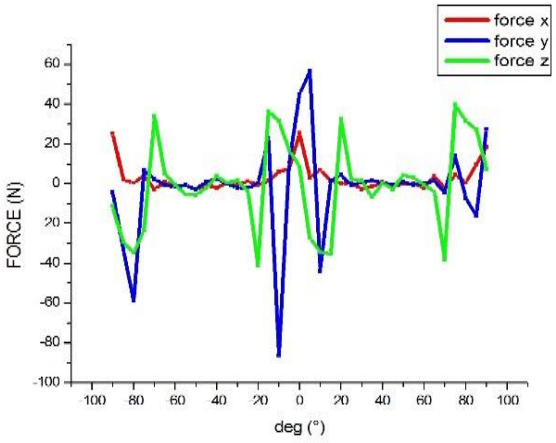
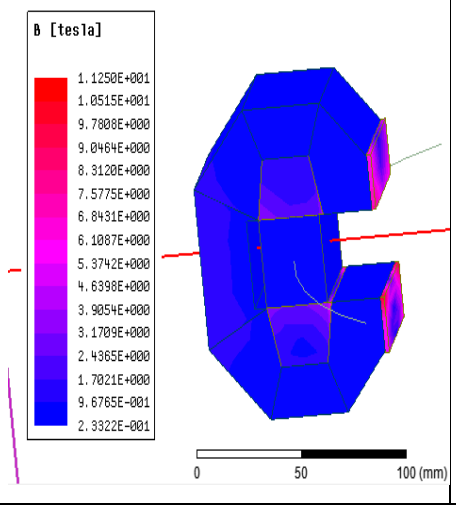
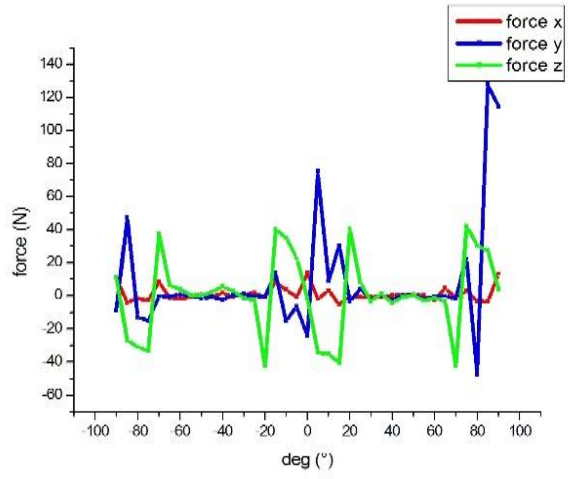


Fig III.15 Variation de la force magnétique pour différents valeurs de la profondeur de l'entrefer en fonction de la distance pour la 3 ème structure

Le tableau III.7 montre aussi l'effet de la variation de la profondeur de l'entrefer sur la force magnétique en vue de dimensionnement le système de rotation de notre réfrigérateur magnétique

Table III.7 Evolution de la force magnétique en fonction de l'angle de rotation pour différentes valeur de l'entrefer pour la 3ème structure pendant la magnétisation et la démagnétisation

	Géometrie en 3D	Variation de la force magnétique en fonction de l'angle de rotation
H = 12mm		
H = 22 mm		
H = 32 mm		

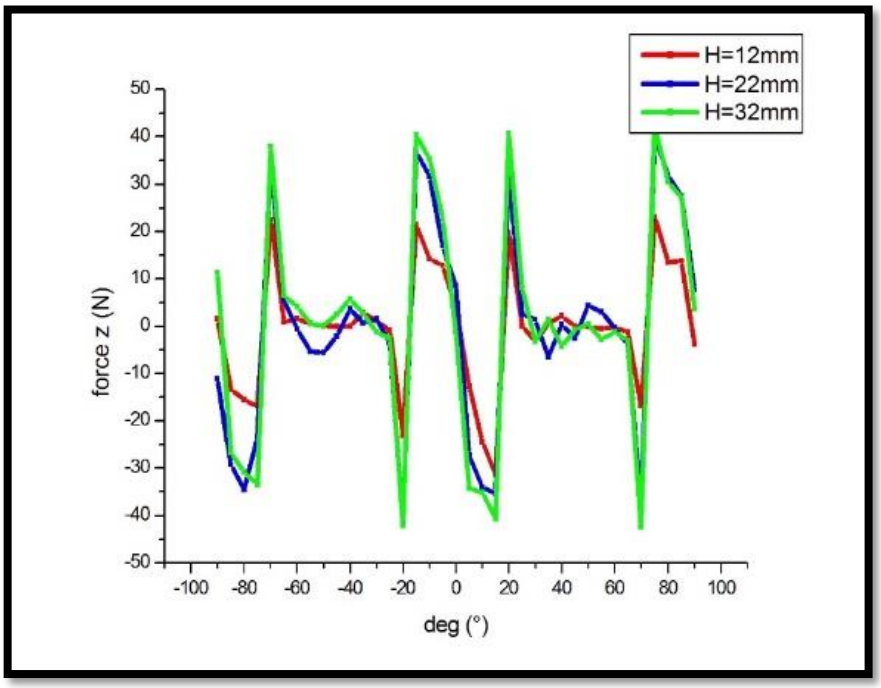
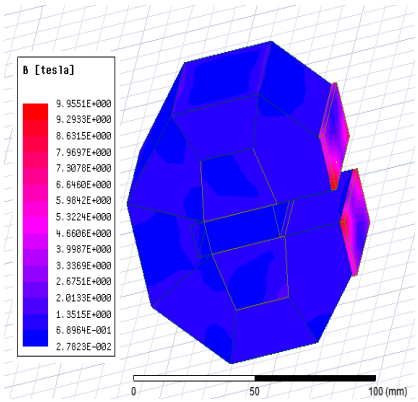
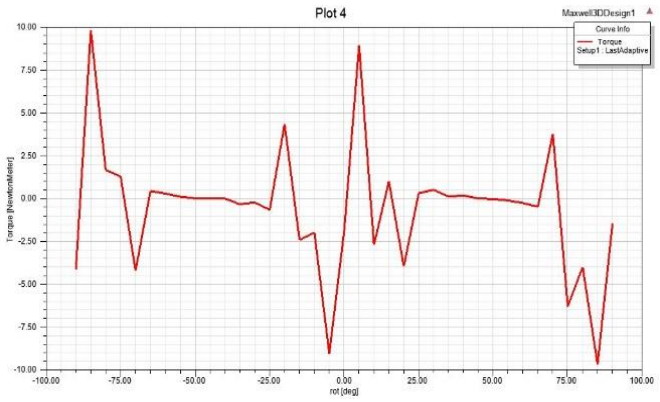
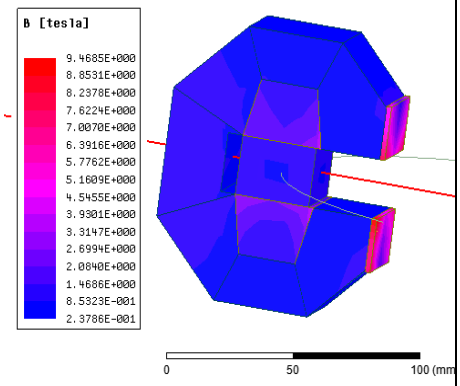
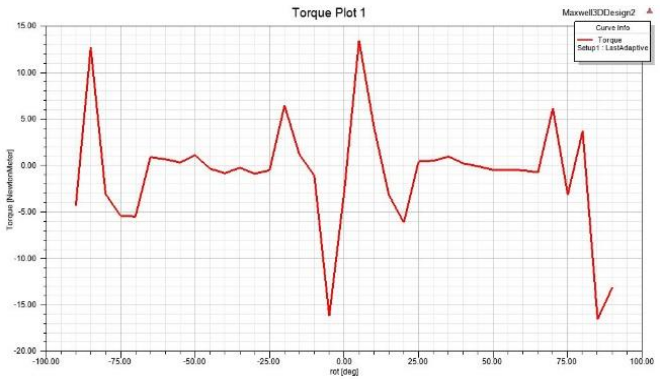
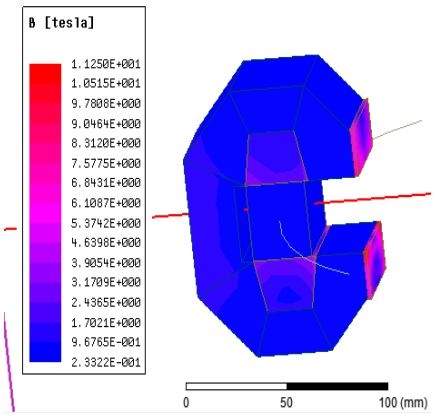


Fig III.16 Variation de la force magnétique en fonction de l'angle de rotation pour différentes valeurs de la profondeur de l'entrefer

Le tableau III.8 illustre la variation du couple de rotation des aimants. Afin d'établir le couple de rotation, un courant électrique a été donné pour définir d'une manière très claire les courbes mentionné dans le tableau III.8

On remarque dans ces graphes le couple stable à partir de -60 (°) jusqu'à -25 (°) dans la valeur 0 [N.m] et commence à augmenter de la valeur -25 (°) jusqu'à 25(°) et atteindre la valeur 20 [N.m], et en note dans 0(°) le couple est nul (0(N.m)) et revient à stabiliser à la valeur 0 [N.m] et continu a cette façon toute la période de travail.

Table III.8 Variation du couple de rotation pour 3eme structure

	Géométrie en 3D	Le couple de rotation (N.m)
H= 12mm		
H= 22mm		
H= 32mm		

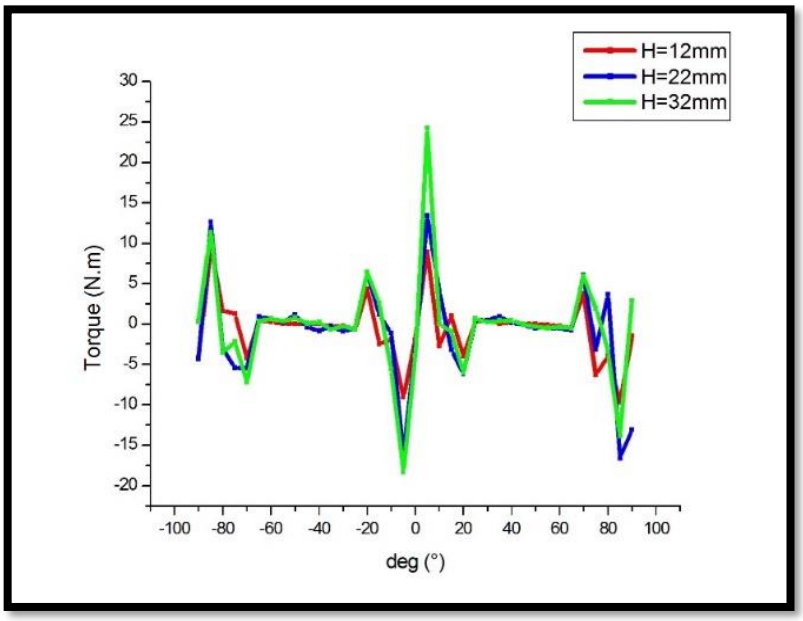


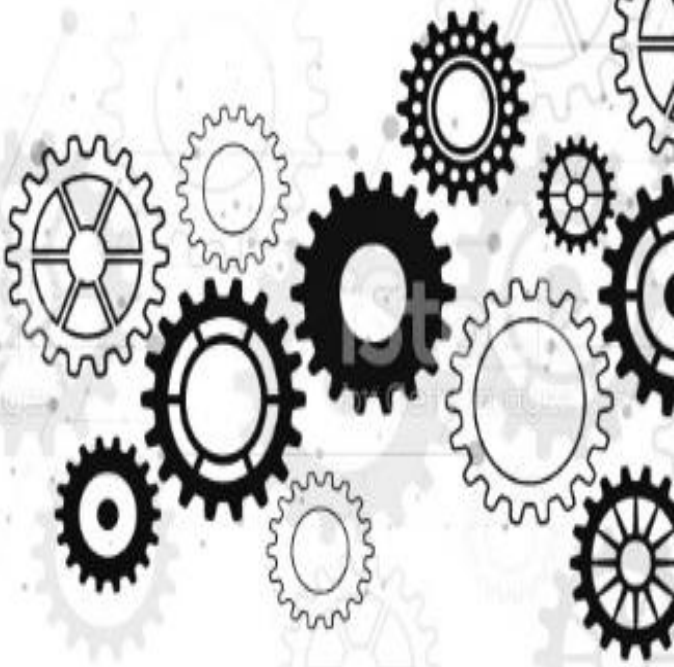
Fig III.17 Impact de la variation de la profondeur de l'entrefer sur les couples de rotation

La figure III.17 illustre d'une manière très claire que le couple de rotation présente un impact très faible sur la longueur de l'entrefer. Les résultats enregistrés dans cette section restent à valider d'une manière expérimentale.

III.6. Conclusion

Grâce à notre étude de différentes structures proposées précédemment où nous avons changé les paramètres et les dimensions, Nous avons remarqué plusieurs changements de valeurs d'induction magnétique, la force magnétique et le couple de rotation. A travers ces valeurs nous concluons que ces valeurs peuvent être employés dans le dimensionnement du circuit magnétique de notre système de réfrigération.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES



Conclusion

L'objectif principal de notre travail était de concevoir la source magnétique d'un dispositif de réfrigération magnétique utilisant le gadolinium comme un réfrigérant solide et des aimants permanents. Après notre étude, nous avons conclu ce qui suit :

- La réfrigération magnétique est une alternative solution pour la réfrigération peut être concurrencé les systèmes de réfrigération traditionnels. Elle présente un fort potentiel pour la création de systèmes compacts à haute efficacité énergétique tout en préservant l'environnement.
- Dans notre étude, nous avons proposé des structures pour générer un champ magnétique dans un système de réfrigération magnétique linéaire et rotatif.

En ce qui concerne les perspectives futures, nous recommandons :

- Étudier la génération de courants de Foucault dans le circuit magnétique afin de mieux comprendre les phénomènes associés.
- Approfondir l'étude des phénomènes d'hystérésis pour mieux optimiser les performances du dispositif.
- Ces deux aspects contribueront à améliorer notre compréhension des processus magnétiques impliqués dans la réfrigération magnétique et à perfectionner les systèmes existants.

BIBLIOGRAPHIE

[Younes Chiba, 2017] **Y. Chiba**, A. Smaïli, O. Sari, Enhancements of thermal performances of an active magnetic refrigeration device based on nanofluids, 23 (1), 31-38, Mechanika, 2017

[Younes Chiba, 2017] **Chiba Y**., Experimental and numerical study on the behavior of a multilayer for active magnetic refrigerator based on La-Fe-Co-Si, IEEE Transactions on Magnetics, 2017

[Perkins, 1835] Perkins, J. (1835). Apparatus for producing cold and cooling fluids.
British Patent No. 6662.

[ENIEM, 2005.] Données techniques de la société ENIEM. Rapport de présentation de l'entreprise. ENIEM,2005.

[M. Boidin, 2004] M. Boidin, L. Blocquaux, H. Touaïbia, and Z. Zemirli. Rapport principal ; Etude de la flière électricité électronique électroménager, Algérie 2004. Euro Développement Pme, Alger, Juin2004.

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

[A. Smaïli 1997] A. Smaïli. Développement de matériaux composites pour la réfrigération magnétique. Ph. D.Thesis, Université du Québec, Canada, 1997

[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

[Warburg.1881] Warburg E., Magnetische Untersuchungen über einige Wirkungen der Koerzitivkraft,Ann. Phys., 1881, 13, pp. 141 –164.

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

[Brown G.V,1976] Brown G.V., Magnetic heat pumping near room temperature. J. Appl. Phys. 1976, Vol.

47, pp. 3673 –3680.

[Gschneidner, K .1997] 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, p. 209.

[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.

[A. Lebouc,2005] A. Lebouc, F. Allab, J.Fournier, and J. P. Yonnet. Réfrigération magnétique. Techniques d'Ingénieur, RE28, 2005.

[Tech l'ingénieur,1976.] Techniques de l'ingénieur RE 28- 3 (8) :36733680, 1976.

[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.

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

[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.

[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.

[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

[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.

[Younes Chiba, 2014] Chiba, Y., Sari, O., Smaïli, A., Mahmed, C., Nikkola, P. (2015). Experimental Study of a Multilayer Active Magnetic Regenerator Refrigerator-Demonstrator. In: Dincer, I., Colpan, C., Kizilkan, O., Ezan, M. (eds) Progress in Clean Energy, Volume 1. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-16709-1_16.

[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.

[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.

[Younes Chiba, 2015] Younes Chiba, Contribution á l'étude d'un réfrigérateur á régénération magnétique active opérant près de la température ambiante : considérations thermo fluides, Thèse de doctorat, ENP, 2015.

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

[F. P. Incropera, 2007] 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.

[Vasile, C.2006] Vasile, C. et Muller, C. (2006). Innovative design of a magnetocaloric system. Int. J. Refrig., 29(8):1318–1326. doi :10.1016/j.ijrefrig.2006.07.016.

[Lee, S. J.2002] Lee, S. J., Kenkel, J. M., Pecharsky, V. K. et Jiles, D. C. (2002). Permanent magnet array for the magnetic refrigerator. J. Appl. Phys., 91(10):8894–8896. doi :10.1063/1.1451906.