

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

*MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE*

*UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI TIZI-OUZOU
FACULTE DE GENIE DE LA CONSTRUCTION
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE*



*Université Mouloud Mammeri
Tizi-ouzou*

*Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme de master
académique en Génie Mécanique*

Option : Energétique

Thème :

***Etude de la réfrigération magnétique autour
de la température ambiante***

Encadré par :

Mr : Y.CHIBA

Mr: M.HAMZAOUI

Réalisé par :

Ibrahim AIT TAYEB.

Aksel SEGHOUANE.

Promotion : 2013-2014

REMERCIEMENTS

Nous tenons à exprimer notre sincère gratitude à nos promoteurs Mr : Y.CHIBA (Enseignant à l'université de MEDEA) qui nous a proposé ce thème et nous a énormément aidé et Mr : M.HAMZAOUI pour avoir accepté de diriger et suivre notre travail.

Nous remercions également Mr : H. HOUACINE, Mr : N.LAUCHE et Mr : SERGIU LIONTE pour l'aide précieuse procurée.

Nos remerciements vont aussi aux membres de jury pour avoir accepté d'examiner et de juger notre travail.

Un grand merci à toutescelles et tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de notre projet.

Sans oublier tous nos amis qui se reconnaîtront et que nous ne remercions pas car ils n'ont rien à avoir avecce qu'on a fait.... .^_~.

DEDICACES

Je dédie ce modeste travail à mes très chers parents pour qui je tiens à exprimer l'amour et le respect les plus distingués, à mes chers frères, sœur, beau-frère et belles-sœurs, nièces et neveux, cousines et cousins et aux familles AIT TAYEB et MEHRECHE.

A ma très chère fiancée que je remercie pour le soutien et la patience dont elle a fait preuve ces derniers mois ainsi que sa famille.

A la mémoire de mon oncle, ma tante et mes grands-parents.

A tous les citoyens de mon village.

Ibrahim...

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.

Aksel ...

SOMMAIRE

RESUME

NOMENCLATURE

TABLE DES FIGURE

LISTE DES TABLEAUX

INTRODUCTION GENERALE1

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES MACHINES FRIGORIFIQUE

I.1. Introduction.....3

I.2. Historique.....4

I.3. Les machines frigorifiques.....5

 a. Systèmes discontinus.....5

 b. Systèmes continus.....5

 b.1. Systèmes thermoélectriques (Peltier).....5

 b.2. Systèmes à compression mécanique.....5

 b.2.a. Systèmes à compression de vapeur liquéfiable.....6

 b.2.b. Systèmes à cycle à gaz.....6

 b.3. Systèmes à compression thermique.....6

 b.3.a. Systèmes à éjection.....6

 b.3.b. Systèmes à sorption.....7

 - Systèmes à absorption.....7

 - Systèmes à adsorption.....8

I.4. Conclusion.....9

CHAPITRE II : LA REFRIGERATION MAGNETIQUE

II.1. Introduction.....10

II.2. Effet magnétocalorique.....10

II.3. Historique.....11

II.4. Principe.....14

II.5. Revue sur les démonstrateurs de la RM.....16

a. Prototype magnétique de Brown (1976)	17
b. Prototype de Steyert et Barclay (1978-1983)	18
c. Prototype de Kirol et Dacus (1988)	18
d. Prototype de Green et al. (1990)	19
e. Prototype de Zimm et al. (1998)	20
f. Prototype de Hirano et al. (Système Japonais) (2002)	21
g. Prototype de Rowe et al. (2002-2006)	22
h. Dispositif réalisé en Espagne.....	23
i. Prototype de Okamura et al. (Système Japonais) (2006-2007)	24
j. Dispositif du G2Elab (2008)	24
k. Prototype de Zimm et al. (2007-2010)	25
l. Prototype de Balli et al. (2010)	26
II.6. Approche thermodynamique de l'EMC.....	27
II.7. Théorie de champ moléculaire.....	29
II.8. Conclusion.....	31
<i>CHAPITRE III : COMPOSITION ET FONCTIONNEMENT D'UN SYSTEME DE RM</i>	
III.1. Introduction.....	32
III.2. Composition	32
III.3.Fonctionnement.....	33
III.4. Cycles de réfrigération magnétique.....	34
a. Cycle magnétique de Carnot.....	34
b. Cycle magnétique d'Ericsson/Stirling.....	36
c. Cycle magnétique de Brayton.....	37
d. Cycle magnétique à régénération active (AMR)	37
III.5. Conclusion.....	40
<i>CHAPITRE IV : MATERIAUX MAGNETIQUE ET SOURCES DE CHAMP.</i>	
IV.1. Introduction.....	41
IV.2. Quelques notions de base sur le magnétisme.....	41

IV.3. Matériaux magnétiques.....	41
IV.4. Matériaux magnétocaloriques.....	42
IV.5. Différents moyens de production de champ magnétique.....	44
IV.5.1. Les électroaimants.....	44
IV.5.2. Les aimants supraconducteurs.....	45
IV.5.3. Les aimants permanents.....	45
IV.6. Conclusion.....	46

CHAPITRE V : RESULTATS NUMERIQUES ET INTERPRETATIONS :

V.1. Introduction.....	47
V.2. Dimensionnement d'une source de champ magnétique.....	47
V.3. Calcul des propriétés thermomagnétiques du matériau magnétocalorique.....	50
V.4. Etude du cycle de Brayton.....	53
V.5. Conclusion.....	56
<i>CONCLUSION ET PERSPECTIVES.....</i>	<i>57</i>

BIBLIOGRAPHIE

ANNEXE

ANNEXE A : Nomenclature des principaux fluides frigorigènes

ANNEXE B : Autres modes de réfrigération

ANNEXE C : Résultats expérimentaux (code de calcul)

RESUME

Résumé :

Le problème des émissions des réfrigérants conventionnels tel que les CFC, HCFC et HFC ont poussé les chercheurs ces dernières années à trouver une alternative à cette technique.

La réfrigération magnétique est une technologie de rupture, basée sur la propriété de certains matériaux et alliages magnéto-caloriques à changer de température lorsqu'ils sont soumis à une variation de champs magnétique.

Technologie « verte », insonore et efficacité énergétique plus élevées, les machines de réfrigération usuelles, pourrait être ainsi complètement substitué au profit de nouveaux systèmes de réfrigération magnétiques

Ce mémoire est porté sur l'étude de cette nouvelle technologie émergente, son principe, sa composition et son mode de fonctionnement.

Abstract:

The problem of the emissions of the conventional cooling agents such as CFC, HCFC and HFC pushed the researchers these last years to find an alternative to this technique.

The magnetic refrigeration is a technology of rupture, based on the property of some materials and magnetocaloric alloys to change temperature when they are subjected to a variation of magnetic fields.

“Green” technology, soundproof and energy effectiveness higher, the usual machines of refrigeration, could be thus completely substituted for the profit of new magnetic systems of refrigeration

This memory is related to the study of this new emergent technology, its principle, composition and operating mode

NOMENCLATURE

ABREVIATIONS :

<i>Abréviation</i>	<i>Signification</i>
AMR	Régénération magnétique active
CFC	Cholorofluorocarbure
COP	Coefficient de performance
COP _{Brayton}	Coefficient de performance de Brayton
COP _{Carnot}	Coefficient de performance de Carnot
COP _{Ericsson}	Coefficient de performance d'Ericsson
EMC	Effet magnétocalorique
Gd	Gadolinium
HCFC	Hydrochlorofluorocarbure
HFC	Hydrofluorocarbure
MCM	Matériau magnétocalorique
RM	Réfrigération magnétique
MFT	Théorie du champ moléculaire

LETTRES ROMAINES

<i>Symbole</i>	<i>Grandeur</i>	<i>Unité</i>
B	Induction	[T]
C _p	Capacité calorifique	[J/Kg.K]
ΔS	Variation de l'entropie	[J/Kg.K]
ΔS_m	Variation de l'entropie magnétique	[J/Kg.K]
ΔT	Variation de la température	[K]
ΔT_{ad}	Variation de température adiabatique	[K]
E _i	Energie d'un moment magnétique	[A.m ²]
g _J	Facteur de Landé	[-]
H	Champ magnétique	[A/m]

H_m	Champ moléculaire	[A/m]
H_0	Champ appliqué	[A/m]
I	Intensité électrique	[A]
J	Moment cinétique totale	[-]
k_B	Constante de Ludwig Boltzmann	[J/K]
L	Longueur	[m]
M	Aimantation	[A/m]
m	Masse du solide	[Kg]
n	Nombre de Spire	[-]
N_A	Nombre d'Avogadro	[mol ⁻¹]
P	Puissance utile	[W]
Q	Quantité de chaleur	[J]
Q_c	Quantité de chaleur de la source chaude	[J]
Q_f	Quantité de chaleur de la source froide	[J]
R	Constante des gaz parfaits	[J/mol.K]
S	Entropie	[J/Kg.K]
S_e	Entropie des électrons de conduction	[J/Kg.K]
S_m	Entropie magnétique	[J/Kg.K]
S_r	Entropie du réseau	[J/Kg.K]
T	Température	[K]
T_0	Température initiale	[K]
T_c	Température de Curie	[K]
T_D	Température de Debye	[K]
V	Différence de potentiel	[V]
W	Travail consommé	[J]
x	Susceptibilité (Variable de Langevin)	[-]

LETTRES GRECS

<i>Symbole</i>	<i>Grandeur</i>	<i>Unité</i>
μ_0	Perméabilité du vide	[H/m]
μ_B	Magnéton de Bohr	[H/m]
μ_i	Perméabilité magnétique	[H/m]
λ	Coefficient du champ moléculaire de WEISS	[-]

FONCTION

$B_J(x)$	Fonction de Brillouin
----------	-----------------------

TABLE DES FIGURES

Chapitre I

<i>Figure I.1 : Systèmes thermoélectriques (Peltier).....</i>	<i>5</i>
<i>Figure I.2 : L'évaporation d'un liquide.....</i>	<i>6</i>
<i>Figure I.3 : Machine frigorifique à éjection.....</i>	<i>7</i>
<i>Figure I.4 : Système à absorption.....</i>	<i>8</i>
<i>Figure I.5 : Système à adsorption.....</i>	<i>8</i>

Chapitre II

<i>Figure II.1 : Moteur magnétothermique de Tesla.</i>	<i>11</i>
<i>Figure II.2 : Extrait d'un article rédigé par Giaouque et MacDougall relatant leurs expérimentations.....</i>	<i>12</i>
<i>Figure II.3 : Effet magnétocalorique.....</i>	<i>14</i>
<i>Figure II.4 : Schéma du principe de l'équivalence de la réfrigération magnétique avec la réfrigération conventionnelle.....</i>	<i>15</i>
<i>Figure II.5: Schémas du prototype de Brown, d'après [Brown, 1976].....</i>	<i>17</i>
<i>Figure II.6: Représentation schématique du prototype de Steyert.....</i>	<i>18</i>
<i>Figure II.7 : Schémas du prototype de Kirol et Dacus.....</i>	<i>19</i>
<i>Figure II.8 : Schéma du prototype de Green et al.....</i>	<i>20</i>
<i>Figure II.9: Schéma du premier prototype de Zimm et al.....</i>	<i>21</i>
<i>Figure II.10 : Schéma du prototype de Hirano et al.....</i>	<i>22</i>
<i>Figure II.11: Schéma du prototype de Rowe et al.....</i>	<i>23</i>
<i>Figure II.12: Dispositif magnétique réalisé en Espagne.....</i>	<i>23</i>
<i>Figure II.13 : Le dispositif japonais initial (gauche) et amélioré (droite).....</i>	<i>24</i>
<i>Figure II.14: Le dispositif du G2Elab.....</i>	<i>25</i>
<i>Figure II.15 : Photo et schéma du 3ème prototype de Zimm et al. [Zimm et al., 2007].....</i>	<i>26</i>
<i>Figure II.16 : Photo de prototype de Balli et al.....</i>	<i>26</i>

Chapitre III

<i>Figure III.1 : Composition d'un système de réfrigération.</i>	<i>32</i>
<i>Figure III.2 : Les deux grandes familles de systèmes de réfrigération magnétique.....</i>	<i>34</i>
<i>Figure III.3 : Cycle magnétique de Carnot.....</i>	<i>35</i>
<i>Figure III.4 : Schématisation d'un système délivrant de la puissance froide et chaude à l'aide d'un travail fourni.....</i>	<i>35</i>
<i>Figure III.5 : Cycle magnétique d'Ericsson/Stirling.....</i>	<i>36</i>
<i>Figure III.6: Cycle magnétique de Brayton.....</i>	<i>37</i>
<i>Figure III.7: Schéma simplifié du concept breveté par Barclay.....</i>	<i>38</i>

Chapitre IV

<i>Figure IV.1 : Transition de phase et variation de l'entropie en fonction du type de matériau....</i>	<i>42</i>
---	-----------

Chapitre V

<i>Figure V.1 : Structure de base en forme de C.....</i>	<i>47</i>
<i>Figure V.2 : Lignes de champ émises par l'aimant permanent sur la barre de fer.....</i>	<i>47</i>
<i>Figure V.3: L'induction magnétique B le long de la barre de fer.....</i>	<i>48</i>
<i>Figure V.4 : Variation de Cp en fonction de T pour différents B.....</i>	<i>50</i>
<i>Figure V.5: Variation de l'EMC en fonction de T pour différents B.....</i>	<i>51</i>
<i>Figure V.6 : Variation de S en fonction de T pour différents B.....</i>	<i>51</i>
<i>Figure V.7 : Evolution de l'entropie totale du Gd en fonction de la température.....</i>	<i>52</i>
<i>Figure V.8 : Variation de la quantité de chaleur dégagée et absorbée au niveau des sources chaude et froide.....</i>	<i>53</i>
<i>Figure V.9: Evolution de coefficient de performance en fonction de la température.....</i>	<i>54</i>

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre IV :

Tableau IV.1 : Différentes familles de matériau magnétique.....41

Tableau IV.2. Caractéristiques de quelques matériaux à EMC géant autour de Tc.....44

Tableau IV.3. Propriétés magnétiques de quelques aimants.....46

Chapitre V :

Tableau V.1. Propriété magnétique de Gd.....51

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Aujourd'hui le défi majeur de l'humanité est aussi de satisfaire la demande croissante en nourriture, eau, confort et énergie tout en préservant la planète.

Le froid est un secteur très important, et couvre une large variété d'application : le bâtiment, le transport, la conservation d'aliments, d'organes et de tissus humain etc.

15% de l'électricité produite dans le monde est consommé dans la production du froid et son utilisation ne cesse de croître dans les pays développés [6]. Elle représente 7 % de la consommation électrique en France, 20% aux États-Unis, et jusqu'à 25% au Japon [16]. Le secteur des industries agro-alimentaires consomme à lui tout seul 57 % de l'électricité consacrée à l'industrie du froid [16].

En Algérie, selon les chiffres délivrés en 2005 par la société nationale ENIEM, 204768 réfrigérateurs et 9439 climatiseurs ont été fabriqués et vendus [5].

Les techniques qui permettent d'assurer cette forte demande sont majoritairement basées sur les cycles traditionnels de compression/détente d'un fluide frigorigène. (Voir annexe A des principaux fluides frigorigènes utilisés)

En plus des contraintes environnementales, la réfrigération à compression a atteint sa limite d'efficacité, c'est pourquoi la recherche s'oriente vers des technologies de rupture pour la production de froid telles que la réfrigération thermoélectrique, la réfrigération thermoacoustique, la réfrigération barocalorique et la réfrigération magnétique. (Pour plus de détail voir annexe B).

Nous nous intéressons ici à la réfrigération magnétique qui semble être une des technologies les plus prometteuses. Cette technologie est basée sur un effet appelé l'effet magnétocalorique, une propriété intrinsèque de certains matériaux magnétiques.

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

L'étude que nous avons effectuée se déroule dans le cadre général des travaux de recherches entamés sur la réfrigération magnétique au voisinage de la température ambiante en collaboration entre l'université de Tizi-Ouzou et l'université de Médéa.

Le présent manuscrit de master est structuré en cinq chapitres :

INTRODUCTION GENERALE

Dans le 1^{er} chapitre nous verrons les différentes méthodes conventionnelles de production de froid existantes jusqu'aujourd'hui, par la suite le second sera consacré à la présentation générale de la réfrigération magnétique, principe, revue sur les travaux antérieurs et approche thermodynamique.

Les systèmes utilisés dans la réfrigération magnétique (composition, fonctionnement et cycles) seront illustrés dans le 3^{ème} chapitre. Dans le 4^{ème} chapitre nous allons voir les différents matériaux magnétiques et magnétocaloriques et par la suite les différents modes de production de champs magnétique afin de bien comprendre l'importance du choix de la source de champ. Le 5^{ème} Chapitre sera consacré aux résultats et interprétations.

***CHAPITRE I : GENERALITES SUR
LES MACHINES FRIGORIFIQUES***

1.1. INTRODUCTION :

La première machine frigorifique de l'histoire a été mise au point en 1835 par Perkins, il réalisa un réfrigérateur basé sur la compression/détente d'éther éthylique [9]. Trois fluides frigorigènes s'imposent à cette époque : le dioxyde de carbone, l'ammoniac et le dioxyde de soufre. Par la suite les chimistes ont proposé les chlorofluorocarbures (CFC) et les hydro chlorofluorocarbures (HCFC) comme fluides frigorigènes en raison de leur absence de toxicité et de leur facilité de manipulation (car ininflammables). Ces fluides ont été utilisés pendant près de 60 ans jusqu'à ce que leur responsabilité dans la destruction de la couche d'ozone soit établie.

La production et l'utilisation des CFC ont été interdites au 1^{er} janvier 2001, suite au protocole de Montréal (1987).

Quant aux HCFC, leur utilisation sera interdite après 2015 [Parlement Européen, 2009].

Ces fluides frigorigènes ont donc été remplacés dans les équipements neufs par les hydrofluorocarbures (HFC), inoffensifs pour la couche d'ozone. Malheureusement ces composés sont de puissants gaz à effet de serre.

Depuis peu, on propose un retour aux fluides naturels et aux hydrocarbures pour remplacer les HFC. Les principaux fluides naturels étudiés sont le dioxyde de carbone (R744), l'ammoniac (R717) et l'eau (R718). Néanmoins tous ces fluides naturels et hydrocarbures possèdent des inconvénients :

- Le dioxyde de carbone fonctionne à haute pression ce qui nécessite l'utilisation de composants peu compétitifs sur le plan économique.
- L'ammoniac est un fluide toxique soumis à une réglementation très contraignante.
- Les hydrocarbures sont fortement inflammables et ne peuvent être distribués dans des applications domestiques.
- L'eau nécessite un circuit sous vide (car sa pression saturante est très basse) et l'ajout d'un antigel (car sa température de solidification est de 0°C). Mais son principal inconvénient reste sa capacité calorifique à volumique constant excessivement faible qui nécessite le recours à des débits très élevés.

1.2. HISTORIQUE :

Dès le 17^{ème} siècle, la chaleur et le froid alimentèrent les réflexions des savants et philosophes comme Robert Boyle (1627-1691) en Angleterre et Mikhail Lomonossov (1711-1765) en Russie.

Dans la même période, après les premiers travaux de Galilée, de très nombreuses études furent entreprises sur la thermométrie où s'illustrèrent Guillaume Amontons (1663-1705) en France, Isaac Newton (1642-1727) en Angleterre, Daniel Fahrenheit (1686-1736), allemand qui travailla en Angleterre et aux Pays-Bas, René de Réaumur (1683-1757) en France et enfin Anders Celsius (1701-1744) qui créa, en 1742, en Suède, l'échelle thermométrique centésimale.

William Cullen (1710-1790) observa que l'évaporation de l'éther éthylique en abaisse la température. Il obtint, en 1755, un peu de glace en faisant évaporer de l'eau sous une cloche à vide. Son disciple et successeur, l'écossais Joseph Black (1728-1799), établit bien la différence entre chaleur et température, et peut être considéré comme le fondateur de la calorimétrie. Dans cette spécialité s'illustrèrent les français Pierre Simon de Laplace (1749-1827), Pierre Dulong (1785-1838) et Alexis Petit (1791-1820), Nicolas Clément-Desormes (1778-1841) et Victor Regnault (1810-1878).

Après les travaux de l'écossais James Watt (1736-1819) sur la machine à vapeur, les études des physiciens sur les gaz : Boyle, en Angleterre, Edme Mariotte (1620-1684) puis Jacques Charles (1746-1823) et Louis Joseph Gay-Lussac (1778-1850) en France, après les expériences de l'américain Benjamin Thomson (1753-1814), la Thermodynamique pouvait entrer en scène. C'est le français Sadi Carnot (1796-1832) qui ouvrit le rideau, en 1824, avec son célèbre mémoire qui jetait les bases du second principe de la Thermodynamique. Au cours du 19^{ème} siècle, tandis que s'amorçaient les études sur les divers systèmes frigorifiques, la Thermodynamique se construisit rapidement avec les travaux de James Prescott Joule (1818-1889) en Angleterre, Julius von Mayer (1814-1878), Herman von Helmholtz (1821-1894), Rudolph Clausius (1822-1888) en Allemagne, Ludwig Boltzmann (1844-1906) en Autriche et William Thomson (Lord Kelvin) (1824-1907) en Angleterre. D'autres physiciens prestigieux contribuèrent à l'extension de la Thermodynamique au cours du 20^{ème} siècle [9].

La première machine frigorifique à compression utilisant l'ammoniac comme fluide frigorifique a été réalisée par Ferdinand Carre en 1857, et réalisa aussi la première machine à absorption à fonctionnement continu (1860) [14].

En 1876 Charles Tellier aménagea le premier navire à cales réfrigérées, qui réussit à transporter sur le trajet Rouen-Buenos Aires des viandes conservées en parfait état [14].

1.3. LES MACHINES FRIGORIFIQUES :

Le fonctionnement des machines frigorifiques est basé sur les systèmes suivants :

a- Systèmes discontinus :

Ce sont des systèmes appliqués à des dispositifs industriels de peu d'intérêt, par exemple la dissolution de certains sels ou gaz, le mélange de certains corps avec de l'eau telle que la glace carbonique (les mélanges cryogéniques) et la fusion d'un solide (glace,....)

b- Systèmes continus :

Ce sont des systèmes qui peuvent produire du froid d'une manière continue et avec intérêt industriel, on peut citer :

b.1. Systèmes thermoélectriques (Peltier) :

Ce sont des systèmes qui sont utilisés pour de très petites puissances tels que la conservation des vaccins, le refroidissement de petits éléments électriques, et ce sont des systèmes assez coûteux.

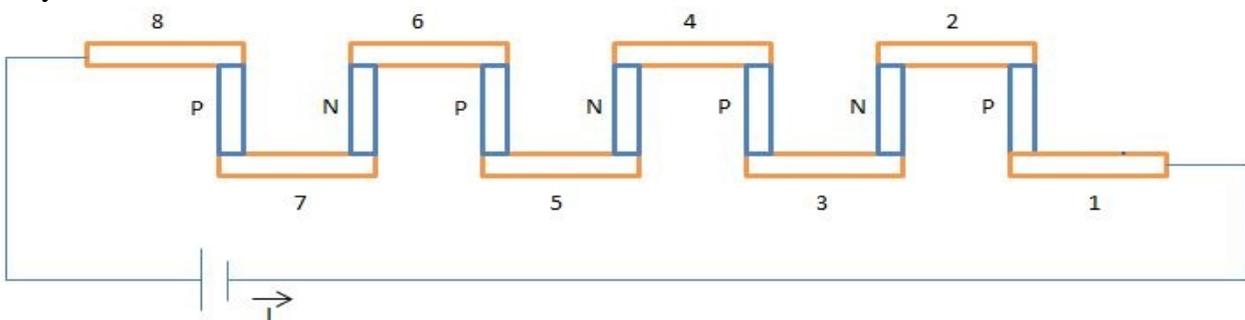


Figure I.1 : Systèmes thermoélectriques (Peltier)

Ce procédé consiste à faire passer un courant électrique continu à travers une chaîne de deux semi-conducteurs P et N disposés en série, ce qui engendre le refroidissement des éléments 1, 3, 5, ... $2n+1$ et le réchauffement des éléments 2, 4, 6, ... $2n$.

b.2. Systèmes à compression mécanique

Ce sont des systèmes qui consomment de l'énergie mécanique ce qui les classe dans la catégorie des systèmes DITHERMES.

On distingue deux familles :

b.2.a. Systèmes à compression de vapeurs liquéfiables :

Le fluide actif du cycle frigorifique, le frigorigène, se vaporise dans un évaporateur en produisant le froid utile. La vapeur produite est aspirée et comprimée par un compresseur mécanique. Elle est refoulée dans un condenseur où elle se liquéfie. Le liquide formé retourne vers l'évaporateur en traversant un détendeur, à l'heure actuelle, c'est le procédé le plus répandu dans les machines frigorifiques industrielles.

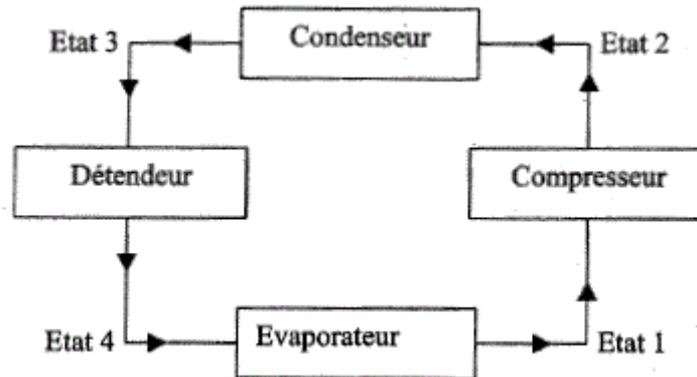


Figure I.2 : L'évaporation d'un liquide

b.2.b. Systèmes utilisant des cycles à gaz :

Le fluide actif ne change pas d'état au cours du cycle frigorifique mais reste gazeux. Comprimé, le gaz s'échauffe, on le refroidit alors, sous pression, jusqu'à la température ambiante puis on le détend ce qui entraîne un abaissement de sa température.

b.3. Systèmes à compression thermique :

A part une pompe qui fait circuler la vapeur, ces installations ne comportent aucun organe mécanique, la consommation d'énergie mécanique de ces systèmes est moindre ce qui les classent dans la catégorie des systèmes TRITHERMES, ne générant pas de bruit et ne posent pas de problèmes de graissage et d'étanchéité.

Quelques systèmes utilisant ce procédé :

b.3.a. Système à éjection :

Ici on utilise la partie convergente de l'éjecteur pour comprimer le mélange de vapeur motrice et de fluide frigorigène grâce à la transformation de l'énergie cinétique en une énergie de pression, la vapeur motrice doit évidemment provenir d'une chaudière.

L'extraction de la vapeur est le fait de l'aspiration de la vapeur par l'abaissement de pression qui résulte de la mise en vitesse de cette vapeur dans la partie convergente de l'éjecteur.

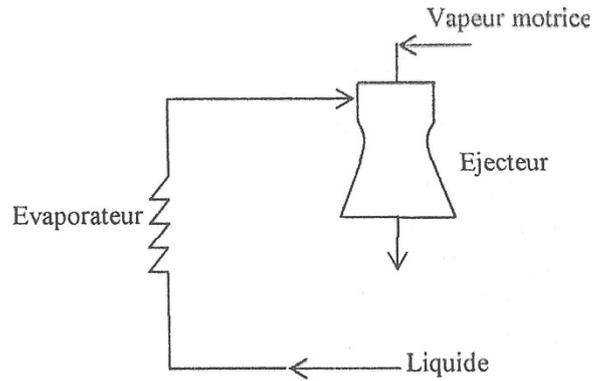


Figure I.3 : Machine frigorifique à éjection

b.3.b. Système à sorption :

Le principe consiste à pulvériser de l'eau en fines gouttelettes dans un récipient sous vide. Du fait de la basse pression, l'eau s'évapore. Pour cela elle a besoin d'une certaine quantité de chaleur qui est extraite de l'eau à rafraîchir, circulant dans un circuit à travers le récipient.

Mais ce système ne peut fonctionner très longtemps : rapidement, le récipient sous vide sera saturé de vapeur d'eau, et l'eau dispersée ne s'évaporerait plus. Il faut donc un moyen pour maintenir ou recréer le vide dans le récipient !

C'est là qu'intervient le sorbant. C'est soit un liquide, on parle alors d'absorbant, ou un solide poreux, on parle alors d'adsorbant. Il "boit" la vapeur d'eau contenue dans l'ambiance, et la retient. Au fur et à mesure qu'il ab/adsorbe de la vapeur, sa capacité d'ab/adsorption diminue jusqu'à être nulle, à saturation. Le sorbant est alors chauffé à une certaine température et "rend" la vapeur d'eau. Il récupère alors toutes ses propriétés d'ab/adsorption.

- Système à absorption :

Dans les machines frigorifiques à absorption utilisées en climatisation, la substance absorbante est généralement le bromure de lithium (LiBr), le fluide réfrigérant, de l'eau. Ce type de machine permet de refroidir de l'eau jusqu'à environ 5°C. La température de l'eau utilisée pour la régénération de l'absorbant doit être comprise entre 80 et 120°C.

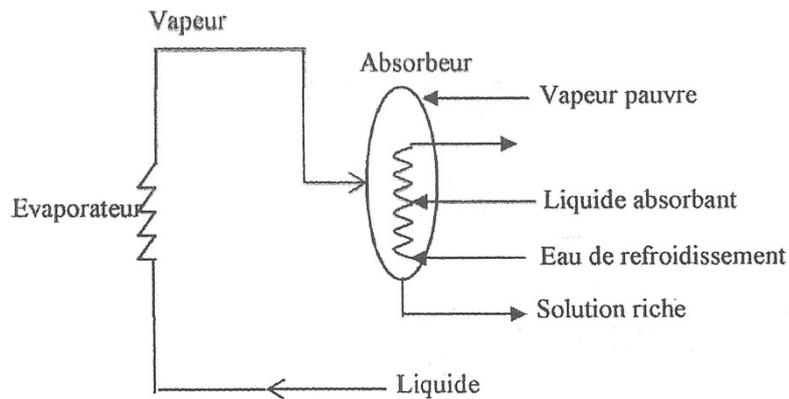


Figure I.4 : Système à absorption

- *Système à adsorption :*

On utilise le gel de silicium couplé avec de l'eau comme fluide réfrigérant. Pour la régénération de l'adsorbant, la température de l'eau doit être comprise entre 65 à 80 °C, cette température plus basse représente un avantage par rapport à la machine à absorption.

L'adsorbant étant solide, il est impossible de l'amener au fur et à mesure vers la source de chaleur pour être régénéré, la machine fonctionne donc de manière cyclique : deux récipients servent, tour à tour, d'adsorbant et de désorbant.

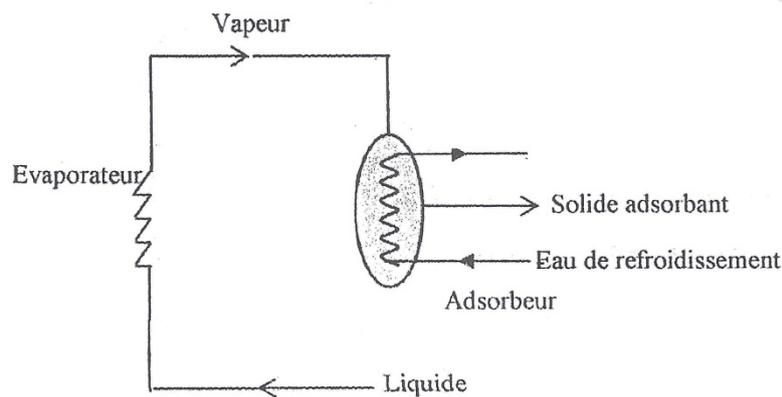


Figure I.5 : Système à adsorption

1.4. CONCLUSION :

Dans ce chapitre nous avons fait un petit saut dans le temps pour revenir sur les premières études et recherches qui ont été faites sur les différents moyens de production de froid, les premiers brevets, et les premières machines construites. Après, on a fait un résumé sur les différents fluides frigorigènes CFC, HCFC, HFC, ainsi que les fluides de substitution susceptibles de les remplacer tels que les fluides naturels et les hydrocarbures a été relaté.

Nous avons par la suite cité les différents systèmes conventionnels de production de froid, ainsi que leur mode de fonctionnement.

***CHAPITRE II : LA REFRIGERATION
MAGNETIQUE***

II.1. INTRODUCTION:

La réfrigération magnétique autour de la température ambiante est une technologie émergente qui a suscité l'intérêt des chercheurs à travers le monde. Ce chapitre va servir comme initiation à cette nouvelle technologie. Nous allons définir l'effet magnétocalorique principe essentiel de la réfrigération magnétique, donner quelques définitions importantes pour pouvoir suivre le reste du mémoire, voir les différents prototypes et surtout faire une analogie entre les systèmes de réfrigération conventionnelle et les systèmes basés sur la réfrigération magnétique.

Lors de la réception de son prix Nobel de chimie le 12 décembre 1949, William Giaque déclara :

“La méthode de démagnétisation adiabatique pour produire les basses températures était un sous-produit inattendu de notre intérêt pour la troisième loi de la thermodynamique [...] à l'aide d'équations thermodynamiques appropriées, il était possible de calculer le changement de l'entropie quand un champ magnétique est appliqué. J'étais étonné considérablement de trouver que l'application d'un champ magnétique enlève une grande quantité d'entropie à cette substance, à une température si basse qu'on avait pensé qu'il n'y avait plus pratiquement aucune entropie à enlever.” [3]

II.2. L'EFFET MAGNETOCALORIQUE :

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

L'effet magnétocalorique (EMC) se traduit par l'échauffement instantané d'un matériau lors de son aimantation et son refroidissement lors de sa désaimantation. Cet effet, découvert il y a plus d'un siècle, est à l'origine d'une technologie prometteuse encore peu connue pour la production de froid, la réfrigération magnétique (RM). Dans un premier temps, l'utilisation de l'EMC s'était orientée vers le domaine de la cryogénie, cette technique permettant d'atteindre des températures inférieures à 4K. Plus récemment, cet effet a été exploité pour la production de froid autour de la température ambiante.

De manière similaire aux cycles à compression-détente classiques, la réfrigération magnétique est basée sur des cycles magnétiques, lesquels permettent de tirer parti de l'effet magnétocalorique.

II.3. HISTORIQUE :

En 1881, Warburg observa une élévation de température d'un échantillon de fer pur lorsque celui-ci était introduit dans un champ magnétique et une chute de température lorsqu'il en était retiré, c'est l'effet magnéto-calorique [15].

Six ans plus tard, deux physiciens, T. Edison et N. Tesla, présentent deux concepts utilisant un générateur magnétothermique et un moteur magnétothermique (Figure II.1), qui restent au stade de l'idée [20].

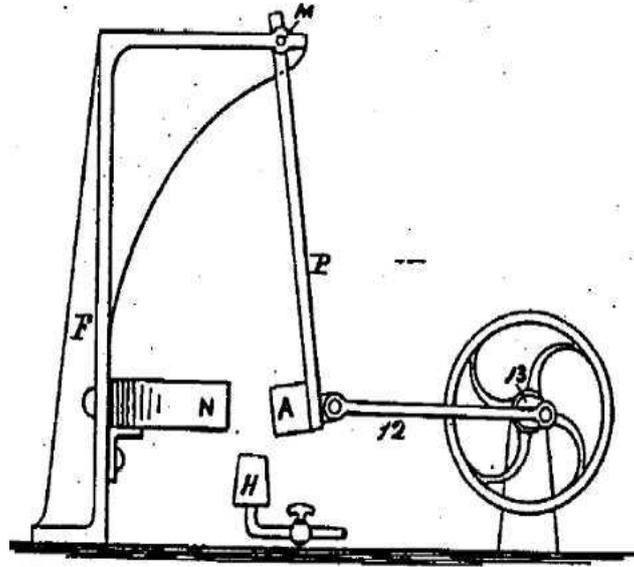


Figure II.1 : Moteur magnétothermique de Tesla. (Brevet USA 1889). [6], [20]

N est un aimant permanent, A un support, H une source de chaleur.

Le principe est d'utiliser la chaleur en provenance de **H** pour modifier l'aimantation de **A**. Lorsque la chaleur de **A** augmente, celui-ci s'aimante, et, par opposition magnétique à **N**, fait un mouvement linéaire sur la droite, ce qui entraîne la roue. En se refroidissant, le processus est inversé. L'enchaînement de ce cycle permet de ce fait d'obtenir de l'énergie mécanique (roue en mouvement) à partir d'énergie thermique. [20]

Il faudra attendre 1905 pour que P. Langevin démontre, dans le cadre de ses travaux sur la cinétique du magnétisme, que la variation de l'aimantation d'une substance magnétique a pour effet un changement réversible de sa température [10].

En 1918, A. Piccard et P. Weiss portent leurs études sur l'observation expérimentale du processus décrit par Langevin. Ils observent sur un l'échantillon de nickel une variation de température en fonction de son aimantation et de sa désaimantation.

En 1926, Debye proposa une première application de ce phénomène à la physique des basses températures, où cette technique devint la norme de quelques Kelvin à quelques centaines ou pour les applications extrêmes jusqu'à quelques centièmes ou millièmes de Kelvin.

Le procédé est nommé procédé de magnétisation/démagnétisation. Cet effet se produit au voisinage de la température de Curie, où un matériau magnéto-calorique MCM (*magnetocaloric material*) subit une transition continue entre deux états magnétiques différents. La démonstration est faite en 1933 par W.F. Giaque et P.D. McDougall, lors d'une démonstration expérimentale qui leur a permis de passer sous le seuil des 1 K [20].

LETTERS TO THE EDITOR

Attainment of Temperatures Below 1° Absolute by Demagnetization of $Gd_2(SO_4)_3 \cdot 8H_2O$

We have recently carried out some preliminary experiments on the adiabatic demagnetization of $Gd_2(SO_4)_3 \cdot 8H_2O$ at the temperatures of liquid helium. As previously predicted by one of us, a large fractional lowering of the absolute temperature was obtained.

An iron-free solenoid producing a field of about 8000 gauss was used for all the measurements. The amount of $Gd_2(SO_4)_3 \cdot 8H_2O$ was 61 g. The observations were checked by many repetitions of the cooling. The temperatures were measured by means of the inductance of a coil surrounding the gadolinium sulfate. The coil was immersed in liquid helium and isolated from the gadolinium by means of an evacuated space. The thermometer was in excellent agreement with the temperature of liquid helium as indicated by its vapor pressure down to 1.5°K.

On March 19, starting at a temperature of about 3.4°K, the material cooled to 0.53°K. On April 8, starting at about 2°, a temperature of 0.34°K was reached. On April 9, starting at about 1.5°, a temperature of 0.25°K was attained.

It is apparent that it will be possible to obtain much lower temperatures, especially when successive demagnetizations are utilized.

W. F. GIAQUE
D. P. MACDOUGALL

Department of Chemistry,
University of California,
Berkeley, California,
April 12, 1933.

Figure II.2 : Extrait d'un article rédigé par Giaque et MacDougall relatant leurs expérimentations. [20]

Les deux chercheurs ont effectué quelques expériences sur la désaimantation adiabatique du $Gd_2(SO_4)_3 \cdot 8H_2O$ aux températures de l'hélium liquide et une grande fraction d'abaissement de la température a été obtenue.

Leurs observations ont été vérifiées par un grand nombre de refroidissement à répétition.

Le 19 mars, commençant à une température de 3.4K, le matériau a été refroidit jusqu'à 0.53K, le 8 avril de 2K à 0.34K et le 9 avril, de 1.5K à 0.25K.

Ce qui prouve qu'il est possible d'obtenir des températures encore plus basses particulièrement après une succession de désaimantation.

Il faudra attendre trente ans pour qu'un premier cycle magnétique régénératif soit proposé par J.R Van Geuns (1966), les performances théoriques de ce cycle sont de de l'ordre de 60% à 70% du cycle de Carnot. [10]

Théoriquement, le dispositif devait fonctionner sur une plage de température allant de 4 à 15 K. En 1976, J.A Barclay fabrique le premier dispositif de réfrigération magnétique fonctionnant sur cette plage de température et qui produit environ 1 W.

La même année, G.V Brown construisit avec succès le premier réfrigérateur magnétique autour de la température ambiante [2]. Ce premier dispositif innovateur entraîna la construction de nombreux prototypes. Certains sont restés orientés vers des applications basses températures telles la liquéfaction d'hydrogène, d'autres se sont orientés vers la réfrigération classique.

Ce n'est que depuis une décennie que les chercheurs ont cherché à développer des réfrigérateurs magnétiques opérant autour de la température ambiante qui, dans un premier temps, utilisaient comme source de champ des aimants supraconducteurs.

C'est avec la découverte de l'effet magnéto-calorique "géant" en 1997 par Pecharsky et Gschneidner Jr. dans un alliage de gadolinium-germanium-silicium ($Gd_5(Si_2Ge_2)$) que les scientifiques et les industriels du secteur du froid commencent à envisager sérieusement la réfrigération magnétique à température ambiante pour des applications industrielles.

Nous pourrions citer par exemple le dispositif réalisé par K. Zimm produisant une puissance froide de 600 W pour un champ de 5 Tesla. [22]

Ce prototype, destiné à démontrer la faisabilité et la compétitivité de la réfrigération magnétique à température ambiante, fonctionna pendant plus de 5000 h sur une période de 18 mois sans rencontrer aucun problème majeur.

Après 1998 la réfrigération magnétique à température ambiante connaît un essor important et de nombreux prototypes sont construits par des laboratoires et des entreprises.

Le premier réfrigérateur magnétique fonctionnant à température ambiante et pourvu d'aimants permanents a été construit en 2001 par Astronautics Cooperation of America [21]. Parmi d'autres groupes, Kitanovski, Egolf et Sari ont proposé de nouveaux systèmes cycliques de réfrigérateur thermodynamique. Pour ces réfrigérateurs, l'utilisation de simulations numériques, a permis de prédire des COP très élevés, mais non encore publiés [6]. Ces machines, qui en sont encore au stade du développement, devraient opérer dans des conditions analogues aux réfrigérateurs conventionnels à compression/expansion ou aux pompes à chaleur.

Dans les années quatre-vingt, la recherche sur les matériaux magnéto-caloriques, qui sont nécessaires à la réfrigération magnétique à température ambiante, s'est énormément accrue. Ainsi après la découverte d'alliages basés sur le Gadolinium, qui étaient produits par AMES Laboratory, une croissance exponentielle s'est produite.

Cet état de fait a été mis en évidence par un comptage annuel du nombre d'articles scientifiques corrigés dans le domaine. Dès lors, une grande variété de composés magnétocaloriques différents ont été proposés.

Aujourd'hui, de nouveaux alliages sont produits avec des températures de Curie proches de la température ambiante et de grands effets magnétocaloriques. Parmi les scientifiques qui travaillent dans ce domaine, on remarquera spécialement Pecharsky et Gschneidner aux USA, Wada et al. au Japon et Brück et al. en Europe.

II.4. PRINCIPE DE L'EMC:

Le principe de la réfrigération magnétique est relativement proche de celui du cycle compression/détente. Il s'agit donc d'aimanter et de désaimanter un matériau à effet magnétocalorique. Aimanté, le matériau s'échauffe, désaimanté; il se refroidit.

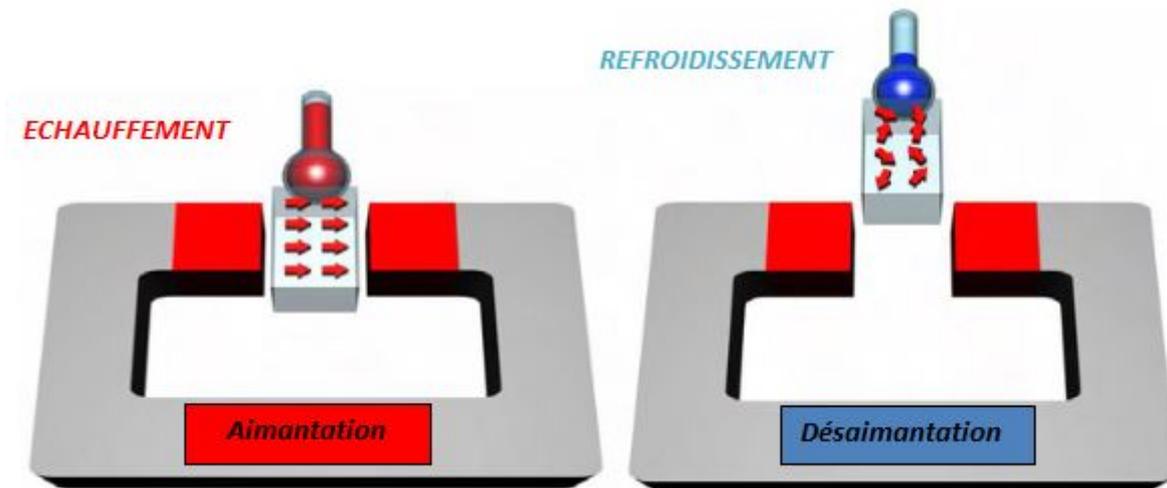


Figure II.3 : Effet magnétocalorique. [8]

Les flèches dans le matériau symbolisent l'orientation des moments magnétiques

Basés sur ce principe, les réfrigérateurs magnétiques présentent tous les atouts pour faire face à la crise environnementale, efficacité importante, compact et non polluant. Cette technologie enveloppe de nombreux domaines de compétences, comme le magnétisme, les sciences du matériau, la thermique, la mécanique des fluides ou encore la mécanique. L'interdépendance de tous ces domaines physiques en font une technologie difficile à mettre en œuvre et qui en est encore au stade des premiers prototypes.

Habituellement un réfrigérateur magnétique est constitué d'un corps solide d'un matériau magnétocalorique, qui est mis en mouvement vers et en provenance d'un champ magnétique.

Le transfert de chaleur au réfrigérant métallique est effectué par un échangeur de chaleur dont le fluide du côté secondaire est généralement de l'air ou de l'eau. Les champs magnétiques sont générés par des aimants qui peuvent également être permanents.

La majorité des prototypes et brevets existants est basée sur la rotation de matériaux magnétocaloriques dans un champ magnétique ou sur celle d'aimants et de leurs champs magnétiques à travers l'échantillon magnétocalorique. D'autres applications sont basées sur un mouvement linéaire réciproque du matériau magnétocalorique dans le champ, comme un piston qui se déplacerait dans un cylindre et vice et versa.

Différents cycles thermodynamiques de types idéaux sont connus, à titre d'exemple citons les processus de Carnot, Ericsson et de Brayton (Joule). Les matériaux magnétocaloriques actuels montrant une impossibilité à obtenir de grandes différences de températures conduisent à l'application de ces cycles selon des processus en cascade et/ou en régénération.

Les aimants choisis peuvent être de différents types, des aimants supraconducteurs atteignent de très hauts champs magnétiques, conduisant à un effet magnétocalorique très intense, toutefois, leurs coûts prohibent une application à la technologie de réfrigération usuelle.

L'utilisation d'électroaimants produisant de la chaleur, cette dernière doit être évacuée, dans le cas d'un réfrigérateur, cette charge thermique conduit à une baisse d'efficacité. De plus, les électroaimants ne sont pas capables de produire d'intenses champs magnétiques, on peut, ainsi, prédire que les futurs réfrigérateurs magnétiques produits seront équipés d'aimants permanents.

Lorsqu'un échantillon de matériau magnétocalorique est introduit dans un champ magnétique, il s'échauffe de façon similaire à un gaz comprimé d'un système conventionnel. La chaleur est, ensuite, évacuée du matériau et le champ magnétique à nouveau réduit conduisant au refroidissement de l'alliage magnétocalorique. L'échantillon se comporte alors en source froide pour un consommateur, par exemple: une gondole froide de supermarché, un système de conditionnement d'air de bâtiment, de voiture, etc.

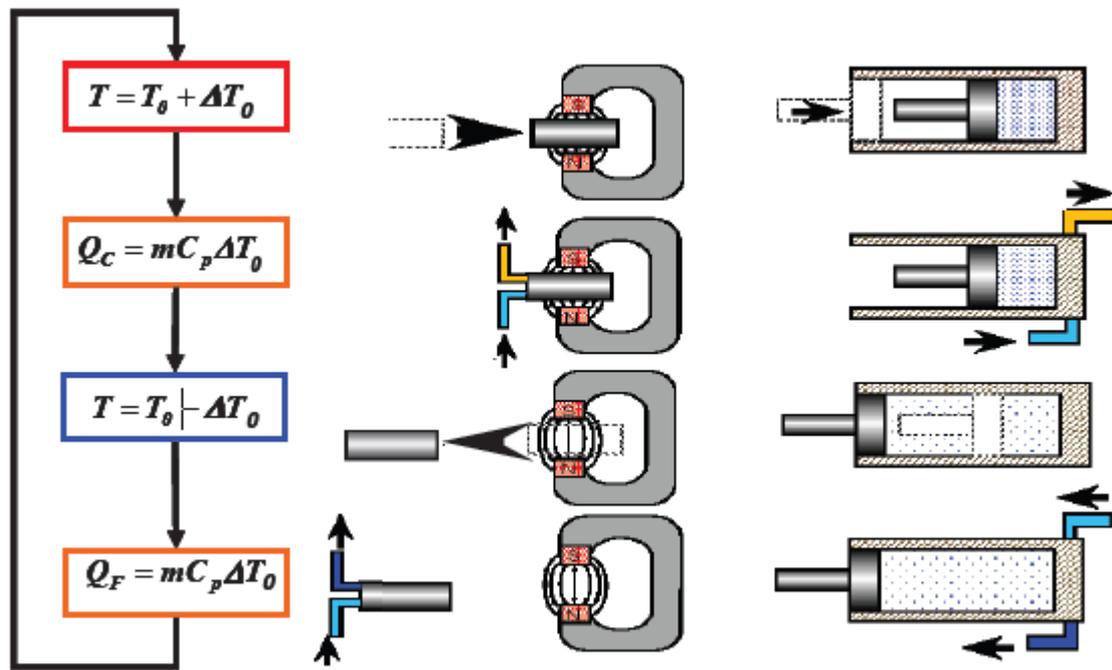


Figure II.4 : Equivalence de la RM avec la réfrigération conventionnelle. [6]

Le cycle de base de réfrigération magnétique peut alors être expliqué par analogie avec le cycle de réfrigération par compression de gaz comme illustré à la figure II.4. La magnétisation, correspondant à la compression du gaz, entraîne l'augmentation de température du matériau magnétique par l'effet magnétocalorique. Ensuite, le matériau magnétique étant toujours soumis au champ magnétique, un rejet de chaleur est effectué permettant au matériau de revenir à son état initial de température. À l'étape suivante, la détente du gaz est associée à la démagnétisation adiabatique pendant laquelle la température du matériau magnétique atteint une température plus basse que sa température initiale grâce à l'effet magnétocalorique. Finalement, le cycle est complété lorsque le matériau magnétique absorbe la chaleur d'une source extérieure pour revenir à son état initial de température. À ce moment, la température de cette source extérieure est plus basse qu'elle l'était initialement, d'où l'effet de réfrigération.

II.5 REVUE SUR LES DÉMONSTRATEURS DE LA RM:

Le premier réfrigérateur magnétique fonctionnant autour de la température ambiante a été construit par G.V Brown en 1976, ce qui poussa de nombreux chercheurs de part le monde à attacher de l'importance à cette technique innovatrice entraînant un développement consécutif de quelques systèmes intéressants. [3], [8],[10] ...

a- Prototype magnétique de Brown (1976):

Brown (Lewis Research Center) a conçu et réalisé le premier prototype de réfrigération magnétique à température ambiante, utilisant un régénérateur passif et permettant d'obtenir des écarts de température bien plus élevés que l'EMC [10]. Il s'agit d'un prototype au sein duquel un bloc de gadolinium - percé pour permettre le passage du fluide - est déplacé à travers une colonne de fluide, qui fait office de régénérateur thermique. Des échangeurs se trouvent à chaque extrémité de la colonne pour échanger de la chaleur avec les sources chaude et froide.

Le prototype est un système tournant et emploie un cycle d'Ericsson [21]. Le champ magnétique est produit par un électroaimant (refroidi par eau) avec un champ maximal de 7 Tesla.

Le matériau (Gd) est en forme de plaques de 1 mm d'épaisseur, séparées par des fils d'acier inoxydable avec des intervalles de 1 mm pour permettre au fluide régénérateur de circuler verticalement [8].

Lors des premiers essais, Brown réussit à obtenir un écart de température de 47K ($T_f = 272\text{K}$ et $T_c = 319\text{K}$), cependant, la puissance froide obtenue n'était pas importante, Ceci est dû au large ΔT obtenu.

De plus, le cycle ne pouvant fonctionner qu'avec des fréquences faibles, le gradient de température est réduit car les deux côtés chaud et froid ont le temps d'échanger entre eux. Puis par la suite il obtient 80K avec le même dispositif en utilisant un cycle magnétique régénératif de Stirling [2].

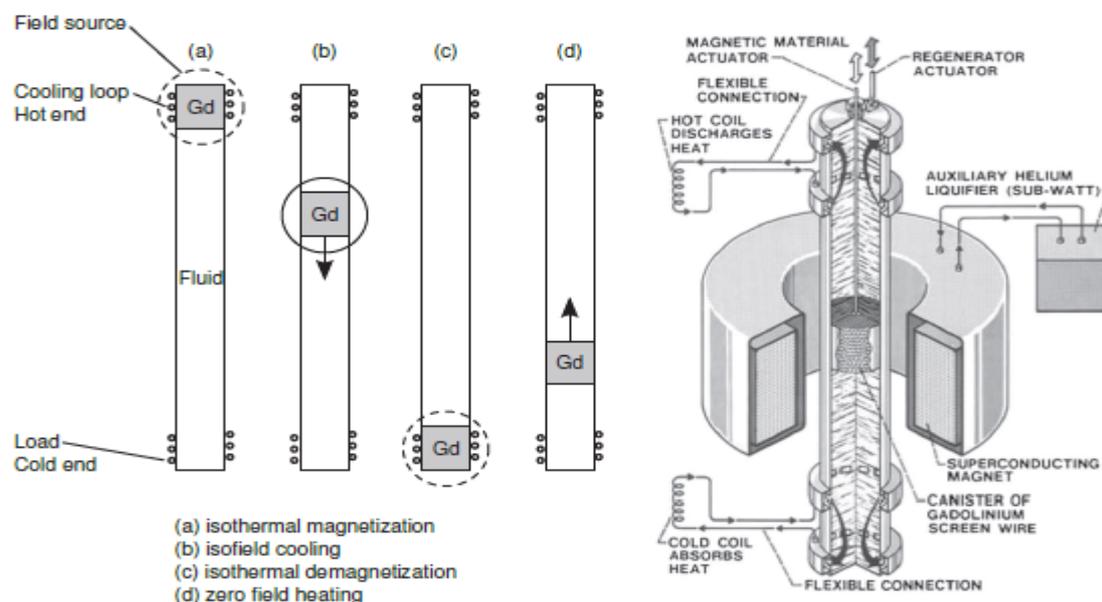


Figure II.5 : Schémas du prototype de Brown.[10]

b- Prototype de Steyert (1978-1983):

Steyert est à l'origine du concept de régénération active. [10]. Il a conçu un prototype de réfrigération magnétique où c'est le matériau magnétocalorique lui-même qui joue le rôle de régénérateur. [17]. C'est un système avec un réfrigérant tournant, mettant en œuvre un cycle de Brayton. [8]. Le matériau magnétocalorique est un disque poreux de gadolinium qui passe alternativement d'une zone où le champ magnétique est élevé à une zone où il est faible. [3].

Le fluide d'échange entre dans la roue (régénérateur) à la température T_c et ressort à la température T_f après avoir cédé sa chaleur au réfrigérant situé dans la zone de faible champ. Après avoir reçu la chaleur de la charge à refroidir Q_f , le fluide entre une nouvelle fois dans la roue à une température $T_f + \Delta$, due à l'échange thermique avec la roue qui, à ce moment-là, est à la température de $T_c + \Delta$. La température du fluide augmente et passe à $T_{c+} \Delta$. Enfin, le fluide cède la chaleur Q_c au réservoir de la source chaude complétant ainsi un cycle.[8]

La Figure II.6 décrit schématiquement le système magnétique de Steyert.

Ce cycle à régénération a, par la suite, été développé par Barclay et Steyert pour aboutir aux cycles actuellement utilisés. [3].

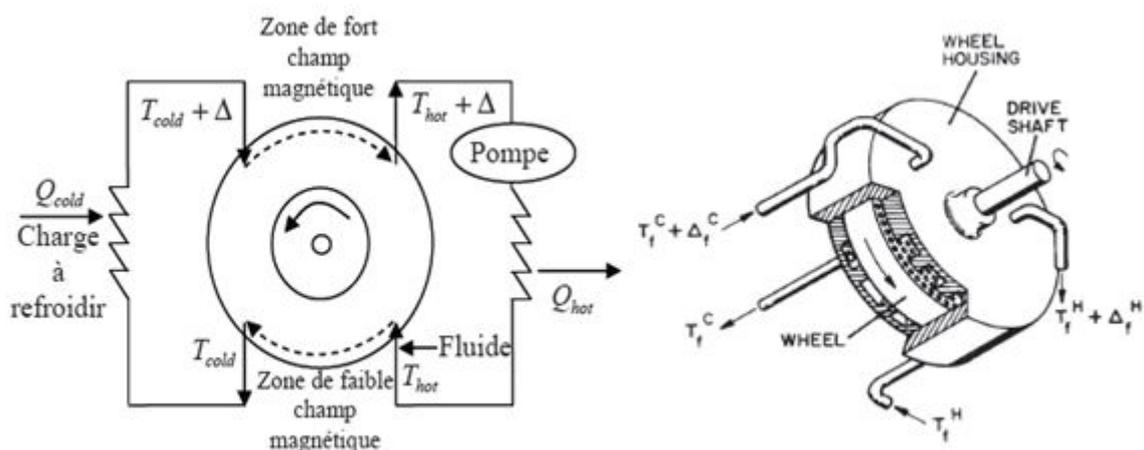


Figure II.6 : Représentation schématique du prototype de Steyert.[10]

c- Prototype de Kirol et Dacus (1988) :

Kirol et Dacus ont conçu et réalisé un système de réfrigération magnétique rotatif à récupération. [11]. Le principe de fonctionnement est similaire à celui du prototype de Barclay et Steyert sauf que celui-ci est basé sur un cycle d'Ericsson.

Le prototype est constitué d'un rotor formé par un empilement de disques de gadolinium et de quatre entrefers. [10].

Le champ magnétique est produit par des aimants permanents NdFeB et atteint une valeur maximale de 0.9 Tesla dans l'entrefer. Au cours d'un tour du rotor, les quatre cycles thermodynamiques sont opérés et un ΔT de 11 K est obtenu. [8].

Dans un tel cycle, le fluide dit de « récupération » est en contact thermique avec le matériau réfrigérant uniquement en dehors des phases d'aimantation et désaimantation, contrairement à la régénération. Ces deux chercheurs pensaient que l'élévation de température dans le fluide régénérant (d'un cycle à régénération) diminuait l'efficacité de ce dernier et qu'en cela la récupération était supérieure à la régénération. Cet appareil s'est, toutefois, montré moins efficace que la technologie régénérative développée par Barclay et Steyert. [3].

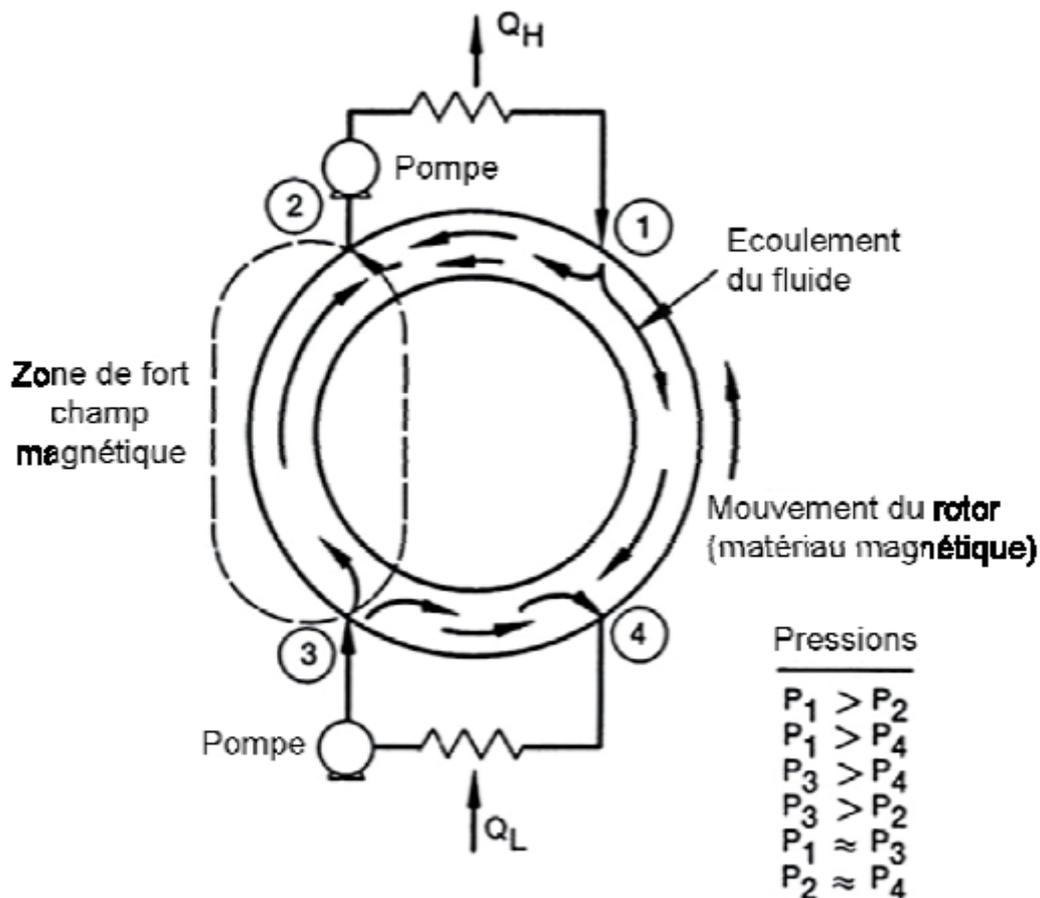


Figure II.7 : Schémas du prototype de Kirol et Dacus.[3]

d- Prototype de Green et al. (1990):

La marine américaine et le David Taylor Research Center se sont intéressés au potentiel de la réfrigération magnétique et des recherches sur le sujet commencèrent dans les années 1990. [10].

Green et al. ont conçu et réalisé un prototype utilisant un régénérateur multicouches. La première couche contient du Tb dont la température de Curie est $T_C = 235\text{K}$, la seconde couche un alliage GdTb ($T_C = 264\text{K}$) et la dernière du Gd ($T_C = 293\text{K}$). La source de champ magnétique est une bobine supraconductrice qui génère un champ de 7 T. Le régénérateur est constitué de plaques en spirales. En plus du régénérateur magnétique actif, le système comprend un régénérateur passif en cuivre côté source froide.

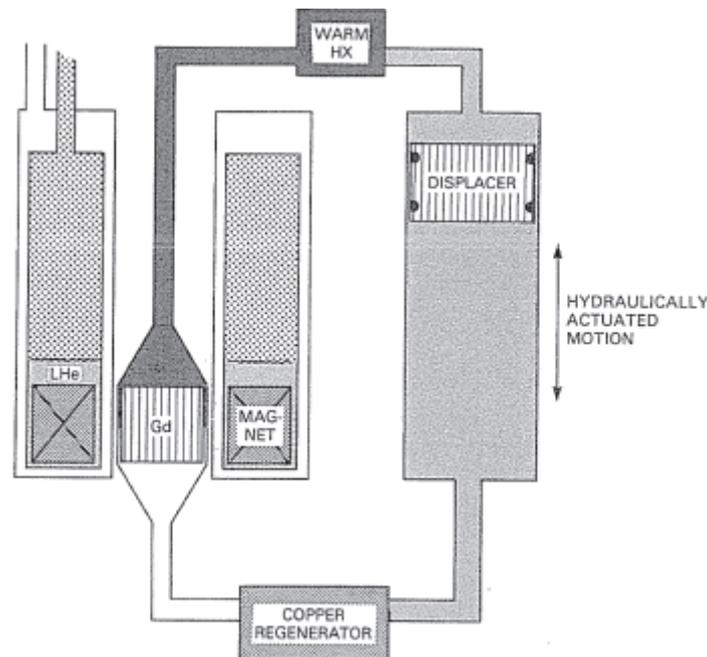


Figure II.8 : Schéma du prototype de Green et al. [10]

e- Prototype de Zimm et al. (1998) :

Une étape importante a été franchie en 1998 lorsque l'entreprise Astronautics s'est associée au Ames Laboratory pour réaliser un prototype de réfrigération magnétique destiné à démontrer la faisabilité et la compétitivité de la réfrigération magnétique à température ambiante [22]. C'est le premier dispositif qui a fourni une puissance suffisante pour des applications industrielles, grâce à l'utilisation d'une grande quantité de matériau magnéto-calorique (3 kg de Gd) et à un champ magnétique élevé (5 Tesla). Par ailleurs, le COP du dispositif varie entre 2 et 8, sans tenir compte de la puissance consommée pour refroidir la bobine supraconductrice, ce qui est une très bonne performance.

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

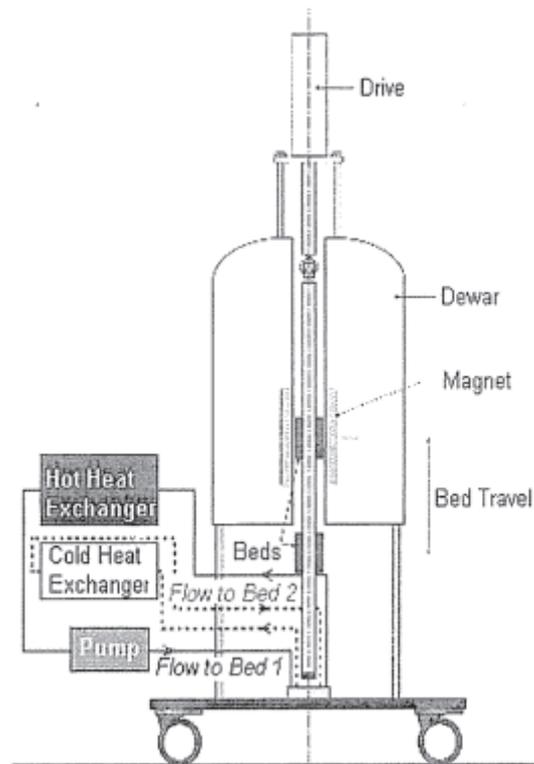


Figure II.9 : Schéma du premier prototype de Zimm et al. [10]

f- Prototype de Hirano et al. (Système Japonais) (2002) :

L'entreprise Chubu Electric (JAPON) en partenariat avec Toshiba a réalisé en 2002 un prototype de réfrigération magnétique linéaire. La source de champ est une bobine supraconductrice qui génère un champ de 4 Tesla.

Le dispositif a de bonnes performances puisque son COP est de 5,6 sans tenir compte de la puissance consommée pour refroidir la bobine supraconductrice et pour alimenter la pompe.

Un des points faibles de ce prototype est que le régénérateur est soumis à des forces considérables lorsqu'il est déplacé dans le champ magnétique (jusqu'à 1600N!).

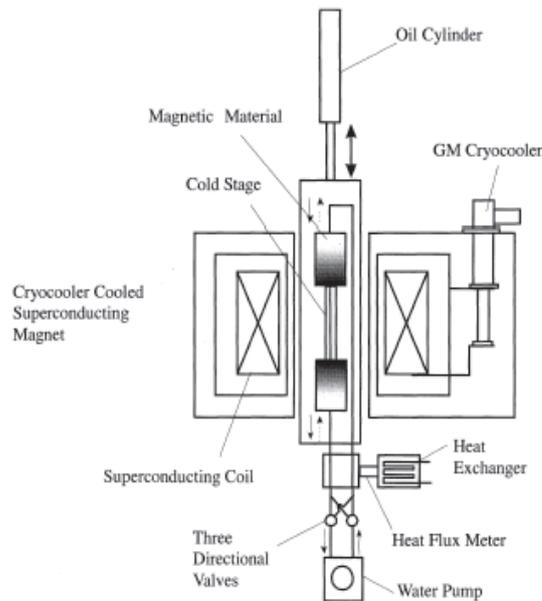


Figure II.10 : Schéma du prototype de Hirano et al. [10]

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

Rowe (University of Victoria) et Barclay (Cryofuel Systems) ont conçu et réalisé un prototype de réfrigération magnétique en 2002. Par la suite, Richard (Université du Québec à Trois Rivières) et al. y ont apporté des améliorations et testé différents matériaux. Seule la configuration la plus récente est décrite ici. La particularité de ce prototype est son mode d'entraînement. Le prototype est entraîné par un moteur rotatif, relié à un système bielle manivelle pour convertir la rotation du moteur en un mouvement linéaire du régénérateur. Le fluide caloporteur - de l'hélium gazeux - est soumis à un mouvement oscillant dans le régénérateur pour réaliser un cycle AMR. Le prototype utilise un régénérateur multicouche composé de trois matériaux : Gd ($T_C = 294$ K), $Gd_{0,74}Tb_{0,26}$ ($T_C = 278$ K) et $Gd_{0,85}Er_{0,15}$ ($T_C = 265$ K). Cela lui permet d'atteindre un écart de température important (50K avec un champ de 2 Tesla).

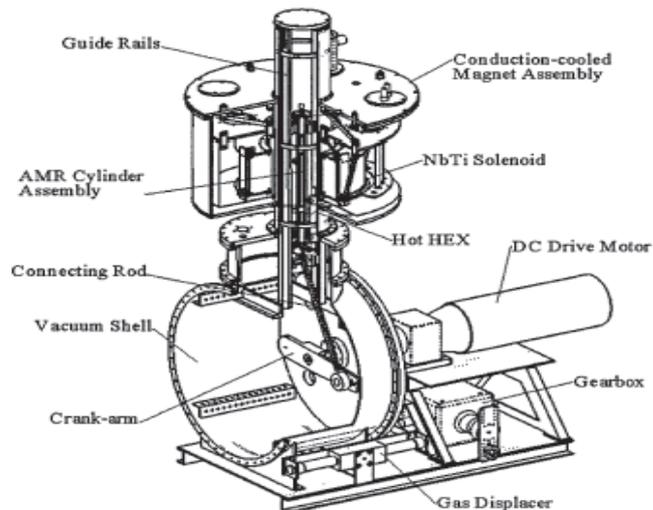


Figure II.11: Schéma du prototype de Rowe et al. [10]

h- Dispositif réalisé en Espagne :

Le dispositif représenté en Figure II.12 a été développé par l'équipe de l'Université Polytechnique de Catalogne à Barcelone [6]. Le matériau magnéto-calorique est un ruban de gadolinium (Gd 99.9%) fixé sur un disque en plastique et plongé dans un fluide caloporteur (huile d'olive). Le cycle magnétique d'aimantation / désaimantation est assuré par la rotation du disque en plastique et son passage devant un aimant. L'écart de température obtenu est respectivement de 1.6 et 5 K pour un champ de 0.3 Tesla et 0.95 Tesla. Ceci correspond à 2.5 fois l'EMC du Gd. [8]

Même si les performances obtenues sont faibles, ce dispositif est le premier qui a montré la faisabilité de la réfrigération magnétique avec des champs accessibles par des aimants permanents.

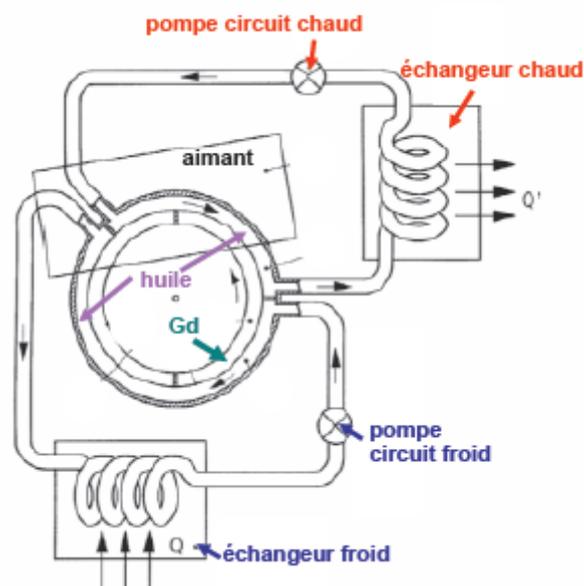


Figure II.12 : Dispositif magnétique réalisé en Espagne [6]

i- Prototype de Okamura et al. (Système Japonais) (2006-2007) :

L'entreprise Chubu Electric a réalisé un second prototype de réfrigération magnétique en partenariat avec le Tokyo Institute of Technology en 2006. Okamura et al ont construit un système de réfrigération magnétique, comme le montre la Figure II.13:

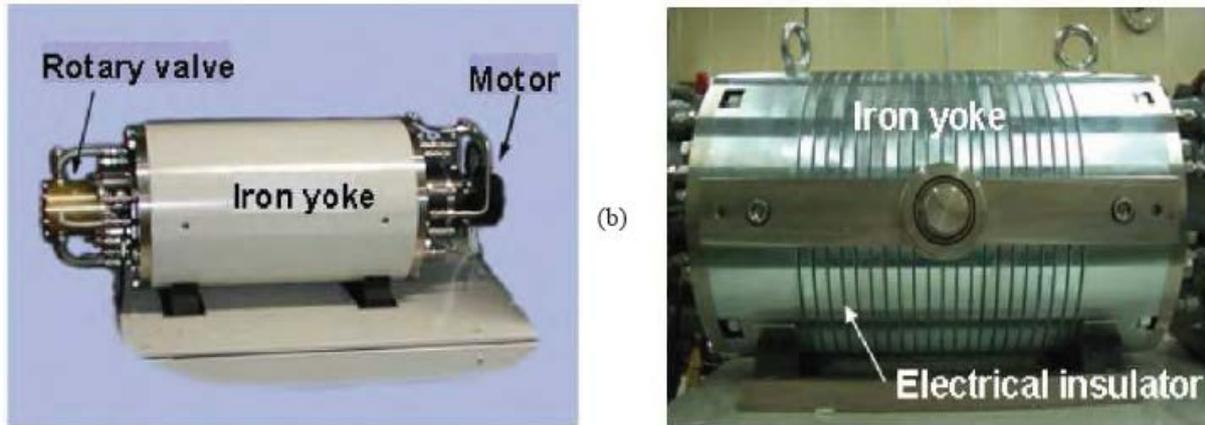


Figure II.13 : Le dispositif japonais initial (gauche) et amélioré (droite). [6]

Le champ magnétique est produit par des aimants permanents en rotation, produisant un champ maximal de 0.77 Tesla, le lit régénérateur est composé de 4 blocs.

Chaque bloc est un alliage différent de GdDy (en forme de sphère) pour élargir la plage de variation de la température. La circulation du fluide est assurée par une pompe et une valve rotative. La puissance obtenue est de 60 W. [8]

Okamura et al. ont apporté des améliorations significatives l'année suivante [13]. Le circuit magnétique amélioré permet de créer un champ de 1,1 Tesla grâce à des aimants permanents et des concentrateurs de flux. Les améliorations ont permis de faire passer la puissance maximale produite par le prototype à 540 W. Le principal défaut de ce dispositif est la rotation discontinue du rotor, défavorable à la conservation de l'énergie. Le COP de ce prototype est de 1,8 et peut sembler faible en comparaison aux autres prototypes, mais pour son calcul Okamura et al. tiennent compte de la puissance réellement consommée par le moteur et la pompe.

j- Dispositif du G2Elab (2008) :

Le dispositif réalisé au G2Elab (Laboratoire de Génie Electrique de Grenoble) est de type alternatif, comme le montre la Figure II.14.

Le champ magnétique est produit par un aimant permanent (cylindre d'Halbach) créant un champ magnétique de 0.8 Tesla.

Le fluide utilisé est l'eau. Sa circulation est assurée par une pompe péristaltique fonctionnant dans les deux sens [6]. Le vérin pneumatique produit le mouvement du bloc réfrigérant et assure les phases aimantation / désaimantation.

L'automate programmé permet de gérer le vérin et la circulation du fluide pour effectuer les 4 phases de ce cycle. Le système est fermé et il n'y a pas d'échange avec l'extérieur.

Il a été conçu pour étudier le cycle AMR et l'exploiter réellement en utilisant différents matériaux [8].

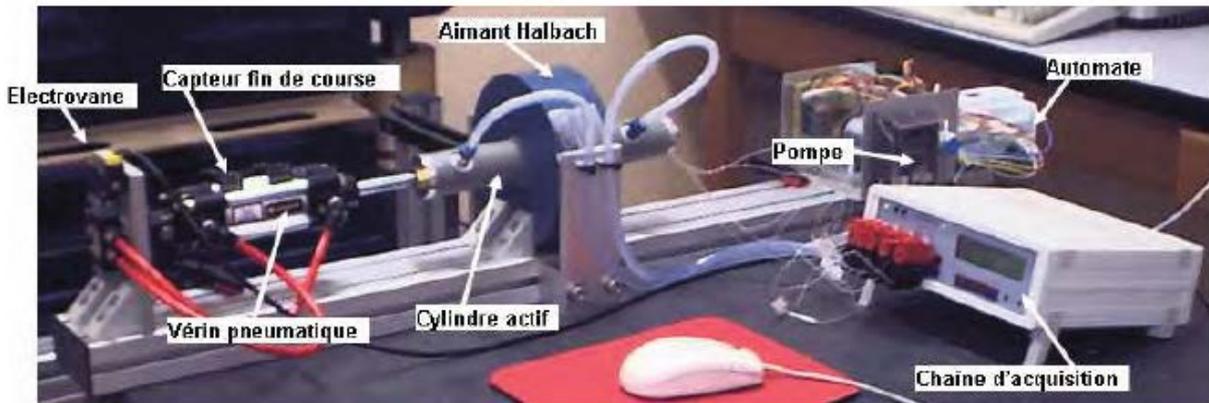


Figure II.14: Le dispositif du G2Elab. [6]

k- Prototype de Zimm et al. (2007-2010) :

L'ACM (Astronautics Corporation in Madison) a conçu un système d'AMR composé d'une roue avec 6 lits régénérateurs, eux-mêmes composés de gadolinium en poudre [22].

Cette roue est en rotation à travers une zone de fort champ magnétique de 1.5 Tesla. Les lits régénérateurs échangent avec le fluide dont la circulation est correctement réglée en fonction de la position relative de chaque lit par rapport au champ magnétique.

Pour des cycles de 0.16 à 2 Hz et des débits d'eau allant de 0.4 à 0.8 l/min, les écarts de température obtenus entre la source chaude et la source froide sont de 277 à 293K et les puissances froides de 50 à 100 W [8].

Ce prototype atteint des fréquences de fonctionnement élevées et produit des puissances et des écarts de température importants. Il confirme la faisabilité technique de la réfrigération magnétique à température ambiante pour des applications industrielles.

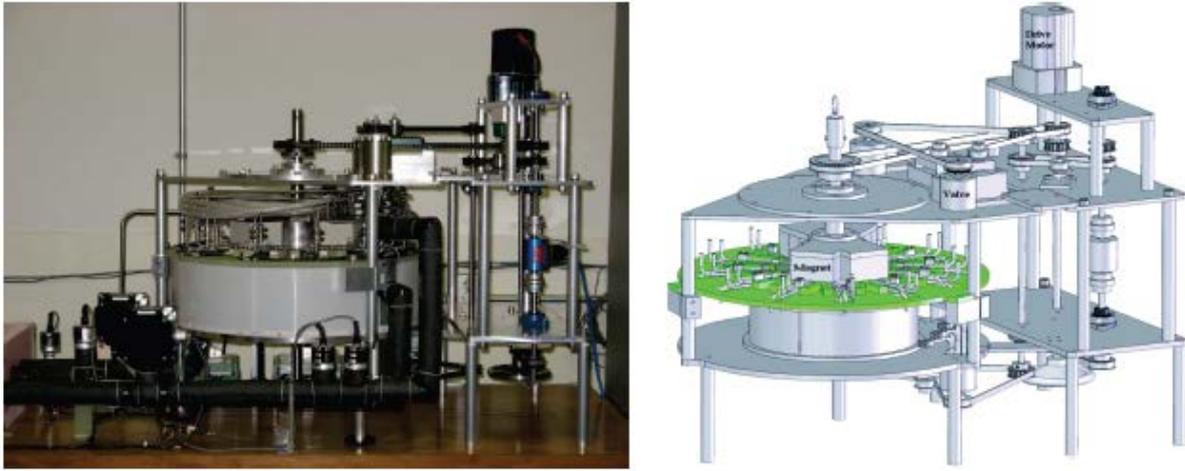


Figure II.15: Photo et schéma du 3ème prototype de Zimm et al. [10]

l- Prototype de Balli et al. (2010) :

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

Chaque cylindre de Halbach est associé à deux régénérateurs qui passent successivement dans l'entrefer. Cela permet une compensation partielle des forces subies par les régénérateurs lorsqu'ils se déplacent dans la zone à fort gradient de champ magnétique.

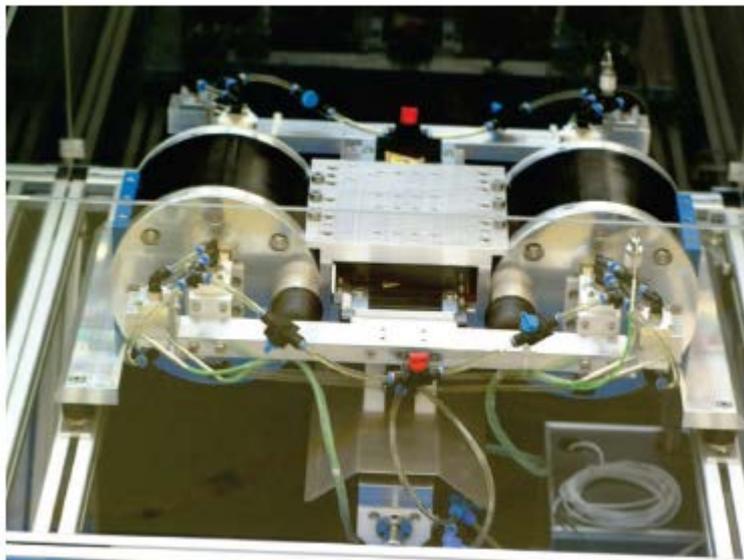


Figure II.16 : Photo de prototype de Balli et al. [10]

II.6. APPROCHE THERMODYNAMIQUE DE L'EMC :

D'après la littérature l'EMC peut être résumé par l'absorption ou l'émission de chaleur sous l'effet d'un champ d'induction magnétique B, qui se traduit par le réchauffement ou le refroidissement du matériau (tous deux réversibles).

Comme L'EMC, ne dépend que de la température initiale du matériau T et du champ d'induction magnétique B, il peut aussi être interprété comme étant le changement isotherme de l'entropie ou le changement adiabatique de la température.

L'entropie spécifique S, qui est aussi fonction de la température T et de l'induction B dans un matériau magnéto-calorique, est une combinaison de l'entropie magnétique S_m , de l'entropie du réseau S_r et de l'entropie des électrons de conduction S_e (supposée négligeable).

Elle est donnée par :

$$S(T, B) = S_m(T, B) + S_r(T) + S_e(T) \quad [6] \quad (\text{II.1})$$

Sous l'action du champ magnétique, les moments magnétiques s'alignent et conduisent à la réduction de cette entropie magnétique. Si ce processus est adiabatique et réversible, l'entropie totale étant constante, la réduction de l'entropie magnétique est compensée par l'augmentation de l'entropie du réseau conduisant ainsi à l'augmentation de la température du matériau [18]. Cet effet est maximal autour de la température de transition de phase magnétique du matériau (température de Curie pour une transition ferromagnétique à paramagnétique).

L'approche thermodynamique selon la littérature [6], [8] [10], [12], [20]..... est comme suit :

La forme différentielle de l'entropie totale S peut être donnée par :

$$ds(T, B) = \left(\frac{\partial S}{\partial T}\right)_B dT + \left(\frac{\partial S}{\partial B}\right)_T dB \quad (\text{II.2})$$

La capacité calorifique du matériau étant donnée par :

$$C_p = \left(\frac{\partial S}{\partial T}\right)_B T \quad (\text{II.3})$$

Cela donne :

$$\left(\frac{\partial S}{\partial T}\right)_B = \frac{C_p}{T} \quad (\text{II.4})$$

De (2) et (4) on peut écrire :

$$dS(T, B) = \frac{c_p}{T} dT + \left(\frac{\partial S}{\partial B} \right)_T dB \quad (\text{II.5})$$

Dans le cas d'un processus adiabatique (pas de variation d'entropie $\Delta S = 0$) on peut écrire l'équation :

$$dT = - \frac{T}{c_p} \left(\frac{\partial S}{\partial B} \right)_T dB \quad (\text{II.6})$$

En utilisant la relation de Maxwell donnée par [6]:

$$\left(\frac{\partial S}{\partial B} \right)_T = \left(\frac{\partial M}{\partial T} \right)_B \quad (\text{II.7})$$

Où : M est l'aimantation.

On peut écrire :

$$dT = - \frac{T}{c_p} \left(\frac{\partial M}{\partial T} \right)_B dB \quad (\text{II.8})$$

L'effet magnéto-calorique peut s'exprimer alors comme ceci :

$$EMC = \Delta T_{ad} = \int_{B_i}^{B_f} - \frac{T}{c_p} \left(\frac{\partial M}{\partial T} \right)_B dB \quad (\text{II.9})$$

Où ΔT , représentant ΔT_{ad} (Figure II.4), désigne l'élévation de température adiabatique intrinsèque du matériau, lorsqu'il est soumis au champ. En utilisant l'équation (8) dans l'équation (9), on obtient la relation liant directement la variation d'entropie magnétique ΔS_m et la variation de température ΔT_{ad} :

$$\Delta T_{ad}(T, \Delta B) = - \int_{B_i}^{B_f} \frac{T}{c_p} \left(\frac{\partial M}{\partial T} \right)_B dB = - \frac{T \cdot \Delta S_m(T, \Delta B)}{c_p(T)} \quad (\text{II.10})$$

Dans le cas d'un processus isotherme la température ne change pas durant l'aimantation et on peut écrire :

$$dS(T, B) = \left(\frac{\partial S}{\partial B} \right)_T dB \quad (\text{II.11})$$

En utilisant la relation de Maxwell donnée par (II.7), la variation de l'entropie magnétique peut s'écrire alors :

$$\Delta S = \int_{B_i}^{B_f} \left(\frac{\partial M}{\partial T} \right)_B dB \quad (\text{II.12})$$

II.7. THEORIE DE CHAMP MOLECULAIRE (Molecular Field Theory MFT):

Le champ moléculaire fut inventé en 1907 par Pierre Weiss pour traduire les fortes interactions qui devaient exister entre les moments magnétiques pour produire la saturation de l'aimantation dans les ferromagnétiques [1]. Elle permet d'établir non seulement l'expression de l'énergie des corps ferromagnétiques, mais aussi leur entropie et leur énergie utilisable, en fonction de la température et du volume spécifique.

On peut ainsi déterminer l'effet magnéto-calorique et les propriétés thermomagnétiques des matériaux magnéto-caloriques selon les bases de magnétisme et les relations thermodynamiques.

Pierre Weiss suppose qu'un moment magnétique atomique est soumis à un champ qui est la somme du champ appliqué et d'un «champ moléculaire» qui représente l'action des autres moments magnétiques :

$$H = H_0 + H_m \quad [1] \quad (\text{II.13})$$

Afin d'interpréter quantitativement le phénomène, un modèle est proposé, dans lequel, l'action du champ magnétique appliqué B se trouvait augmentée de celle d'un champ magnétique supplémentaire proportionnel à l'aimantation volumique B_v tel que rapporté par [8] :

$$B_v = \lambda \mu_0 M \quad (\text{II.14})$$

Où :

μ_0 : perméabilité du vide.

λ : coefficient du champ moléculaire de Weiss.

M : l'aimantation

L'énergie d'un moment magnétique s'écrit alors :

$$E_i = -\mu_i (B + B_v) \quad (\text{II.15})$$

Les moments magnétiques vont avoir tendance à s'orienter dans la direction de ce nouveau champ.

Le calcul se fait alors en remplaçant partout B par B + Bv.

Dans cette approximation M est donné par :

$$M(x) = N_A g_J \mu_B B_J(x) \quad (\text{II.16})$$

$$x = \frac{J g_J \mu_B (B + \lambda \mu_0 M(x))}{k_B T} \quad (\text{II.17})$$

$$B_J(x) = \frac{2J+1}{2J} \coth\left(\frac{2J+1}{2J} x\right) - \frac{1}{2J} \coth\left(\frac{1}{2J} x\right) \quad (\text{II.18})$$

Avec:

x : Susceptibilité (Variable de Langevin)

J : moment cinétique total.

N_A : nombre d'Avogadro.

g_J: facteur de Landé.

μ_B: magnéton de Bohr.

k_B : constante de Boltzmann.

B_J(x) : fonction de Brillouin.

L'entropie magnétique est donnée par la relation de Smart [6] :

$$S_m(x) = R \left[\ln \left(\frac{\sinh\left(\frac{2J+1}{2J} x\right)}{\sinh\left(\frac{1}{2J} x\right)} \right) - x B_J(x) \right] \quad (\text{II.19})$$

La contribution du réseau est représentée par le modèle des phonons de Debye [6]. Elle est donnée par la relation suivante :

$$S_r = R \left[-3 \ln \left(1 - e^{-\frac{T_D}{T}} \right) + 12 \left(\frac{T}{T_D} \right)^3 \int_0^{\frac{T_D}{T}} \frac{y^3}{e^y - 1} dy \right] \quad (\text{II.20})$$

Avec :

T_D: la température de Debye.

R : la constante universelle des gaz.

La résolution à l'aide d'un programme numérique (FORTRAN) des équations (II.16), (II.17) et (II.18) permet d'avoir la variation d'entropie magnétique ΔS, l'effet magnétocalorique EMC ainsi que la chaleur spécifique Cp du matériau utilisé (Gd) et son évolution en fonction de la température, calculée par la méthode de Weiss.

(les résultats seront illustrés dans le chapitre 5)

II.8. CONCLUSION :

Ce chapitre a introduit des définitions et notions de base nécessaires à la compréhension de la réfrigération magnétique qui est une technologie reposant sur les propriétés intrinsèques de certains matériaux magnéto-caloriques disposant de caractéristiques bien définies et que nous verrons par la suite du mémoire.

Nous avons expliqué le principe d'un tel système, on a vu également les principaux prototypes développés et -comme pour tout système frigorifique- on a détaillé les notions thermodynamiques le régissant.

Nous avons présenté par la suite la théorie de Champ Moléculaire de Pierre Weiss nécessaire pour la suite du mémoire.

***CHAPITRE III : COMPOSITION ET
FONCTIONNEMENT D'UN SYSTEME
DE REFRIGERATION MAGNETIQUE***

III.1.INTRODUCTION :

La mise en œuvre de l'EMC au sein de machines frigorifiques est très complexe car elle fait appel à plusieurs domaines complémentaires de la physique tel que le magnétisme, la thermique, la mécanique, l'hydraulique

Le fonctionnement des systèmes de réfrigération magnétique est similaire à celui de la réfrigération conventionnelle, sauf que les phases de compression/détente sont remplacées par l'aimantation et la désaimantation.

Nous verrons dans ce chapitre le principe de fonctionnement d'un réfrigérateur magnétique, sa composition, les différents cycles utilisés pour la réfrigération magnétique, ainsi que les différents prototypes mis en œuvre jusqu'aujourd'hui.

III.2. COMPOSITION :

Un système de réfrigération magnétique est constitué essentiellement d'un matériau magnéto-calorique qui représente le cœur même du système.

Un champ magnétique variable -émis par un électroaimant alimenté, par un courant variable, par une bobine supraconductrice ou par un aimant permanent- fait successivement chauffer et refroidir le matériau.

La chaleur ainsi dégagée (ou bien absorbée) est transférée vers un échangeur thermique à l'aide d'un fluide caloporteur lui-même déplacé par une pompe ou un piston.

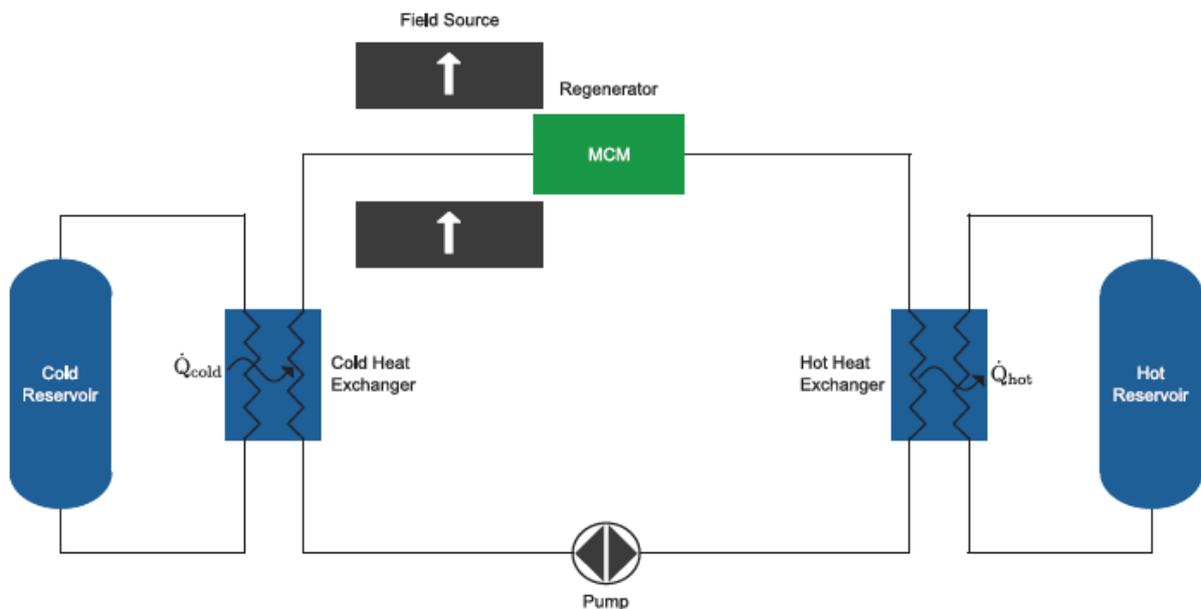


Figure III.1 : Composition d'un système de réfrigération magnétique. [10]

III.3- FONCTIONNEMENT :

La réfrigération magnétique est basée sur des cycles composés de quatre phases qui peuvent se chevaucher selon le cycle utilisé :

1. L'aimantation du matériau magnétocalorique qui entraîne une augmentation de sa température.
2. L'écoulement du fluide caloporteur qui extrait une partie de la chaleur du matériau magnétocalorique pour la céder à la source chaude.
3. La désaimantation du matériau magnétocalorique qui entraîne une diminution de sa température.
4. L'écoulement du fluide caloporteur prélève de la chaleur à la source froide pour la céder au matériau magnétocalorique.

En analogie avec un cycle thermodynamique classique, et comme vu précédemment, ces quatre phases peuvent être substituées à une compression d'un gaz, rejet de chaleur à la source chaude, détente du gaz, absorption de chaleur de la source froide. Ces phases peuvent se superposer et être réalisées selon différents cycles thermodynamiques qui seront présentés dans la Section III.4.

Les phases d'aimantation et désaimantation sont assurées par la génération d'un champ variable dans le matériau magnétocalorique. Pour des applications à température ambiante, la génération de ce champ est réalisée par le déplacement relatif d'une structure à aimants par rapport au matériau magnétocalorique. Il est possible de réaliser deux types de mouvement, un mouvement linéaire (alternatif) ou un mouvement de rotation, illustrés sur la Figure III.2.

S'il existe des systèmes de réfrigération magnétique des deux types, les systèmes rotatifs sont préférables pour plusieurs raisons. Premièrement ces systèmes ont généralement un encombrement plus réduit par rapport aux systèmes linéaires. Deuxièmement, les structures rotatives canalisent souvent mieux le flux magnétique que les structures linéaires. Enfin, avec des structures rotatives, il est envisageable de réaliser un mouvement à vitesse constante, ce qui est favorable à la réduction des dissipations de l'énergie [10].

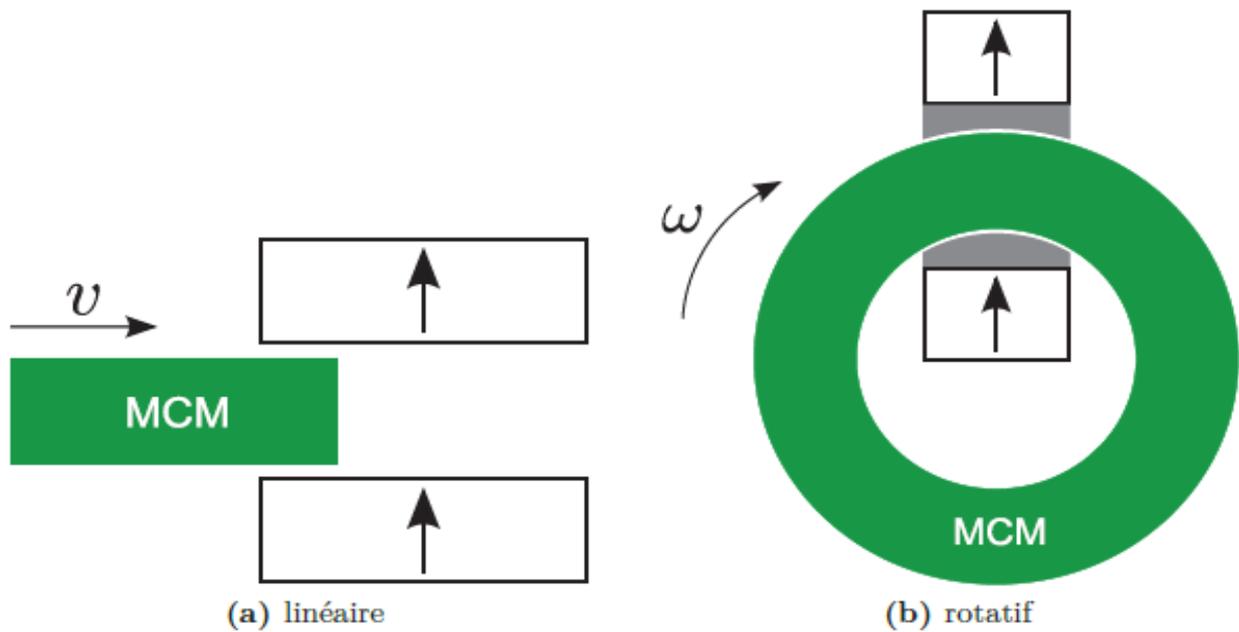


Figure III.2 : Les deux grandes familles de systèmes de réfrigération magnétique. [10]

III.4. CYCLES DE REFRIGERATION MAGNETIQUE :

L'étude historique de la réfrigération magnétique montre que plusieurs cycles thermodynamiques ont été mis en œuvre. Parmi ceux-ci, nous pouvons distinguer le cycle Stirling, le cycle magnétique d'Ericsson, le cycle magnétique de Brayton, le cycle de Carnot, et enfin le cycle magnétique à régénération active (AMR).

Parmi eux, seuls les cycles d'Ericsson et de Brayton peuvent être utilisés autour de la température ambiante car ils impliquent l'utilisation d'un régénérateur permettant d'atteindre une forte différence de température et sont faciles à mettre en œuvre.

III.4.1 - Cycle magnétique de Carnot :

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

- Aimantation adiabatique : le matériau s'échauffe instantanément sans échanger de chaleur avec l'extérieur.
- Aimantation isotherme : L'aimantation est isotherme, c'est-à-dire que toute la chaleur produite précédemment est cédée à la source chaude.
- Désaimantation adiabatique : le matériau se refroidit instantanément sans échanger de chaleur avec l'extérieur.
- Désaimantation isotherme : le matériau absorbe la chaleur en provenance de la source froide.

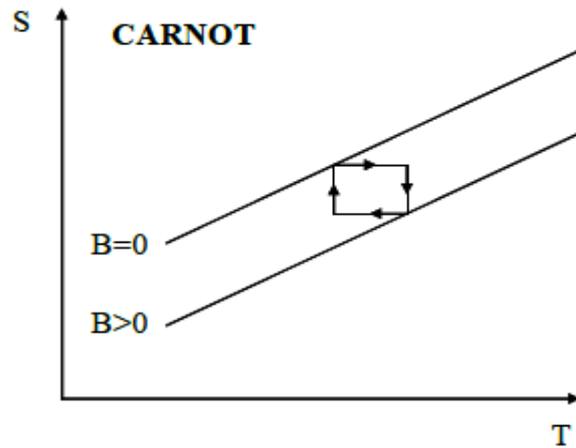


Figure III.3: Cycle magnétique de Carnot

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

La mise en œuvre pratique du cycle de Carnot magnétique est complexe car elle nécessite l'utilisation d'au moins quatre amplitudes différentes de champ magnétique. La description de ce cycle sert uniquement à définir l'efficacité des autres cycles.

Un critère important pour évaluer les systèmes est le coefficient de performance COP (Coefficient Of Performance) qui, dans une application de réfrigération, représente le ratio entre l'énergie froide Q_f et le travail fourni W et il est équivalent à la quantité d'énergie récupérée par rapport à la quantité d'énergie fournie. Voir figure III.4.

$$\text{COP} = \frac{Q_f}{W} \quad (\text{III.1})$$

$$\text{COP}_{\text{Carnot}} = \frac{T_0}{T_1 - T_0} \quad (\text{III.2})$$

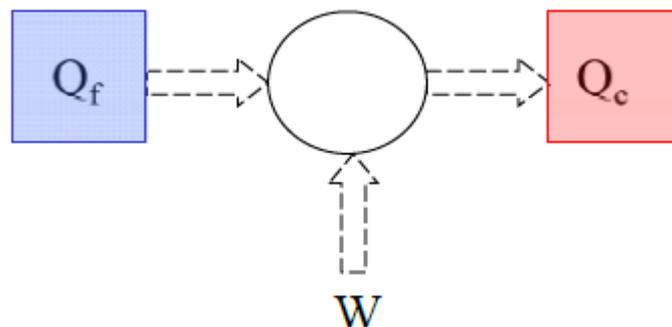


Figure III.4 : Schématisation d'un système délivrant de la puissance froide et chaude à l'aide d'un travail fourni. [20]

En appliquant le bilan énergétique sur la figure III.4 on peut écrire :

$$W = Q_c - Q_f \tag{III.3}$$

III.4.2- Cycle magnétique d'Ericsson / Stirling:

Le cycle d'Ericsson/Stirling magnétique est composé de quatre étapes (voir *Figure III.5*) et nécessite de régénérer de la chaleur au cours de certaines étapes :

- Aimantation isotherme : le matériau s'échauffe mais cède cette chaleur à la source chaude.
- Refroidissement isochope : Le matériau reste aimanté et cède de la chaleur à la source chaude, ce qui le refroidit.
- Désaimantation isotherme : le matériau se refroidit et absorbe une certaine quantité de chaleur à la source froide.
- Réchauffement isochope : le matériau absorbe de la chaleur en provenance de la source froide.

Il est à noter que le cycle de Stirling est quelque peu différent durant les phases de réchauffement et de refroidissement, qui se font à isoaimantation au lieu d'être isochope.

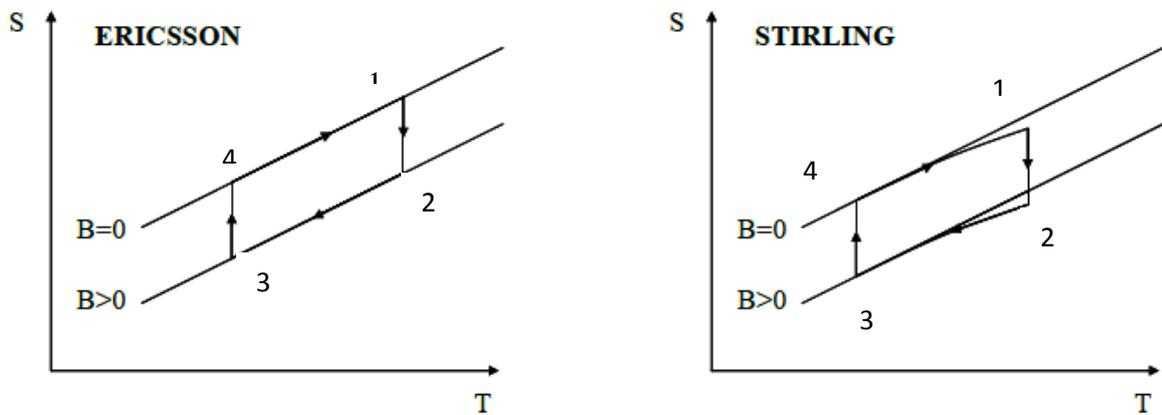


Figure III.5. Cycle magnétique d'Ericsson/Stirling

En utilisant les relations (III.1) et (III.3) le COP d'un cycle d'Ericsson peut s'écrire :

$$COP_{Ericsson} = \frac{T_0(S_3 - S_2)}{T_1(S_1 - S_4) - T_0(S_3 - S_2)} \tag{III.4}$$

$$\lim_{T_0 \rightarrow T_1} COP_{Ericsson} = \frac{T_0}{T_1 - T_0} = COP_{Carnot}$$

III.4.3- Cycle magnétique de Brayton :

La *Figure III.6* représente le cycle de Brayton magnétique, qui est le cycle de réfrigération magnétique le plus simple. Il est composé de quatre étapes :

- Aimantation adiabatique : le matériau s'échauffe instantanément sans échanger de chaleur avec l'extérieur.
- Refroidissement isochamp : Le matériau reste aimanté et cède de la chaleur à la source chaude, ce qui le refroidit.
- Désaimantation adiabatique : le matériau se refroidit instantanément sans échanger de chaleur avec l'extérieur.
- Réchauffement isochamp : le matériau absorbe de la chaleur en provenance de la source froide.

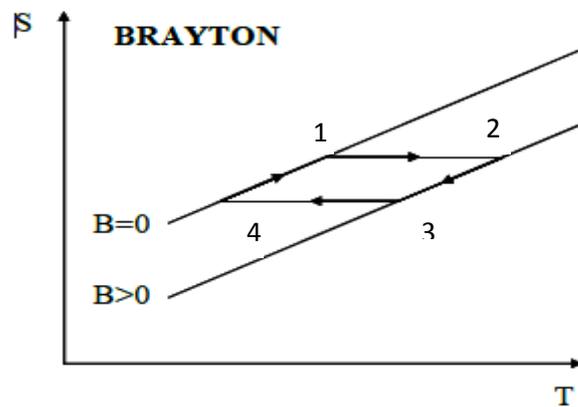


Figure III.6 : Cycle magnétique de Brayton

L'application des relations (III.1) et (III.3) pour le cycle de Brayton donne :

$$COP_{Brayton} = \frac{Q_f}{W} = \frac{Q_f}{Q_c - Q_f} = \frac{T_1(S_3 - S_2)}{T_0(S_1 - S_4) - T_1(S_3 - S_2)} \quad (III.5)$$

Le cycle de Brayton est optimal lorsque les courbes T - S sont parallèles.

III.4.4- Cycle magnétique à régénération active (AMR) :

L'exploitation directe de l'EMC géant autour de la température ambiante est limitée par le fait que les matériaux magnétoélectriques existants ne permettent pas d'atteindre des écarts de températures élevés [12]. Par exemple, un échantillon de gadolinium autour de la température ambiante produit un EMC d'environ 10 K sous un champ magnétique de 5 T.

Sachant que le gadolinium est considéré comme l'un des meilleurs matériaux magnétocaloriques disponibles actuellement [18], 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.

Une autre solution pour atteindre des écarts de température importants est d'utiliser un cycle à régénération. Le cycle AMR (Active magnetic regeneration) a été imaginé par Barclay et Steyert en 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 le rôle de régénérateur est assuré par le fluide qui traverse le matériau en circulant alternativement de la source chaude vers la source froide [19].

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. La régénération dans les systèmes de réfrigération magnétique permet à la chaleur rejetée par le réseau dans une étape du cycle d'être restaurée et retournée au réseau dans une autre étape du même cycle [21]. Donc la capacité utilisée pour le refroidissement de la charge du réseau peut être utilisée efficacement pour augmenter la variation effective de l'entropie et l'écart de température.

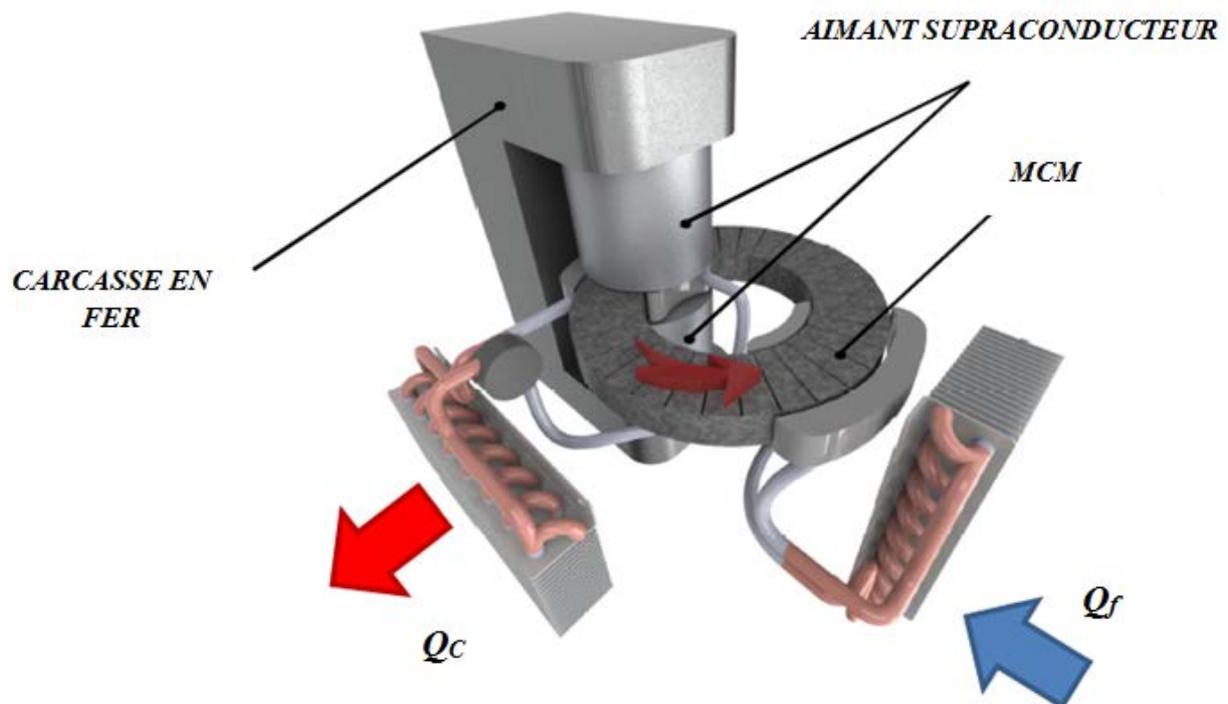
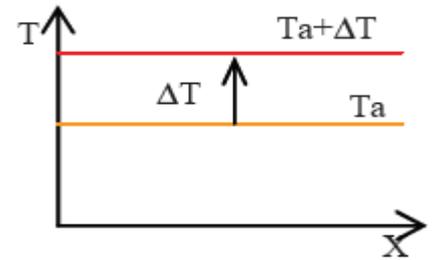


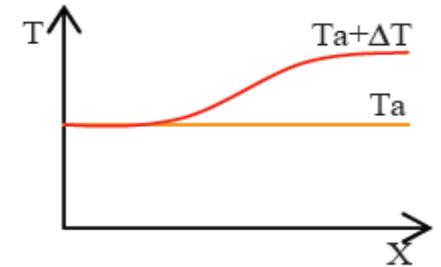
Figure III.7 : Schéma simplifié du concept breveté par Barclay [19]

Le cycle complet de l'AMR décrit par Braclay est composé de quatre étapes (deux adiabatiques et deux isochamps) [8]:

Etape 1 : Aimantation adiabatique du matériau ($B=B_{\max}$) à partir d'un état initial où tout le système est à température T_a : Chaque point du matériau régénérateur voit sa température augmenter de ΔT suite à l'application du champ magnétique.

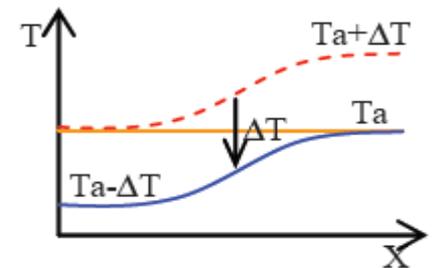


Etape 2 : Ecoulement du fluide de la source froide vers la source chaude : La chaleur de l'aimantation est évacuée par le fluide circulant de la source froide T_F à la source chaude T_C on crée ainsi un gradient thermique le long du lit.

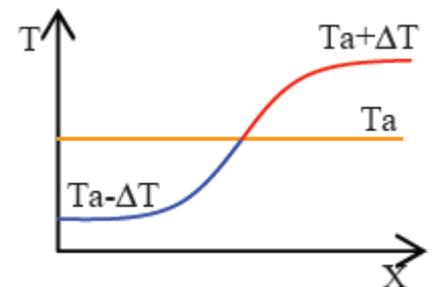


La température du fluide à la sortie vaut $T_a + \Delta T_{ad}$.

Etape 3 : Désaimantation du matériau ($B=0$) : Chaque point du régénérateur voit sa température baisser de ΔT_{ad} suite à la désaimantation.



Etape 4 : Ecoulement du fluide de la source chaude vers la source froide : Le fluide circulant de la source chaude T_C à la source froide T_F cède sa chaleur au régénérateur et sort à température $T_F - \Delta T_{ad}$ inférieure à celle du côté froid. Le gradient est amplifié



Le cycle revient alors à l'étape 1. Le gradient est déjà formé dans le régénérateur, le prochain cycle l'amplifie à nouveau, etc. Ces étapes décrites précédemment représentent la mise en œuvre du cycle AMR, c'est-à-dire que l'énergie disponible ne sert qu'à amplifier le gradient de température ΔT dans le régénérateur.

III.5.CONCLUSION :

Nous avons défini dans ce chapitre la composition et le principe de fonctionnement d'un prototype de réfrigération magnétique de base. Par la suite on a expliqué les cycles magnétiques sur lesquels reposent les différents prototypes déjà réalisés. On retrouve les cycles de Brayton, d'Ericsson, de Stirling et de Carnot magnétiques.

Si le cycle de Brayton reste le moins compliqué à étudier, il est nécessaire d'utiliser un cycle régénératif pour atteindre les écarts de température requis pour des applications industrielles.

Deux types de systèmes existent, les systèmes linéaires et les systèmes rotatifs et un grand nombre de prototypes des deux types ont été construits depuis le premier prototype réalisé par Brown en 1976. Des résultats intéressants sont d'ores et déjà enregistrés. Pour les prototypes actuels, des écarts de température de 8,6 fois l'EMC ont été atteints, ce qui démontre le potentiel énorme de cette nouvelle technologie.

***CHAPITRE IV : MATERIAUX
MAGNETIQUE ET SOURCES DE
CHAMP***

IV.1.INTRODUCTION :

Afin d'avoir le gradient de température dans un matériau magnétocalorique, ce dernier doit être soumis à un champ magnétique d'induction B .

La source de champ magnétique est un élément capital des systèmes de réfrigération magnétique, aussi bien pour leurs performances que pour leur coût.

Plusieurs moyens de création de champ magnétique existent, ces derniers seront l'objet d'étude de ce chapitre. On verra les différents moyens de création de champ magnétique et on pourra par la suite étudier un modèle numérique réalisé à l'aide d'un logiciel nommé « FEMM42 » et les résultats obtenus.

IV.2.QUELQUES NOTIONS DE BASE SUR LE MAGNETISME :

Quand un champ magnétique d'excitation H est appliqué à un matériau magnétique, alors une aimantation M va être induite dans celui-ci.

L'induction B générée dans le matériau est la résultante des effets du champ et de l'aimantation :

$$B = \mu_0 (H + M) \quad (IV.1)$$

Avec μ_0 la perméabilité magnétique du vide : $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$.

III.3. MATERIAUX MAGNETIQUES :

On classe les matériaux magnétiques en trois grandes familles illustrées dans le Tableau IV.1.

Tableau IV.1 : Différentes familles de matériau magnétique

<i>Matériau</i>	Diamagnétique	Paramagnétique	Ferromagnétique
<i>Exemples de matériaux</i>	eau, cuivre, argent, ...	air, platine, aluminium, ...	fer, cobalt, nickel,...
<i>Structure magnétique sous l'effet d'un champ magnétique</i>	moments magnétiques très faibles	moments désordonnés	moments alignés

Dans les matériaux ferromagnétiques on peut distinguer deux types:

- les matériaux magnétiques doux, qui sont utilisés dans les circuits magnétiques pour leur perméabilité élevée, qui permet de bien canaliser le flux magnétique, ainsi que pour leur faible surface du cycle hystérésis qui correspond à de faibles pertes.
- les matériaux magnétiques durs, qui sont utilisés comme source de champ grâce à leur induction rémanente et champ coercitif élevés.

IV.4. MATERIAUX MAGNETOCALORIQUES (MCM) :

Tout matériau magnétique présente un effet magnétocalorique (EMC), ce qui donne un très large champ d'investigation pour trouver le matériau adéquat à chaque besoin.

Pour les applications de la réfrigération magnétique autour de la température ambiante, le matériau doit présenter un EMC géant autour de cette température [12]. Par EMC géant, nous entendons des variations de températures élevées (quelques kelvins à quelques dizaines de kelvins) pour des valeurs d'inductions magnétiques accessibles par des aimants ou des électroaimants supraconducteurs (quelques teslas) [12]. Même si une large gamme de matériaux avec un EMC géant existe déjà, la recherche et le développement de nouveaux matériaux magnétocaloriques est toujours active afin de les améliorer ou d'en créer d'autres.

On peut classer ces matériaux 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. 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 IV.1.

A l'inverse, les matériaux du second ordre ont des variations d'entropie plus faibles mais sur une large plage de température.

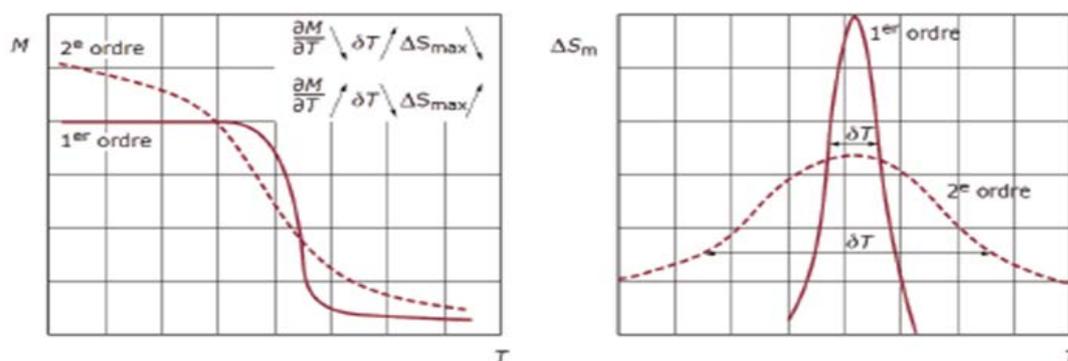


Figure IV.1 : Transition de phase et variation de l'entropie en fonction du type de matériau [12].

Comme le matériau magnétocalorique est le noyau principal de la réfrigération magnétique, il doit disposer de certaines caractéristiques pour être intéressant [21], [18] :

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

Par exemple, le gadolinium (Gd) est un élément ayant une transition **ferromagnétique (état ordonné) → paramagnétique (état désordonné)** à 293 K (Changement d'ordre magnétique à température de Curie). De plus, ce matériau ayant un moment magnétique élevé, l'effet magnétocalorique qu'il possède est, lui aussi, relativement élevé ($\approx 2 \text{ K} \cdot \text{T}^{-1}$). Il présente aussi l'avantage d'être un composé facile à obtenir puisque c'est un élément pur, par opposition à un alliage, et facile à mettre en œuvre par sa grande ductilité et malléabilité. Cela explique pourquoi il est utilisé dans la plupart des dispositifs actuels de réfrigération magnétique à température ambiante.

En revanche, si la recherche sur les matériaux magnétocaloriques est si active, c'est, entre autres, parce qu'il présente aussi quelques inconvénients. Le principal est qu'il n'est pas assez abondant.

Vu la taille du marché qu'il est possible de viser, la production mondiale de cet élément relativement rare sur Terre ne pourra pas satisfaire la demande. Cet inconvénient est plus critique que le coût de ce matériau qui est relativement élevé.

De nombreuses familles de matériaux présentent des candidats potentiellement intéressants que ce soit parmi les terres rares ou les métaux de transition, sous leur forme métallique, en alliages ou en oxydes.

Les matériaux ayant un effet magnétocalorique équivalent ou plus important que celui du gadolinium, en termes de ΔT ou de ΔS , sont dits à effet magnétocalorique géant. Une liste de quelques matériaux à EMC géant autour de la température ambiante susceptibles d'être utilisés est exposée dans le tableau IV.2. :

Tableau IV.2. Caractéristiques de quelques matériaux à EMC géant autour de T_c [6].

Matériaux magnétiques	T_c (K)	ΔH (T)	Δs_m (J K ⁻¹ K ⁻¹)	EMC (K)
Gd	294	2	4.3	4.8
		0.8		1.5
		0.5		0.9
Gd _{0.83} Dy _{0.13}	278	2	4	
MnAs _{1-x} Sb _x				
x=0	318	2	31	4.8
x=0.1	283	2	24	5.7
x=0.25	230	2	18	-
MnFeP _{1-x} As _x				
x=0.55	300	2	14.5	6
x=0.50	282	2	16.5	-
Ni _{52.6} Mn _{23.1} Ga _{24.3}	300	5	18	-
Gd ₅ (Ge _{0.5} Si _{0.5}) ₄	276	2	14	7.4
Fe ₄₉ Rh ₅₁	313	2	12	8.4
Fe ₄₉ Rh ₅₁	316	2	22	12.9
Fe _{1.75} Rh _{0.25}	310	2	1.4	1
La(Fe _{0.89} Si _{0.11}) ₁₃ H _{1.3}	291	2	24	6.9

IV.5. DIFFERENTS MOYENS DE PRODUCTION DE CHAMP MAGNETIQUE :

Au cours d'un processus aimantation/désaimantation, les variations d'entropie magnétique ΔS_m et de la température adiabatique ΔT_{ad} dépendent directement des variations de champ magnétique appliqué, c'est ces mêmes paramètres (ΔS_m et ΔT_{ad}) qui déterminent la puissance froide et l'écart de température d'un dispositif de réfrigération magnétique.

D'où il faut disposer d'un maximum de champ magnétique dans un volume généralement égal au volume du matériau réfrigérant.

Suivant la valeur de l'intensité de champ magnétique souhaité, on distingue trois types de technologie [6]:

IV.5.1. Les électroaimants :

Les électroaimants sont généralement utilisés pour les applications nécessitant des inductions inférieures à 0,3T. Au-delà, les puissances électriques mises en jeu deviennent très importantes ainsi que les quantités de chaleur à évacuer. Pour ces raisons cette solution est exclue dans la réfrigération magnétique.

IV.5.2. Les aimants supraconducteurs :

Les aimants supraconducteurs sont formés d'un système de bobines supraconductrices placées dans un réservoir d'hélium liquide à -269°C (4K). Les champs créés sont très intenses ; ils peuvent atteindre jusqu'à 8Tesla dans des volumes importants. Cependant, le maintien à très basse température de l'ensemble impose un certain encombrement dû au système de refroidissement associé. Ce point constitue un grand inconvénient en particulier pour les applications domestiques de la réfrigération magnétique. Pour des grandes puissances les aimants supraconducteurs restent une solution envisageable. D'ailleurs c'est grâce aux aimants supraconducteurs que la faisabilité de la réfrigération magnétique a été démontrée. En effet, le premier démonstrateur réalisé aux USA [22] utilise un aimant supraconducteur comme source de champ magnétique, avec des inductions allant de 3 à 5 Tesla. Des puissances froides de l'ordre de 600W ont été ainsi obtenues.

IV.5.3. Les aimants permanents :

Les aimants sont des matériaux magnétiques durs souvent utilisés pour leur capacité à créer eux-mêmes un champ magnétique sans consommation d'énergie électrique ni perte d'intensité sous certaines conditions d'utilisation appropriées. Il existe une très grande variété d'aimants, le tableau ci-dessous représente les nuances d'aimant les plus usuelles. Ils se différencient essentiellement par la valeur de leur aimantation rémanente B_r et par leur champ coercitif H_c .

Tableau IV.3. Propriétés magnétiques de quelques aimants [6]

Type d'aimant	B_r (T)	H_c (kA/m)	T_c (K)	Remarques
Ferrites durs				
- Ferrites isotropes	0.22	135	450	- Très bon marché. - Fragile.
- Ferrites anisotropes				- Bonne résistance à la corrosion et à l'oxydation
haute rémanence I	0.42	260		
haute coercitivité II	0.38	285		
Samarium cobalt				
- Frittés $SmCo_5$	0.95	700	720	- Chers à cause du cobalt et du samarium.
- Frittés Sm_2Co_{17}	1.1	500		- Puissants et stables.
- Aimants liés	0.65	400		- Très forte coercitivité - Moyenne résistance à la corrosion et mauvaise résistance à l'oxydation - Température d'utilisation élevée
Alnico(Al, Ni, Co, Cu, Fe)				
- Isotrope type	0.7	50	750	- Relativement chers, de moins au moins compétitifs. - Très bonne stabilité en température
- Anisotrope orienté type I	1.2	55		- Faible coercitivité et risque de désaimantation par son propre champ démagnétisant.
- Anisotrope orienté type II	0.8	130		- Bonne résistance à la corrosion et moyenne résistance à l'oxydation - Température d'utilisation élevée
Néodyme –Fer – bore				
- Isotrope lié	0.41 à 0.57	290 à 342		- Relativement chers, de plus en plus compétitifs (fin de brevets).
- Anisotrope lié	0.83 à 0.86	540 à 600		- Très sensibles à la température
- Fritté haute rémanence	1.20 à 1.30	900 à 920	310	- Très forte coercitivité.
- Fritté haute coercitivité	0.96 à 1.02	750		- Mauvaise résistance à la corrosion et à l'oxydation - Température d'utilisation faible

IV.6.CONCLUSION :

Dans ce chapitre on a défini quelques notions de bases du magnétisme nécessaire à la poursuite du mémoire, on a mis en relief les matériaux magnétiques, leurs différentes familles et leurs caractéristique, nous avons présenté aussi les matériaux magnétocaloriques les plus adéquats à des applications à température ambiante. Si le gadolinium reste le matériau de référence, son coût élevé et sa rareté ne permettent pas d'envisager la commercialisation de ces systèmes, d'où la recherche sur les nouveaux matériaux reste très active et quelques matériaux semblent d'ores et déjà très prometteurs, notamment les LaFeSiH.

On a présenté par la suite les différentes sources de champ magnétique qui représente une partie très importante des systèmes de réfrigération magnétique.

***CHAPITRE V : RESULTATS ET
INTERPRETATIONS***

V.1 INTRODUCTION :

La conception d'un système de réfrigération magnétique passe par la maîtrise de cette nouvelle technologie du matériau au dispositif.

A l'échelle du dispositif et du système, il est encore très tôt pour parler de performance, cependant, tous les travaux réalisés laissent entrevoir l'importance du matériau actif, des sources de champ magnétique ainsi que du cycle thermique pour franchir le stade expérimental [6].

Dans ce chapitre nous allons concevoir une source de champ magnétique, partie très importante de la RM, nous verrons par la suite les résultats de la théorie de champ moléculaire appliquée sur du Gd et nous allons à la fin étudier le cycle magnétique de Brayton.

V.2 DIMENSIONNEMENT D'UNE SOURCE DE CHAMP MAGNÉTIQUE :

On a pu concevoir un dispositif à aimant permanent grâce au logiciel *FEMM 4.2*. Ce logiciel est utilisé pour la résolution des équations à dérivées partielles régissant le comportement électromagnétique d'un système. Ces équations sont obtenues à partir des équations de MAXWEL et des relations du milieu, et leur solution est obtenue par une résolution du problème posé par la méthode des éléments finis. Ce logiciel permet d'avoir pour une géométrie bien définie les valeurs de champ magnétique appliqué et de l'induction générée sur un matériau donné. Le problème étudié dans notre cas est de type magnétostatique (les phénomènes électromagnétique sont à variation temporelle nulle).

La géométrie du système étudié est présentée en 2D, On a introduit une géométrie en forme de C en prenant comme modèle celui utilisé dans la littérature (Vasile et Muller) [10].

La structure est composée d'aimants permanents (NdFeB), de pièces en matériau magnétique doux (Hiperco-50) pour concentrer le flux magnétique dans l'entrefer, et de fer pur ayant des propriétés Gaussienne (empêche les fuites de champs) qui recouvre la structure.

Une barre en fer pur est glissée dans l'entrefer et joue le rôle du matériau magnéto-calorique.

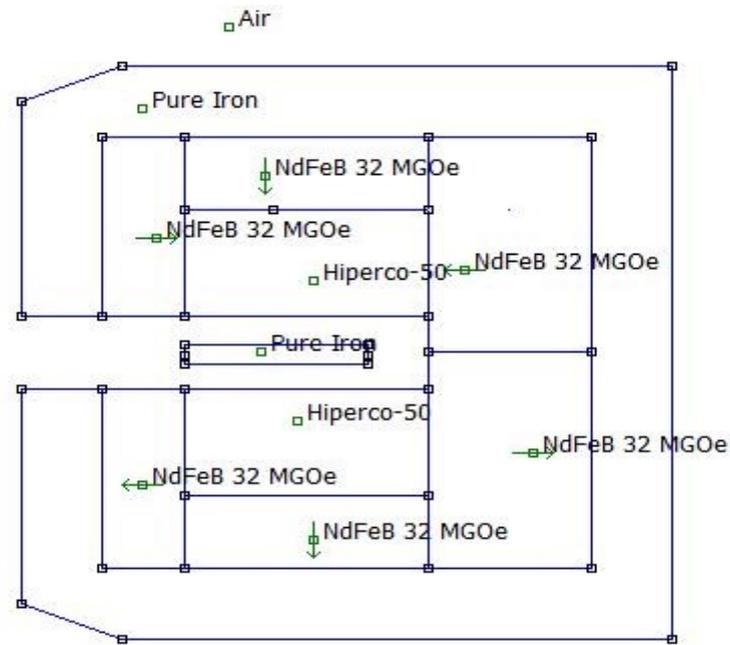


Figure V.1 : Structure de base en forme de C

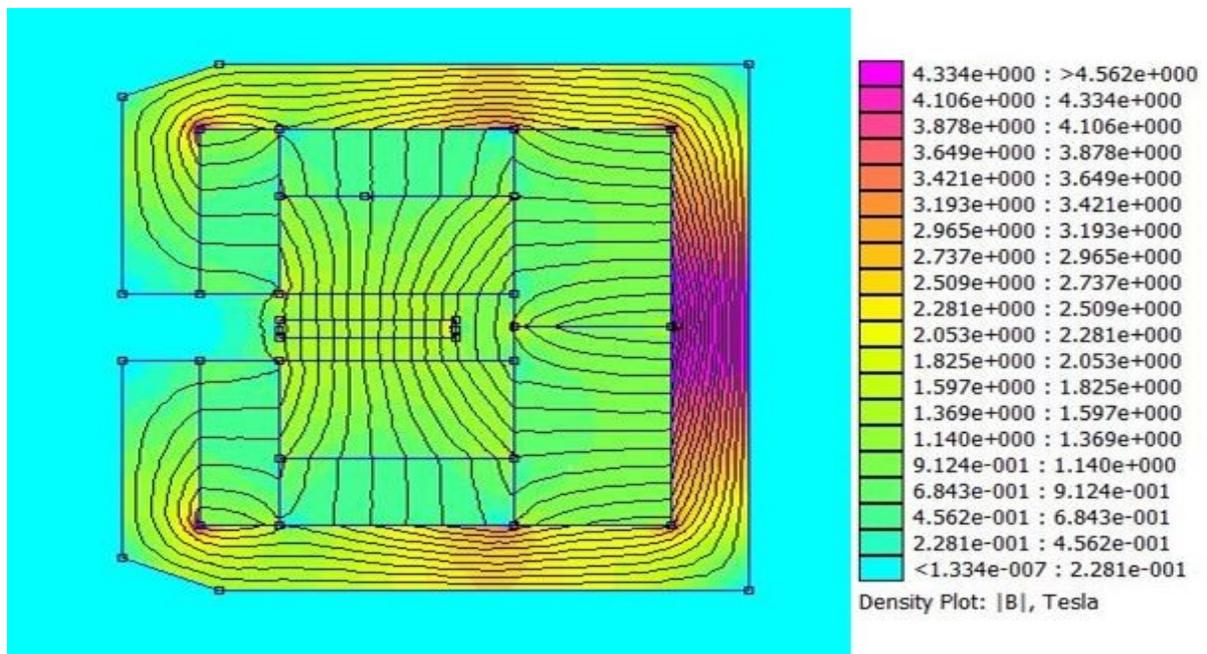


Figure V.2 : Lignes de champ émises par l'aimant permanent sur la barre de fer

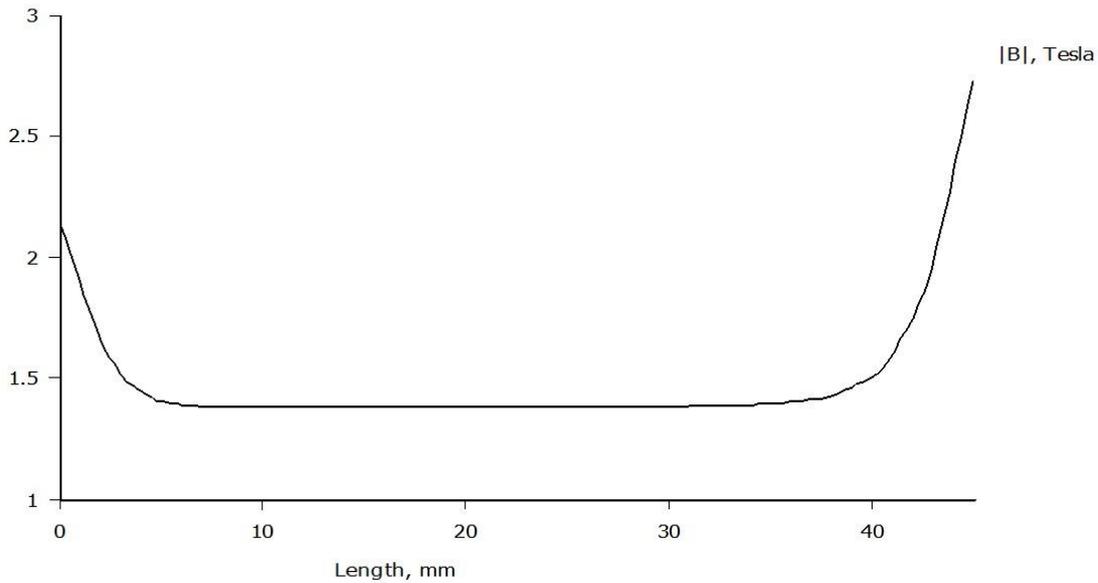


Figure V.3 : L'induction magnétique B le long de la barre de fer

- ❖ **Dans notre simulation, comme cité ci-dessus, on a utilisé des aimants permanents comme source de champ magnétique et on a pu atteindre une induction de 1.4 T. On a fait une estimation de la puissance qu'il faut générer pour atteindre cette même valeur mais en utilisant un électroaimant à la place de l'aimant permanent pour pouvoir saisir l'importance du choix de la source de champ magnétique:**

A partir de la loi d'AMPER :

$$nI = HL \quad (V.2)$$

$$B = \mu_0 H \quad (V.3)$$

Avec :

I : l'intensité électrique

n : le nombre de spire

H : le champ magnétique

μ_0 = La perméabilité du vide = $4\pi \cdot 10^{-7}$ N/m

L : la longueur

B : l'induction magnétique

De (V.1) et (V.2) on a :

$$nI = \frac{B}{\mu_0} L \quad (V.4)$$

D'où :

$$I = \frac{B}{\mu_0 n} L \quad (V.5)$$

Si on prend $n=1000$ spires et $L= 60\text{mm}$ pour un $B= 1.4\text{T}$ on aura :

$$I = \frac{1.4 \times 60 \cdot 10^{-3}}{4\pi \cdot 10^{-7} \times 1000} = 66.845 \text{ A}$$

On a:

$$P = VI \tag{V.6}$$

P : la puissance utile

V : Différence de potentiel

$$P = 220 \times 66.845 = 14705.9 \text{ W}$$

Et la puissance requise pour 24H sera :

$$P = 220 \times 66.845 \times 24 = 352941.6 \text{ Wh} \approx 352.9 \text{ KWh}$$

Et si l'on estime le prix du KWh à 5DA l'unité il nous faudrait :

$$\text{\$} = 352.9416 \times 5 = 1764.708 \text{ DA}$$

De plus un tel dispositif utilisant des électroaimants, alimentés en courant continu, nécessite un convertisseur alternatif/continu, du fait, augmente le coût et la taille du système, ce qui est exorbitant, non économique et encombrant et qui justifie l'élimination des électroaimants au-delà de 0.3Tesla et l'orientation vers les aimants permanents qui sont plus économique et plus efficace.

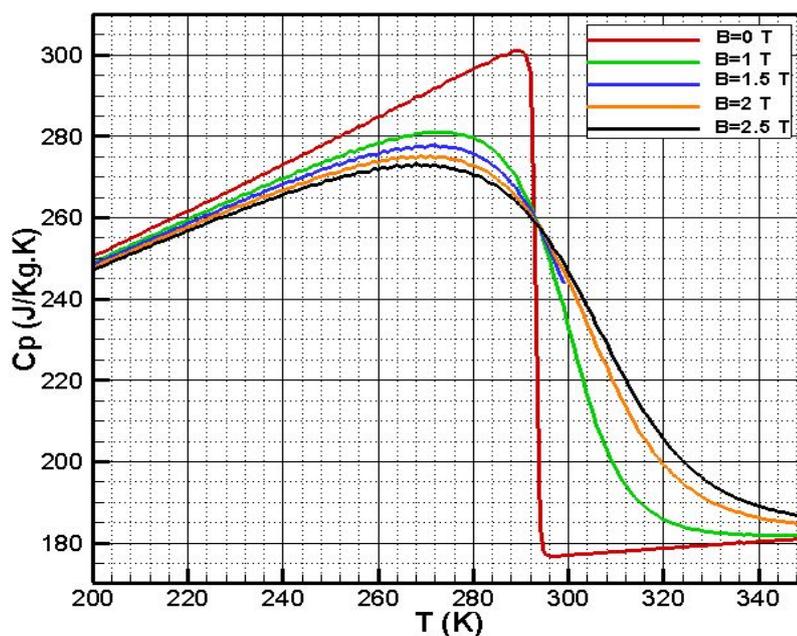
V .2 CALCUL DES PROPRIÉTÉS THERMOMAGNÉTIQUE DU MATÉRIAU MAGNÉTOCALORIQUE

Dans cette section nous allons appliquer l'étude théorique basée sur la Théorie de champ moléculaire (MFT) et développée précédemment (Chapitre II) sur du Gd. Le tableau V.1 donne les différents paramètres utilisés dans le modèle pour calculer les propriétés magnétocaloriques.

Tableau V.1. Propriété magnétique de Gd

J	3.5	[-]
N	$6.023 \cdot 10^{23}$	[mol ⁻¹]
g _j	2	[-]
μ _B	$9.2740154 \cdot 10^{-24}$	[A.m ²]
k _B	$1.380662 \cdot 10^{-23}$	[J.K ⁻¹]
μ ₀	$4\pi \cdot 10^{-6}$	[H.m ⁻¹]
T _C	294	[K]
T _D	184	[K]

Différents calculs avec plusieurs valeurs d'induction magnétique B (Voir Annexe C) nous ont permis d'avoir les graphes suivants :

**Figure V.4 : Variation de Cp en fonction de T pour différent B**

On remarque sur la figure V.4 qu'en présence d'un champ magnétique de différentes inductions ($B \neq 0$), le Cp augmente avec l'augmentation de la température jusqu'à atteindre son maximum au voisinage de $T=273$ K, et diminue avec l'augmentation de la température, tandis qu'en l'absence du champ magnétique ($B=0$) le Cp observe un pic au voisinage de la température de Curie ($T=294$ K) à cause de la transition ferromagnétique à paramagnétique.

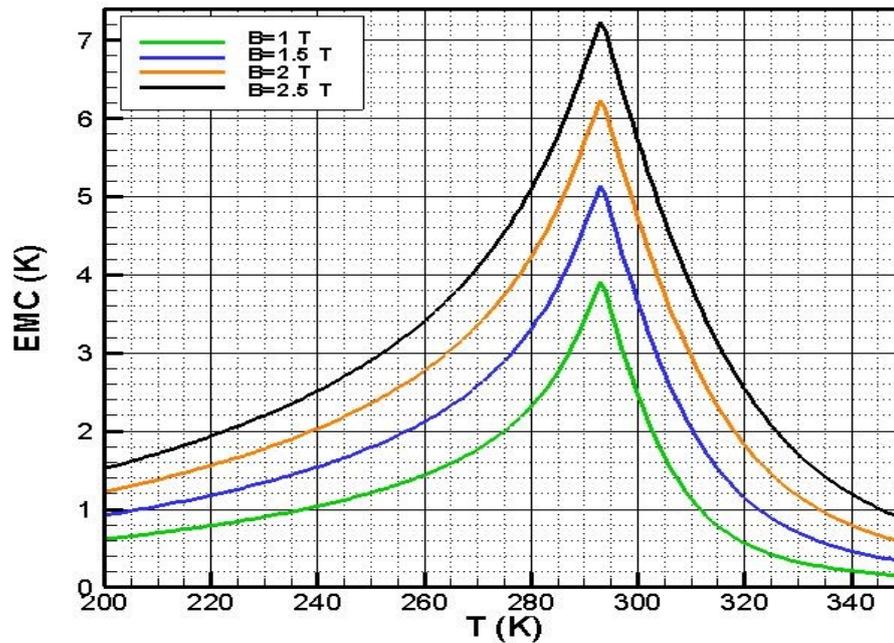


Figure V.5 : Variation de l'EMC en fonction de T pour différents B

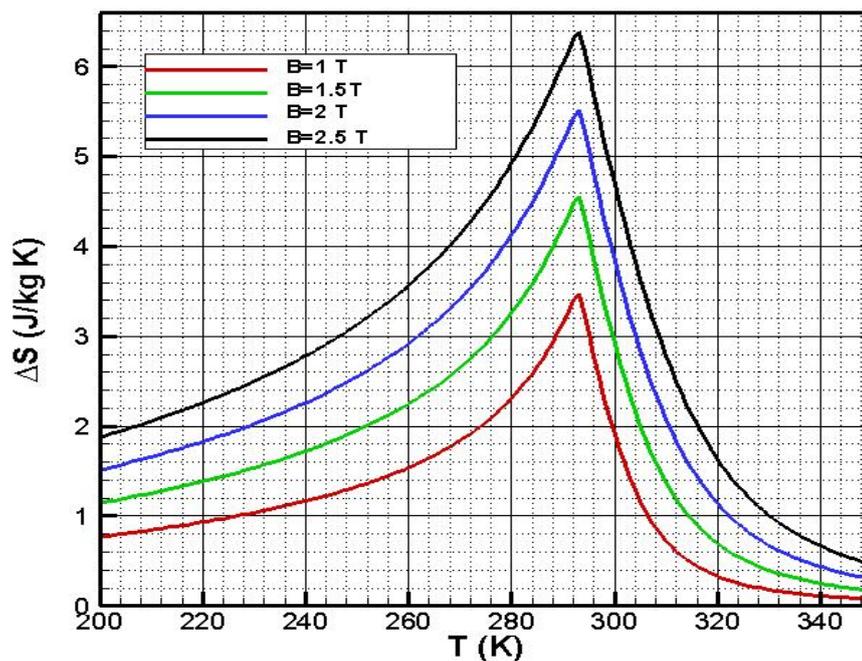


Figure V.6 : Variation de S en fonction de T pour différents B

Les courbes représentées sur les figures V.5 et V.6 montrent l'effet magnétocalorique et la variation d'entropie prédites à l'aide de la théorie du champ moléculaire (MFT) décrite dans le 2nd Chapitre pour un matériau magnétocalorique (Gd), en fonction de la température et des différentes valeurs de champ magnétique.

Ces graphes présentent une transition de phase de l'état ferromagnétique vers l'état paramagnétique au voisinage du point de Curie $T_C=294\text{K}$, avec une évolution proportionnelle suivant l'accroissement du champ magnétique appliqué. Ainsi, ces résultats théoriques sont en très bon accord avec les valeurs rapportées dans la littérature, où la variation de la température adiabatique et la chaleur spécifique dans les mêmes conditions du champ magnétique prennent les mêmes valeurs à $T_C=294\text{K}$

V.3 ETUDE DU CYCLE DE BRAYTON :

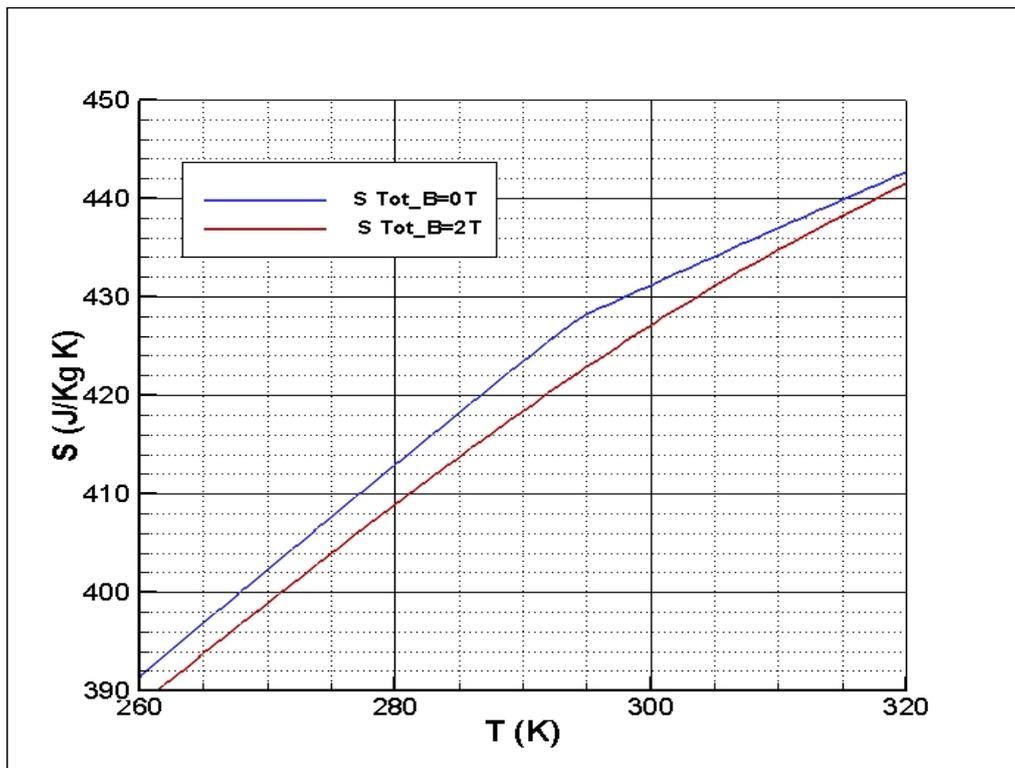


Figure V.7: Evolution de l'entropie totale du Gd en fonction de la température

La figure V.7 montre l'évolution de l'entropie totale du Gd en fonction de la température. L'évolution de l'entropie totale est directement proportionnelle à la température, elle tend à augmenter avec l'augmentation de cette dernière pour différentes valeurs de l'induction B (Dans notre cas 0 et 2 Tesla). L'évolution des deux courbes est linéaire sauf que pour un champ magnétique nul on constate une flexion au voisinage de la température de Curie (294K) où $S_{\text{Tot}} = 428\text{ J/Kg.K}$ avant que la courbe ne continue son chemin linéaire. D'une autre part, elle montre aussi que la variation d'entropie liée à l'application d'un champ magnétique est un phénomène très faible comparée à la variation totale d'entropie.

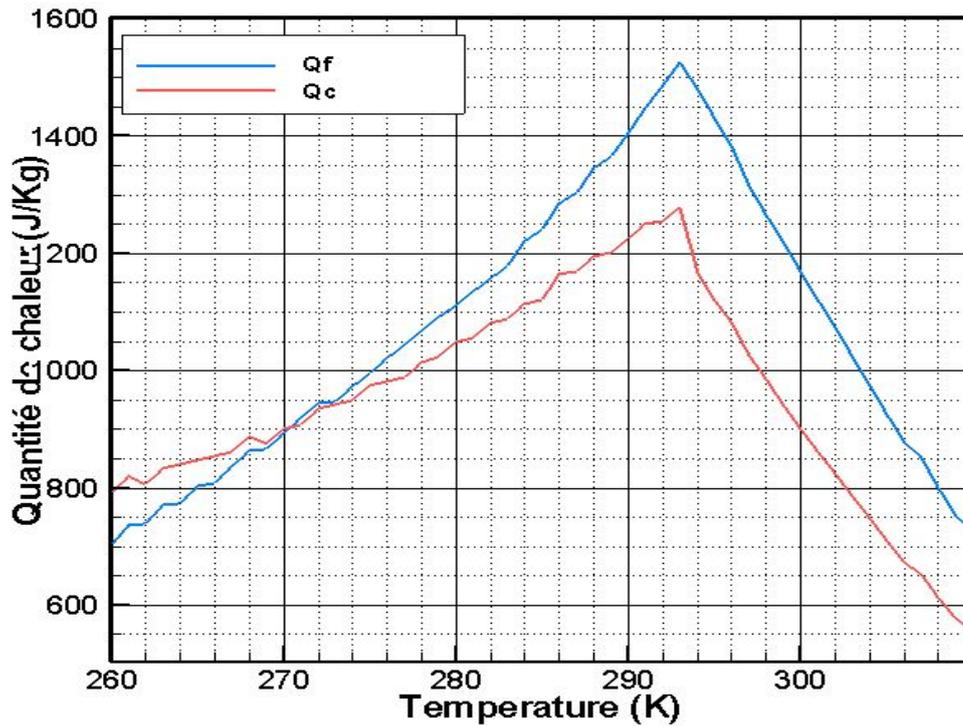


Figure V.8 : Variation de la quantité de chaleur dégagée et absorbée au niveau des sources chaude et froide

La figure V.8 montre l'évolution de la variation de la quantité de chaleur dégagée et absorbée au niveau des deux sources chaude et froide.

On constate un point d'inversion à la température de 271K où la machine est à l'arrêt, avant, elle joue le rôle d'une pompe à chaleur or, après la quantité froide est supérieure à celle chaude ce qui démontre l'efficacité du prototype où la quantité de la chaleur froide et chaude atteignent les piques de 1.5 KJ/Kg et 1.275 KJ/Kg respectivement à la température de Curie (294K).

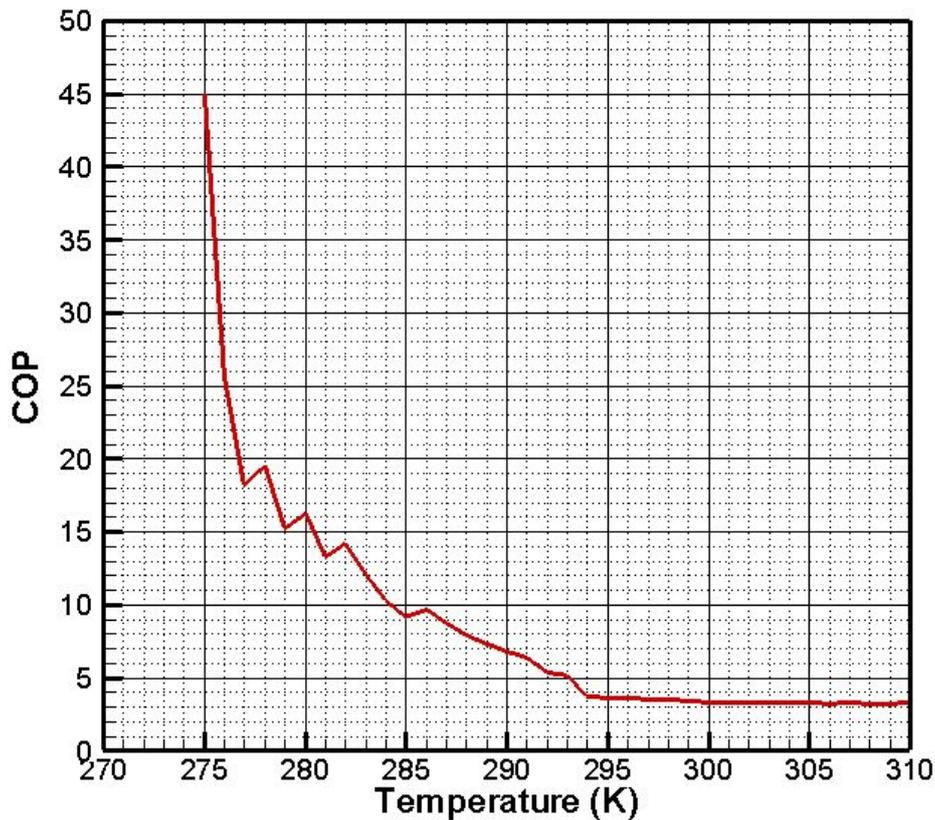


Figure V.9 : Evolution de coefficient de performance en fonction de la température

La figure V.9 montre l'évolution du COP en fonction de la température, le COP est inversement proportionnel à la température, ce qui cause une diminution du COP avec l'augmentation de la température ; néanmoins ; du point de vue numérique on a un problème d'instabilité numérique ce qui est l'objet d'une autre étude de schéma plus adaptée au problème étudié, les équations utilisées sont couplés entre elles ce qui cause une difficulté de discrétisation du système d'équations.

Le COP diminue de 45 à 18 pour une augmentation de la température de 275 K à 277 K, puis au-delà de 277 K à 294 K on aura des fluctuations à cause de l'instabilité numérique mentionnée ci-dessus, à partir de 294 K le COP tend à se stabiliser vers une valeur de 4.

V.4 CONCLUSION

Les résultats obtenus dans ce chapitre nous ont permis de mettre en relief le potentiel de la réfrigération magnétique.

Grâce au logiciel FEMM 4.2, on a pu concevoir un dispositif à aimant permanent qui nous a permis de bien comprendre l'importance du choix de la source de champ.

A l'aide d'un code de calcul qui s'appuie sur la théorie du champ moléculaire, on a pu avoir les graphes du C_p , ΔS , EMC en fonction de la température. A l'aide du même code de calcul on a pu étudier le cycle de Brayton et avoir ainsi la charge frigorifique produite par le prototype pour aboutir à la fin, au COP en fonction de la température.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

S'il existe bien une multitude de moyen de production de froid, la consommation énergétique ou bien l'impact des fluides utilisés sur l'environnement reste les points sombres de tous les systèmes de réfrigération utilisés jusqu'aujourd'hui.

Des recherches ont été entreprises afin d'y remédier à ces problèmes, et parmi les alternatives à ces techniques conventionnelles, la réfrigération magnétique est considérée comme l'une des technologies les plus prometteuses dans le secteur.

A la lumière de cette étude, on a pu voir la faisabilité de la réfrigération magnétique autour de la température ambiante démontré par Zimm (1998) qui a laissé entrevoir de réelles applications potentielles vu son efficacité remarquable et qui offre de nombreux avantages, qui pourrait concurrencer les autres systèmes de réfrigération conventionnelles.

Le froid magnétique présente de véritables avantages potentiels vis-à-vis des machines conventionnelles parmi eux on peut citer:

- Technologie « verte », sans recours aux frigorigènes conventionnels.
- Technologie insonore (sans compresseur). Ceci est appréciable dans les applications médicales, par exemple.
- Efficacité énergétique plus élevées. Des cycles thermodynamiques proches des procédés de Carnot sont réalisables grâce à la réversibilité de l'EMC.
- Conception simple des machines.
- Coûts de maintenance faibles.
- Basse pression (atmosphérique). Ceci constitue un avantage pour certaines applications telles que le conditionnement d'air fixe et automobile.

En revanche, il existe des inconvénients :

- Des matériaux à EMCG (Effet Magnétocalorique Géant) doivent être développés pour permettre des fréquences plus élevées dans les réfrigérateurs magnétiques rectilignes ou rotatifs.
- Nécessité de protéger les composants électroniques des champs magnétiques. Mais il faut préciser qu'ils sont statiques, de faible portée et qu'ils peuvent être blindés.
- Les aimants permanents ont une force de champ limitée. Les aimants et les électroaimants supraconducteurs sont (trop) onéreux.
- Les changements de température sont limités. Les systèmes multiétages perdent de l'efficacité à cause du transfert de chaleur entre les étages.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

- Les machines mobiles nécessitent une grande précision afin d'éviter une réduction du champ magnétique causée par les écarts entre les aimants et le matériau magnétocalorique.

Dans l'optique de ce travail une présentation globale de cette technologie et revue des travaux antérieurs réalisés par quelques instituts et centres de recherche ont été résumés.

Après un bref aperçu sur les machines frigorifiques classiques, nous nous sommes penchés sur la présentation de la réfrigération magnétique.

Nous nous sommes intéressés à l'aspect thermodynamique et au principe de la technique, et nous avons fait une revue sur les principaux prototypes réalisés pour le moment ; nous avons présenté par la suite la composition, le fonctionnement et les différents cycles qui régissent les systèmes. Nous avons vu quelques notions de base sur le magnétisme, les différents matériaux et moyen de génération de champs magnétique nécessaire pour la poursuite du projet.

Nous avons aussi développé un code de calcul basé sur la théorie du champ moléculaire de Pierre WEISS afin de déterminer les différents paramètres (C_p , EMC, $\Delta S...$) nécessaire au calcul du coefficient de performance ainsi que le rendement d'un prototype.

En conclusion, le froid magnétique est sans aucun doute une technologie prometteuse qui doit être encouragée en raison de ses nombreux avantages, notamment en termes d'économies d'énergie et d'impact sur l'environnement. Désormais, des prototypes efficaces pour des applications spécifiques doivent être développés afin d'entrer dans la phase de commercialisation de nouveaux réfrigérateurs magnétiques.

Comme déjà signalé dans l'interprétation du COP, on peut tirer des perspectives pour une autre étude de l'instabilité numérique de l'algorithme utilisé, afin d'avoir des résultats plus adéquats avec l'expérimentale

ANNEXES

ANNEXE A : NOMENCLATURE DES PRINCIPAUX FLUIDES FRIGORIGENES, d'après [Meunier et al. 2005].

Fluide	Nom commun / Composition massique
CFC	-
R-11	trichlorofluorométhane
R-12	dichlorofluorométhane
R-13	chlorotrifluorométhane
R-502	R-22/R-115 (48,8/51,2)
R-503	R-13/R-23 (59,9/40,1)
HCFC	-
R-22	chlorodifluorométhane
HFC	-
R-23	trifluorométhane
R-32	difluorométhane
R-125	pentafluoroéthane
R-134a	1,1,1,2-tétrafluoroéthane
R-152a	1,1-difluoroéthane
R-404A	R-125/R-143a/R-134a (44/52/4)
R-407C	R-32/R-125/R-134a (23/25/52)
R-410A	R-32/R-125 (50/50)
R-413A	R-600a/R-218/R-134a (3/9/88)
R-417A	R-600/R-125/R-134a (3,4/46,6/50)
R-507	R125/R-143a (50/50)
R-508A	R-23/R-116 (39/61)
R-508B	R-23/R-116 (46/54)
Iscéon 89	R-125/R-218/R-290 (86/9/5)
HC	-
R-290	propane
R-600	butane
R-600a	isobutane
R-1150	éthylène
Naturels	-
R717	ammoniac
R718	eau
R744	dioxyde de carbone

ANNEXE B : AUTRES MODES DE REFRIGERATION

Réfrigération thermoélectrique :

La réfrigération thermoélectrique est basée sur l'effet Peltier : lorsqu'un courant passe à travers les jonctions entre deux matériaux de nature différente, il apparaît une différence de température entre ces deux jonctions. Un réfrigérateur thermoélectrique est constitué de l'association en série et en parallèle de modules élémentaires comme celui représenté sur la Figure B.1. Un élément thermoélectrique est constitué d'un matériau semi-conducteur dopé P et d'un matériau semi-conducteur dopé N, connectés électriquement en série et thermiquement en parallèle

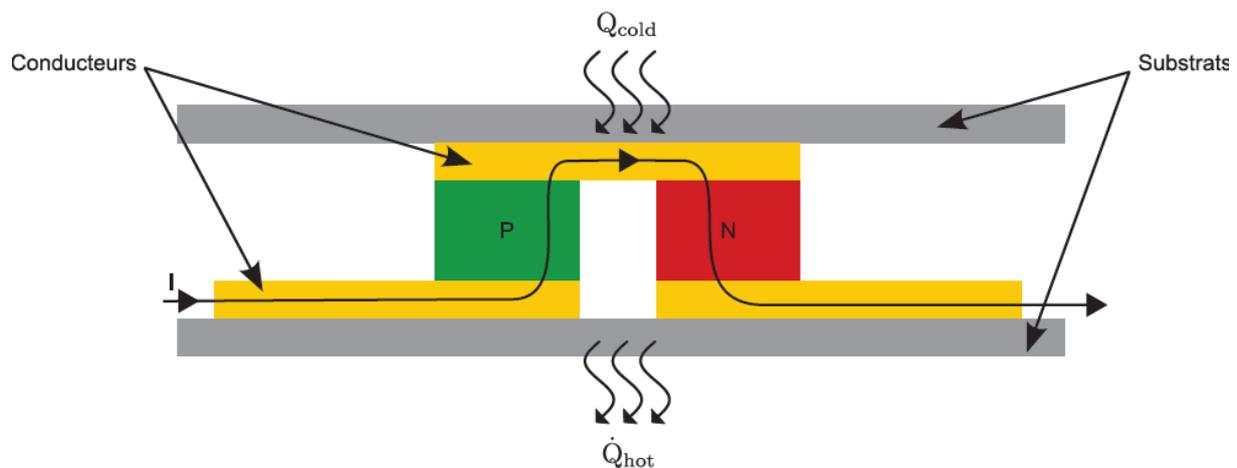


Fig. B.1 – Représentation d'un élément thermoélectrique.

L'avantage principal est que ce type de machine fonctionne sans fluide et est donc très facile de commande et de régulation. Cependant, le coefficient de performance de ce système est très faible, en comparaison avec les systèmes conventionnels. Actuellement, les meilleurs matériaux thermoélectriques permettent d'atteindre un COP = 0,66 au voisinage de la température ambiante

Une équipe de chercheurs a mis au point une matrice de silicium enrichie d'un réseau de nano plots de germanium. Ce matériau possède la conductivité électrique du silicium mais sa conductivité thermique est 100 fois plus faible.

Réfrigération thermoacoustique :

La réfrigération thermoacoustique est basée sur l'effet thermoacoustique. Cet effet résulte de l'interaction d'une onde acoustique intense avec une paroi et se traduit par un transport de chaleur dans la couche limite thermique parallèlement à la paroi.

La Figure B.2 présente le schéma de principe d'un réfrigérateur thermoacoustique. Un tube fermé est excité par un haut-parleur émettant une fréquence qui coïncide avec la première fréquence de résonance du tube. Le fluide remplissant le tube (hélium, argon, . . .) est ainsi soumis à une onde acoustique stationnaire très intense. Les particules de fluide subissent alors

des cycles de compression/détente, accompagnés d'un mouvement oscillatoire. Les fluctuations de température adiabatiques résultantes sont de faible amplitude, mais l'empilement de plaques permet de transporter la chaleur d'une de ses extrémités à l'autre et de créer ainsi une différence de température significative [Duffourd, 2001].

Le principal inconvénient de cette technologie, pour des applications domestiques, reste la pollution sonore. En effet, avec un fonctionnement sous une pression de 20 bars, un dispositif génère environ 180 décibels (sachant que le seuil de la douleur est de 130 dB).

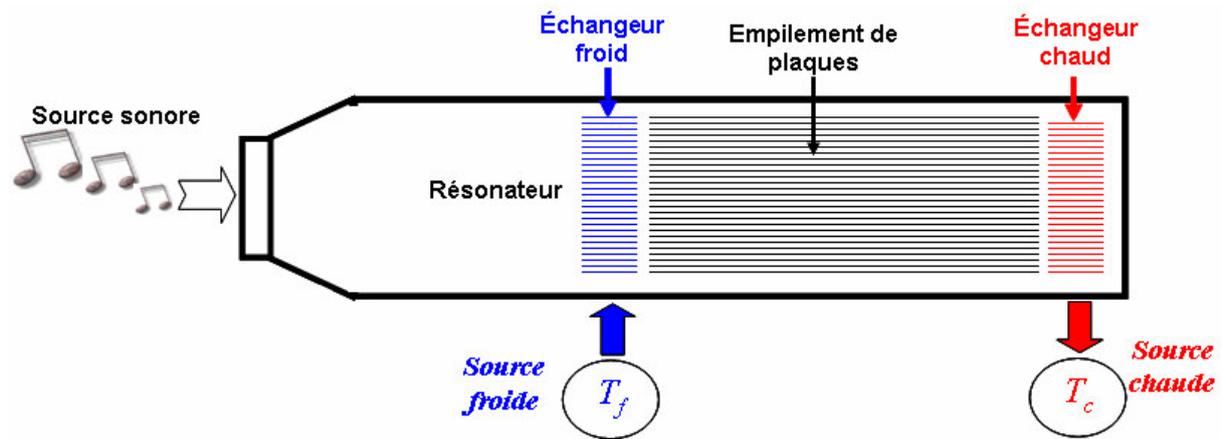


Fig. B.2 – Schéma d'un réfrigérateur thermo acoustique.

Réfrigération barocalorique :

Récemment, un effet barocalorique géant a été découvert dans l'alliage NiMnIn [Manosa et al., 2010]. Manosa et al. ont obtenu un effet barocalorique de $24,4 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ sous l'application d'une pression hydrostatique de 2,6 kbar. Dans le NiMnIn, cette variation d'entropie se traduit par une élévation adiabatique de température $\Delta T_{ad} \simeq 4,5\text{K}$, qui est comparable à l'effet magnétocalorique obtenu pour des champs de l'ordre du Tesla. Cet effet pourrait donc être utilisé dans des systèmes de réfrigération.

ANNEXE C : RESULTATS NUMERIQUES

Le code de calcul Fortran nous ont permis d'avoir pour différentes valeurs d'induction B, les valeurs des Cp, ΔS et l'EMC ci-dessous pour une plage de température comprise entre 200K et 300K avec lesquelles on a pu tracer les graphes du chapitre V :

T	B=0 T			B=1 T			B=1.5 T			B=2 T			B=2.5 T		
	Cp	Cp	ΔS	EMC	Cp	ΔS	EMC	Cp	ΔS	EMC	Cp	ΔS	EMC		
200	250.1325	249.1714	0.7693	0.6175	248.0903	1.1439	0.9212	247.7148	1.5126	1.2213	247.1061	1.8756	1.5180		
201	250.7030	249.5699	0.7755	0.6246	248.6249	1.1544	0.9317	248.2391	1.5263	1.2358	247.6152	1.8923	1.5360		
202	251.2199	250.0582	0.7827	0.6323	249.2664	1.1642	0.9430	248.7060	1.5401	1.2509	248.0704	1.9092	1.5546		
203	251.7905	250.6080	0.7900	0.6399	249.6486	1.1748	0.9543	249.3959	1.5533	1.2643	248.5870	1.9263	1.5731		
204	252.3313	251.1176	0.7973	0.6477	250.1541	1.1856	0.9659	249.7347	1.5674	1.2804	249.2291	1.9437	1.5910		
205	252.8790	251.6425	0.8047	0.6556	250.6563	1.1965	0.9776	250.2304	1.5817	1.2958	249.5605	1.9604	1.6104		
206	253.6313	252.1656	0.8133	0.6644	251.1674	1.2086	0.9902	250.7316	1.5971	1.3122	250.0558	1.9792	1.6305		
207	253.9928	252.6780	0.8211	0.6726	251.6653	1.2200	1.0024	251.2169	1.6119	1.3282	250.5278	1.9972	1.6502		
208	254.5743	253.4223	0.8289	0.6804	252.2028	1.2315	1.0145	251.7457	1.6269	1.3442	251.0445	2.0156	1.6700		
209	255.1148	253.7622	0.8360	0.6885	252.6976	1.2432	1.0271	252.2273	1.6421	1.3607	251.5176	2.0341	1.6903		
210	255.6621	254.2748	0.8440	0.6970	253.3902	1.2541	1.0382	252.7070	1.6575	1.3774	251.9889	2.0530	1.7109		
211	256.1988	254.7845	0.8521	0.7057	253.7072	1.2660	1.0518	253.3888	1.6732	1.3933	252.4570	2.0721	1.7318		
212	256.7690	255.3185	0.8614	0.7152	254.2295	1.2791	1.0655	253.7178	1.6890	1.4113	252.9503	2.0924	1.7537		
213	257.5329	255.8216	0.8699	0.7243	254.7149	1.2915	1.0788	254.1901	1.7051	1.4288	253.6143	2.1112	1.7731		
214	257.9241	256.3779	0.8785	0.7333	255.2593	1.3041	1.0921	254.7179	1.7215	1.4463	253.9483	2.1312	1.7959		
215	258.4541	257.0940	0.8873	0.7420	255.7312	1.3168	1.1059	255.1794	1.7381	1.4644	254.3945	2.1514	1.8182		
216	258.9935	257.4107	0.8951	0.7511	256.2251	1.3298	1.1198	255.6617	1.7549	1.4827	254.8601	2.1719	1.8407		
217	259.5759	257.9486	0.9040	0.7605	256.9607	1.3420	1.1320	256.1665	1.7720	1.5011	255.3532	2.1927	1.8634		
218	260.3349	258.4355	0.9142	0.7712	257.2402	1.3563	1.1482	256.8425	1.7904	1.5197	255.7950	2.2149	1.8877		
219	260.7345	259.0024	0.9236	0.7809	257.7839	1.3699	1.1625	257.1759	1.8071	1.5388	256.3073	2.2365	1.9110		
220	261.2403	259.4648	0.9331	0.7912	258.2294	1.3837	1.1776	257.6046	1.8250	1.5586	256.9564	2.2574	1.9327		
221	261.8011	260.2280	0.9428	0.8007	258.7336	1.3978	1.1927	258.0895	1.8432	1.5783	257.2169	2.2795	1.9585		
222	262.3943	260.5586	0.9515	0.8107	259.2604	1.4121	1.2078	258.5979	1.8617	1.5982	257.7173	2.3019	1.9829		
223	262.9137	261.0347	0.9625	0.8222	259.7155	1.4266	1.2224	259.0367	1.8816	1.6198	258.1332	2.3259	2.0093		
224	263.7741	261.5562	0.9727	0.8330	260.4867	1.4414	1.2393	259.5193	1.9008	1.6406	258.6023	2.3491	2.0348		
225	264.0632	262.0569	0.9830	0.8440	260.7202	1.4564	1.2555	260.2501	1.9192	1.6592	259.0474	2.3728	2.0609		
226	264.6227	262.8153	0.9936	0.8544	261.2030	1.4717	1.2720	260.4651	1.9389	1.6823	259.7416	2.3969	2.0855		
227	265.1794	263.1053	1.0031	0.8655	261.6949	1.4872	1.2887	260.9488	1.9589	1.7041	259.9739	2.4201	2.1131		
228	266.0481	263.6218	1.0152	0.8780	262.1966	1.5043	1.3054	261.4197	1.9806	1.7274	260.4350	2.4461	2.1414		
229	266.3533	264.1298	1.0264	0.8899	262.9523	1.5194	1.3230	261.8847	2.0015	1.7502	260.8748	2.4713	2.1694		
230	266.8935	264.6084	1.0378	0.9020	263.1674	1.5358	1.3408	262.5910	2.0228	1.7717	261.2931	2.4970	2.1980		
231	267.4632	265.4053	1.0493	0.9133	263.6522	1.5525	1.3588	262.8150	2.0431	1.7958	261.7430	2.5231	2.2268		
232	268.3031	265.6340	1.0611	0.9268	264.1049	1.5708	1.3785	263.2411	2.0663	1.8211	262.4322	2.5498	2.2542		
233	268.6089	266.1350	1.0732	0.9396	264.5809	1.5883	1.3957	263.6978	2.0887	1.8456	262.6165	2.5769	2.2863		
234	269.1724	266.6361	1.0855	0.9526	265.3616	1.6048	1.4151	264.1444	2.1116	1.8706	263.0443	2.6044	2.3168		
235	269.7237	267.4088	1.0980	0.9649	265.5440	1.6228	1.4347	264.8721	2.1336	1.8930	263.4532	2.6324	2.3481		
236	270.6172	267.6349	1.1109	0.9796	266.0026	1.6426	1.4559	265.0474	2.1586	1.9220	263.8661	2.6623	2.3812		
237	270.8853	268.1240	1.1240	0.9935	266.4657	1.6615	1.4746	265.4780	2.1827	1.9486	264.5840	2.6903	2.4098		
238	271.4248	268.5831	1.1373	1.0078	267.2077	1.6794	1.4959	265.8840	2.2073	1.9758	264.6956	2.7198	2.4455		
239	272.3550	269.4256	1.1524	1.0223	267.4161	1.7004	1.5182	266.6498	2.2339	2.0022	265.1356	2.7514	2.4802		
240	272.5961	269.5863	1.1651	1.0372	267.8348	1.7205	1.5402	266.7596	2.2583	2.0317	265.4927	2.7822	2.5151		
241	273.1775	270.0743	1.1793	1.0524	268.2938	1.7410	1.5605	267.1918	2.2844	2.0604	266.2095	2.8137	2.5472		
242	274.0126	270.4805	1.1954	1.0695	269.0029	1.7620	1.5853	267.5332	2.3125	2.0918	266.2557	2.8458	2.5866		
243	274.3482	271.3857	1.2091	1.0826	269.2085	1.7834	1.6082	268.3331	2.3399	2.1190	266.7094	2.8785	2.6226		
244	274.8977	271.5124	1.2243	1.1002	269.6302	1.8053	1.6322	268.4310	2.3664	2.1510	267.0659	2.9118	2.6603		
245	275.7383	271.8721	1.2415	1.1188	269.9611	1.8278	1.6551	268.7245	2.3963	2.1847	267.3345	2.9474	2.7011		
246	276.0189	272.7442	1.2563	1.1331	270.7919	1.8507	1.6818	269.1594	2.4254	2.2167	268.0984	2.9808	2.7351		
247	276.9464	272.8702	1.2741	1.1533	270.8880	1.8756	1.7088	269.8904	2.4567	2.2483	268.1335	3.0177	2.7799		
248	277.1861	273.2940	1.2911	1.1716	271.2748	1.8998	1.7330	269.9316	2.4858	2.2838	268.4583	3.0541	2.8213		
249	277.7425	274.1298	1.3086	1.1886	272.0494	1.9244	1.7620	270.2986	2.5184	2.3199	269.1460	3.0926	2.8612		
250	278.6586	274.1662	1.3265	1.2095	272.0679	1.9497	1.7902	270.9529	2.5504	2.3532	269.1184	3.1292	2.9069		
251	278.9156	275.0067	1.3463	1.2288	272.5060	1.9757	1.8159	271.0334	2.5831	2.3922	269.4813	3.1694	2.9521		
252	279.8264	275.0370	1.3638	1.2495	273.2075	2.0023	1.8479	271.3157	2.6166	2.4303	269.7268	3.2092	2.9983		
253	280.0362	275.4537	1.3846	1.2718	273.2466	2.0311	1.8793	272.0035	2.6524	2.4671	270.4145	3.2499	3.0406		
254	280.9837	276.2416	1.4032	1.2902	273.5655	2.0578	1.9064	271.9740	2.6862	2.5087	270.3323	3.2915	3.0926		
255	281.5352	276.2371	1.4253	1.3157	274.3077	2.0881	1.9425	272.2470	2.7238	2.5512	270.5772	3.3355	3.1435		
256	281.7510	277.0250	1.4450	1.3354	274.2744	2.1177	1.9727	272.9135	2.7609	2.5898	271.2200	3.3777	3.1882		
257	282.7509	277.0658	1.4684	1.3621	275.0328	2.1483	2.0088	272.8852	2.7989	2.6360	271.1508	3.4239	3.2452		
258	282.8766	277.7693	1.4910	1.3849	274.9278	2.1812	2.0430	273.0803	2.8395	2.6827	271.3141	3.4713	3.3009		
259	283.8868	277.7699	1.5143	1.4119	275.6335	2.2120	2.0800	273.7581	2.8782	2.7230	271.9614	3.5168	3.3492		
260	284.4037	278.4633	1.5384	1.4364	275.5121	2.2468	2.1194	273.5595	2.9209	2.7761	271.7385	3.5665	3.4125		
261	284.9820	278.4007	1.5648	1.4670	276.1703	2.2812	2.1547	274.1661	2.9649	2.8225	272.2985	3.6176	3.4675		
262	285.1824	279.1475	1.5906	1.4929	276.0919	2.3181	2.1991	274.0198	3.0085	2.8765	272.1402	3.6684	3.5317		

T	B=0 T		B=1 T		B=1.5 T			B=2 T			B=2.5 T		
	Cp	Cp	ΔS	EMC									
263	286.1216	279.3918	1.6188	1.5238	276.6608	2.3547	2.2374	274.5321	3.0550	2.9266	272.2300	3.7221	3.5959
264	286.7589	279.3509	1.6464	1.5559	276.5983	2.3939	2.2812	274.3972	3.1012	2.9837	272.8209	3.7758	3.6537
265	287.2525	279.9309	1.6751	1.5858	277.0953	2.4329	2.3294	274.8233	3.1504	3.0378	272.4619	3.8323	3.7274
266	287.8479	280.1955	1.7064	1.6199	276.9446	2.4748	2.3735	274.6098	3.1996	3.0993	272.9746	3.8906	3.7912
267	288.3831	279.9822	1.7373	1.6567	277.4551	2.5165	2.4251	275.0404	3.2518	3.1567	272.6174	3.9489	3.8675
268	288.9986	280.6369	1.7695	1.6898	277.2482	2.5597	2.4708	274.7878	3.3041	3.2225	273.0947	4.0104	3.9356
269	289.8697	280.6955	1.8029	1.7278	277.6637	2.6060	2.5251	275.1072	3.3596	3.2851	272.6235	4.0722	4.0180
270	290.1013	280.8943	1.8408	1.7694	277.8204	2.6539	2.5836	274.7998	3.4169	3.3572	273.0646	4.1388	4.0923
271	290.9787	280.9256	1.8772	1.8108	277.4012	2.7021	2.6368	275.1114	3.4746	3.4227	272.5664	4.2043	4.1802
272	291.1582	280.9973	1.9166	1.8553	277.8446	2.7551	2.6986	274.6527	3.5372	3.5030	272.8948	4.2749	4.2609
273	292.0968	281.0155	1.9563	1.9005	277.8122	2.8070	2.7641	274.9810	3.5989	3.5729	272.3957	4.3445	4.3542
274	292.6211	280.9863	1.9993	1.9496	277.7349	2.8625	2.8260	274.8298	3.6657	3.6546	272.6245	4.4194	4.4417
275	293.1499	280.8926	2.0443	2.0014	277.2339	2.9202	2.8952	274.2292	3.7332	3.7437	272.0292	4.4949	4.5440
276	293.6628	280.7489	2.0928	2.0574	277.4776	2.9816	2.9692	274.4116	3.8046	3.8266	272.2019	4.5743	4.6381
277	294.1541	280.5209	2.1421	2.1152	277.2474	3.0455	3.0470	274.1002	3.8785	3.9196	271.4837	4.6562	4.7508
278	295.0443	280.2773	2.1953	2.1775	277.0059	3.1119	3.1280	273.7911	3.9549	4.0157	271.6144	4.7405	4.8519
279	295.4831	279.8856	2.2496	2.2425	276.6409	3.1810	3.2139	272.9744	4.0340	4.1230	271.1949	4.8289	4.9679
280	295.9317	279.8360	2.3094	2.3108	276.2430	3.2543	3.3055	272.9153	4.1172	4.2240	270.3539	4.9198	5.0953
281	296.7572	278.9373	2.3723	2.3898	275.8102	3.3306	3.4014	272.4187	4.2032	4.3356	270.3226	5.0135	5.2115
282	297.0663	278.6144	2.4369	2.4665	275.1814	3.4100	3.5039	271.7574	4.2937	4.4556	269.6984	5.1114	5.3446
283	297.8519	277.5361	2.5075	2.5568	274.6277	3.4939	3.6112	271.1757	4.3870	4.5783	268.7656	5.2119	5.4879
284	298.3872	276.9539	2.5827	2.6484	273.8146	3.5821	3.7277	270.3484	4.4858	4.7123	268.4456	5.3176	5.6257
285	298.6309	275.9382	2.6615	2.7489	273.0577	3.6750	3.8505	269.5778	4.5874	4.8498	267.7479	5.4259	5.7755
286	299.6485	274.6966	2.7463	2.8593	272.4672	3.7733	3.9773	268.2339	4.6940	5.0049	266.8945	5.5401	5.9367
287	299.9034	272.9723	2.8391	2.9850	271.0511	3.8776	4.1248	267.6482	4.8061	5.1536	265.6503	5.6579	6.1126
288	300.3931	271.7052	2.9356	3.1117	269.8239	3.9847	4.2755	266.4779	4.9216	5.3191	265.0504	5.7788	6.2792
289	300.7564	270.2436	3.0397	3.2507	268.5081	4.0996	4.4317	265.2685	5.0428	5.4940	264.0151	5.9047	6.4635
290	300.8917	267.8493	3.1496	3.4101	267.4607	4.2201	4.6115	263.9704	5.1687	5.6784	262.8888	6.0360	6.6585
291	301.1100	265.5558	3.2667	3.5797	265.4744	4.3435	4.7948	262.5296	5.2978	5.8723	261.6706	6.1684	6.8597
292	300.2045	263.0168	3.3849	3.7579	264.0846	4.4673	4.9775	260.9983	5.4247	6.0691	260.0263	6.2978	7.0722
293	295.8431	260.1088	3.4684	3.9070	261.7602	4.5529	5.1395	259.2651	5.5132	6.2306	258.9590	6.3878	7.2275
294	254.6866	257.3283	3.3016	3.7721	259.6834	4.3865	5.0048	257.8677	5.3470	6.0963	257.5105	6.2222	7.1039
295	184.1707	253.6270	3.0396	3.5355	257.7726	4.1229	4.7716	255.6053	5.0820	5.8653	255.9494	5.9579	6.8669
296	177.4026	249.9306	2.7863	3.2999	254.9760	3.8624	4.5318	253.5626	4.8193	5.6259	254.2602	5.6934	6.6280
297	176.9491	246.0410	2.5461	3.0735	252.7242	3.6124	4.2938	251.4389	4.5639	5.3909	252.1821	5.4350	6.4009
298	176.8322	241.6417	2.3202	2.8614	249.5969	3.3727	4.0754	248.8172	4.3168	5.1700	250.6780	5.1835	6.1620
299	176.9695	237.7667	2.1101	2.6536	246.7928	3.1429	3.8566	246.8951	4.0783	4.9390	248.8276	4.9405	5.9367
300	176.9694	233.1387	1.9144	2.4634	243.7169	2.9254	3.6492	244.4225	3.8489	4.7241	246.7988	4.7039	5.7178
301	177.0372	228.8037	1.7348	2.2822	240.5881	2.7195	3.4499	241.8840	3.6288	4.5157	244.3888	4.4750	5.5116
302	177.2025	224.6292	1.5703	2.1112	237.4754	2.5252	3.2575	239.3819	3.4191	4.3135	242.6912	4.2541	5.2937
303	177.2025	220.4183	1.4213	1.9539	234.1522	2.3426	3.0759	236.6959	3.2180	4.1194	240.1156	4.0423	5.1010
304	177.3222	216.2965	1.2856	1.8069	230.9218	2.1725	2.9055	233.7913	3.0264	3.9352	238.3044	3.8377	4.8956
305	177.3904	212.5950	1.1639	1.6698	227.6722	2.0129	2.7363	231.4145	2.8455	3.7503	236.0425	3.6423	4.7064
306	177.4536	208.9239	1.0552	1.5456	224.1790	1.8654	2.5836	228.4334	2.6731	3.5808	233.4260	3.4542	4.5281
307	177.5642	206.0150	0.9573	1.4265	221.1154	1.7285	2.4345	225.8531	2.5112	3.4135	231.2088	3.2753	4.3490
308	177.6474	202.9929	0.8702	1.3204	218.1001	1.6020	2.2939	223.5616	2.3576	3.2481	229.2753	3.1037	4.1694
309	177.7464	200.4086	0.7925	1.2220	215.2334	1.4853	2.1611	220.7437	2.2140	3.0992	226.7125	2.9412	4.0087
310	177.8487	198.1346	0.7232	1.1316	212.5081	1.3778	2.0360	218.3096	2.0792	2.9525	224.5237	2.7866	3.8475
311	177.8699	195.9061	0.6614	1.0499	209.8603	1.2790	1.9187	215.8968	1.9528	2.8130	222.3047	2.6400	3.6932
312	177.9994	194.2731	0.6062	0.9735	207.4849	1.1890	1.8105	213.6724	1.8346	2.6788	220.4762	2.5000	3.5378
313	178.0951	192.7056	0.5568	0.9044	205.0362	1.1058	1.7047	211.4977	1.7241	2.5515	218.1370	2.3684	3.3984
314	178.1307	191.1125	0.5131	0.8431	203.1208	1.0301	1.6101	209.4078	1.6210	2.4306	216.0835	2.2441	3.2609
315	178.2740	190.0909	0.4735	0.7847	201.0743	0.9602	1.5185	207.2811	1.5248	2.3173	214.2077	2.1266	3.1273
316	178.3386	188.9860	0.4384	0.7330	199.2803	0.8966	1.4329	205.6549	1.4360	2.2064	212.0546	2.0158	3.0040
317	178.3831	187.8934	0.4064	0.6856	197.8237	0.8384	1.3555	203.9026	1.3525	2.1027	210.5228	1.9122	2.8794
318	178.5178	187.2267	0.3776	0.6413	196.2349	0.7850	1.2816	202.1274	1.2755	2.0068	208.8418	1.8139	2.7620
319	178.5815	186.4901	0.3519	0.6019	194.8777	0.7355	1.2120	200.8215	1.2033	1.9113	207.2198	1.7214	2.6499
320	178.6593	185.7335	0.3283	0.5656	193.6577	0.6904	1.1480	199.2156	1.1366	1.8258	205.6496	1.6344	2.5431
321	178.7805	185.3351	0.3068	0.5314	192.6245	0.6491	1.0879	198.1691	1.0740	1.7397	204.0187	1.5525	2.4427
322	178.8073	184.8054	0.2874	0.5007	191.7400	0.6110	1.0316	196.7366	1.0163	1.6634	202.8353	1.4763	2.3436
323	178.9196	184.3983	0.2699	0.4728	190.7034	0.5760	0.9802	195.8290	0.9620	1.5868	201.5502	1.4040	2.2500
324	179.0090	184.0324	0.2537	0.4467	189.9083	0.5436	0.9316	194.6443	0.9120	1.5181	200.1392	1.3360	2.1628
325	179.0489	183.5738	0.2389	0.4229	189.1408	0.5138	0.8864	193.6618	0.8649	1.4514	199.1776	1.2728	2.0768
326	179.1753	183.4218	0.2252	0.4003	188.5260	0.4857	0.8430	193.0260	0.8214	1.3873	197.9449	1.2127	1.9972
327	179.2722	183.2217	0.2127	0.3797	187.9564	0.4602	0.8033	192.1045	0.7809	1.3293	197.2093	1.1568	1.9182
328	179.3183	182.9293	0.2012	0.3608	187.3675	0.4365	0.7666	191.4607	0.7426	1.2721	196.1946	1.1037	1.8452
329	179.4083	182.7595	0.1906	0.3431	187.0464	0.4145	0.7313	190.6535	0.7072	1.2204	195.1700	1.0543	1.7772
330	179.4891	182.6255	0.1808	0.3267	186.4689	0.3941	0.6993	190.0543	0.6737	1.1698	194.5805	1.0073	1.7083
331	179.6266	182.5073	0.1717	0.3114	186.1330	0.3751	0.6687	189.6611	0.6428	1.1217	193.6582	0.9635	1.6468
332	179.6284	182.3166	0.1633	0.2974	185.7027	0.3571	0.6398	188.9273	0.6138	1.0786	193.0695	0.9217	1.5850
333	179.7452	182.3438	0.1555	0.2839	185.4251	0.3406	0.6124	188.5092	0.5862	1.0355	192.3039	0.8824	1.5279

	<i>B=0 T</i>		<i>B=1 T</i>		<i>B=1.5 T</i>			<i>B=2 T</i>			<i>B=2.5 T</i>		
<i>T</i>	<i>C_p</i>	<i>C_p</i>	ΔS	<i>EMC</i>	<i>C_p</i>	ΔS	<i>EMC</i>	<i>C_p</i>	ΔS	<i>EMC</i>	<i>C_p</i>	ΔS	<i>EMC</i>
334	179.8560	182.1895	0.1482	0.2717	185.2932	0.3252	0.5876	188.2394	0.5607	0.9949	191.8873	0.8458	1.4721
335	179.8679	182.0593	0.1414	0.2603	184.8616	0.3104	0.5635	187.6350	0.5364	0.9576	191.0943	0.8107	1.4212
336	180.0472	182.1048	0.1351	0.2493	184.7211	0.2970	0.5410	187.5052	0.5139	0.9209	190.8647	0.7781	1.3698
337	180.0292	181.9303	0.1290	0.2390	184.5204	0.2843	0.5200	186.9210	0.4928	0.8884	190.0817	0.7469	1.3241
338	180.1738	182.0513	0.1235	0.2293	184.3171	0.2725	0.5003	186.8351	0.4724	0.8547	189.8984	0.7178	1.2776
339	180.2228	181.9186	0.1184	0.2206	184.1188	0.2610	0.4809	186.4036	0.4537	0.8251	189.3029	0.6898	1.2353
340	180.3092	181.9018	0.1135	0.2122	184.0846	0.2506	0.4636	186.2802	0.4356	0.7951	189.0807	0.6638	1.1936
341	180.4298	181.9397	0.1088	0.2039	183.8973	0.2404	0.4463	185.9747	0.4189	0.7681	188.7585	0.6387	1.1539
342	180.4308	181.9123	0.1045	0.1965	183.7048	0.2311	0.4305	185.6766	0.4028	0.7419	188.2111	0.6154	1.1182
343	180.5687	181.8983	0.1005	0.1895	183.7523	0.2224	0.4157	185.6778	0.3879	0.7166	188.1072	0.5928	1.0809
344	180.6660	181.9898	0.0965	0.1825	183.5914	0.2139	0.4009	185.3749	0.3734	0.6930	187.7069	0.5718	1.0479
345	180.6905	181.8860	0.0930	0.1764	183.5490	0.2061	0.3878	185.3061	0.3601	0.6704	187.5359	0.5515	1.0145
346	180.8051	181.9424	0.0894	0.1701	183.4197	0.1984	0.3746	185.0782	0.3471	0.6489	187.1967	0.5321	0.9835
347	180.8913	182.0172	0.0863	0.1645	183.4544	0.1915	0.3624	185.0608	0.3351	0.6284	187.1223	0.5141	0.9534
348	180.9335	181.9456	0.0831	0.1589	183.3011	0.1846	0.3508	184.8881	0.3234	0.6087	186.8582	0.4966	0.9249
349	181.0968	182.1208	0.0803	0.1538	183.4245	0.1783	0.3395	184.7834	0.3126	0.5904	186.6617	0.4803	0.8981
350	181.0779	181.9793	0.0776	0.1492	183.2209	0.1722	0.3291	184.6751	0.3020	0.5723	186.4992	0.4645	0.8716

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE :

- [1]: [A. HERPIN] : Le Champ Moléculaire, Journal De Physique Colloque C 1, supplément au *no* 2-3, Tome 32, Février-Mars 1971, page C 1
- [2] : [Brown]: Brown, G. V. (1978). Magnetic heat pumping.
- [3] : [Charlotte MAYER] : Nouveaux matériaux magnétocaloriques pour la réfrigération magnétique. Thèse Ecole Doctorale des Sciences Chimique Université Bordeaux 1 France 2011.
- [4] : [Cédric Dupuis] : Matériaux à effet magnétocalorique géant et systèmes de réfrigération magnétique. Thèse institut polytechnique de Grenoble France 2009.
- [5] : [ENIEM] Données techniques de la société ENIEM, Rapport de présentation de l'entreprise 2005.
- [6] : [Farid ALLAB] : Etude et conception d'un dispositif de réfrigération magnétique basé sur l'effet magnétocalorique géant. Thèse institut polytechnique de Grenoble France 2008.
- [7]: [Gildas Diguët, Guoxing Lin, Jincan Chen]: Performance characteristics of magnetic Brayton refrigeration cycles using Gd, Gd_{0.74}Tb_{0.26} and (Gd_{3.5}Tb_{1.5})Si₄ as the working substance. Publication scientifique.2011
- [8] : [Houssein Rafik El-Hana BOUCHEKARA] : Recherche sur les systèmes de réfrigération magnétique. Modélisation numérique, conception et Optimisation. Thèse Institut Polytechnique de Grenoble France 2008.
- [9] : [Institut International Du Froid] : Aperçu sur l'Histoire de la Production du Froid. France
- [10] : [Julien ROUDAUT] : Modélisation et conception de systèmes de réfrigération magnétique autour de la température ambiante. Thèse Université de Grenoble France 2006.
- [11] : [Kirol et Dacus, 1988] : Kirol, L. D. et Dacus, M. W. (1988). Rotary recuperative magnetic heat pump
- [12] : [Lebouc 2005]: Réfrigération magnétique. Techniques de l'Ingénieurs, 2005.
- [13]: [Okamura 2007] T. Okamura, K. Yamada, N. Hirano, S. Nagaya "Improvement of 100W class room temperature magnetic refrigerator". International Conference on Magnetic Refrigeration at Room Temperature.

- [14] : [Olivier PERROT]: COURS DE MACHINES FRIGORIFIQUES. 2010-2011
- [15] : [Peter W. Egolf, Andrej Kitanovski, Fabrice Gendre, Osmann Sari]: RÉFRIGÉRATION MAGNÉTIQUE. Haute Ecole Spécialisée de Suisse occidentale. Ecole d'ingénieurs du Canton de Vaud Suisse.
- [16] : [Sergiu LIONTE] : Caractérisation d'un système de réfrigération magnétique à point de Curie proche de la température ambiante – influence de la vitesse d'écoulement et de la géométrie de régénérateur. Institut National des Sciences Appliquées (INSA) Strasbourg France.
- [17]: [Steyert, 1978]: Steyert, W. A. (1978). Sterling-cycle rotating magnetic refrigerators and heat engines for use near room temperature.
- [18]: [Tura]: A. Tura, “Active Magnetic Regenerator Experimental Optimization ”, Master of Applied Science, 2002.
- [19]: [Tura 2]: Design and Analysis of a Nested Halbach Permanent Magnet. Magnetic Refrigerator
- [20] : [Ulrich LEGAIT] : Caractérisation et modélisation magnétothermique appliquée à la réfrigération magnétique. P5. Thèse Université de Grenoble France 2006.
- [21]: [Yu] B.f. Yu, Q. Gao, B. Zhang, X.Z. Meng, Z. Chen, “Review on Research of Room Temperature Magnetic Refrigeration”, International Journal of Refrigeration.2003
- [22] : [Zimm] C. Zimm, A. Boerder, J. Chell, A. Sternberg, A. Fujita, S. Fujieda, K. Fukamichi, “Design and performance of a permanent-magnet rotary refrigerator”, International Journal of Refrigeration.