



Etude paramétrique d'un système de réfrigération magnétique active à régénération en plaque parallèles de $Gd_{0.73}Dy_{0.26}$

Rabaa Ben Sidhom¹, Zina Meddeb², Mounir Bouzaiane¹.

1: Département de physique, Faculté Des sciences de Tunis, Université Tunis Al Manar, Tunisie

2 : Unité de recherche Energétique et Environnement, Ecole d'ingénieur de Gabes, Université de Gabes, Tunisie
rab3a.sidhom@yahoo.fr

Résumé : La production de froid reposait essentiellement sur la technologie conventionnelle de compression/détente des gaz frigorigènes. Cette technologie comporte plusieurs inconvénients et menaces environnementales. Une des solutions réside dans la réfrigération magnétique qui a l'avantage de ne pas utiliser des gaz à effet de serre et qui de plus présente des rendements énergétiques bien supérieurs à ceux de la technologie conventionnelle. La réfrigération magnétique repose sur l'effet magnétocalorique important que présentent certains matériaux autour de leur température de curie. Dans le présent papier, on s'intéresse à étudier un système de réfrigération magnétique active à régénération (AMRR) en plaque parallèle de $Gd_{0.73}Dy_{0.26}$ opérant entre 235 et 315 K. Pour se faire, une étude thermodynamique et numérique est faite ainsi qu'une étude paramétrique envisageant l'effets des paramètres physiques et géométriques (fluide caloporteur, géométrie des plaque, fréquence, débit...) sur les profils de températures, les transferts thermique et les rendements énergétique du système.

Mots clés : Effet magnétocalorique, AMRR, lit régénérateur, fluide caloporteur.

1. Introduction :

De nos jours, la réfrigération est omniprésente dans notre vie quotidienne Elle représente 20% de la consommation électrique aux États-Unis et jusqu'à 25% au Japon [1]. On la retrouve dans diverses applications domestiques et industrielles tels que la conservation des aliments, la climatisation, la médecine, le refroidissement des appareils électroniques, la liquéfaction des gaz et autres.

Les machines frigorigènes à compression sont les plus répandus à l'heure actuelle Mais cette technologie présente plusieurs problèmes environnementaux et a déjà atteint la limite de son efficacité. C'est pourquoi les recherches se sont orientées vers le développement d'autres alternatives..La réfrigération magnétique semble être une alternative excellente sur le plan environnemental et énergétique. Maintenant plusieurs travaux sont menés dans le but de rendre cette technologie compétitive avec les technologies conventionnelles de réfrigération.

2. La réfrigération magnétique active à régénération

2.1. Effet magnétocalorique

La réfrigération magnétique est basée sur l'effet magnétocalorique (EMC), une propriété intrinsèque que représentent certains matériaux autour de leurs températures de curie. Il est introduit par une variation de la température en présence d'un champ magnétique dans les conditions adiabatique. En effet l'application d'un champ magnétique dans les conditions adiabatique entraine l'alignement des moments magnétiques selon la direction du champ et par suite la diminution de l'entropie magnétique. Cette diminutions sera compensée par

une augmentation de l'entropie du réseau qui mène à l'augmentation de la température du système. Pour les matériaux ferromagnétique, l'entropie totale à pression constante est décrite comme suit [2][3]:

$$\Delta S(T, B) = \Delta S_m(T, B) + \Delta S_r(T) + \Delta S_{el}(T) = 0 \quad (1)$$

Cette propriétés a été exploitée dans les systèmes de réfrigération magnétique. Le schéma qui suit (figure 1) explique le principe de base.

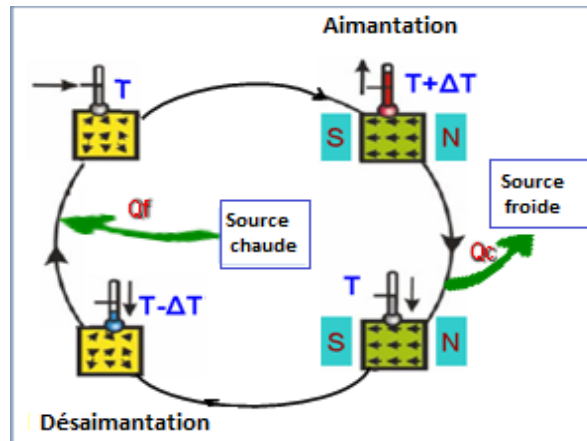


Figure 1 : Description de l'effet magnétocalorique

2.2. Etude d'un système de réfrigération magnétique active à régénération

2.2.1 Principe de fonctionnement des systèmes AMRR

L'application directe de l'EMC ne procure pas des écarts de température exploitables dans la pluparts des applications de la réfrigération [4] [5]. Pour Atteindre des écarts de température plus élevés on a recourus aux systèmes de réfrigération magnétique active à régénération (AMRR) Qui permettent à la chaleur dégagée dans une étape du cycle à être récupérée dans une autre étape. Le matériau magnétocalorique lui-même agit comme régénérateur. Et chaque particule du lit subit un cycle de Baryton [6] composée de quatre phases : deux adiabatiques et deux isochamps :

- i) Adiabatique : La température de chaque point du lit régénérateur augmente de ΔT_{ad} suite à l'application d'un champ magnétique.
- ii) Isochamps: Le fluide circule de la source froide de Température T_F à la source chaude de température T_c , et la chaleur de l'aimantation est cédée au fluide.
- iii) Adiabatique : La Température de chaque point du matériau régénérateur baisse de ΔT_{ad} suite à la désaimantation.
- vi) Isochamps : le fluide circule dans le sens inverse de la source chaude T_c vers la source froide T_F et cède sa chaleur au régénérateur.

On considère dans ce papier un lit régénérateur en plaques parallèles de $Gd_{0.73}Dy_{0.27}$ de température initiale constante situé entre deux réservoirs chaud et froid [7][8]. Cette configuration est illustrée dans la figure (Figure2).

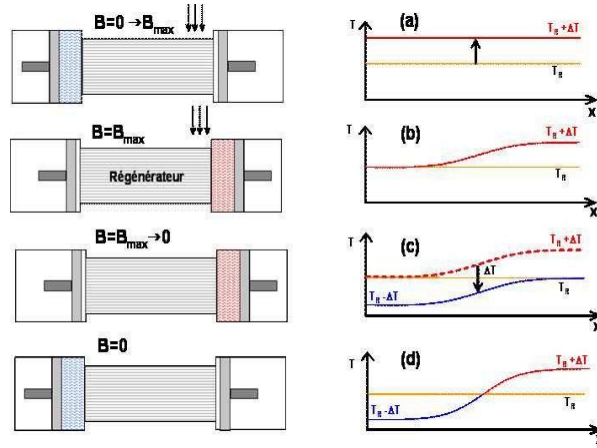


Figure2 : Principe de fonctionnement d'un cycle AMRR

2.2.2 Etude thermique

On considère le cas d'un lit en plaques superposées de $Gd_{0.73}Dy_{0.27}$ et un film de fluide caloporteur (Eau). Les propriétés physiques et thermiques du matériau magnéto-calorique sont regroupées dans le tableau 1 [9]

Tableau 1 : Propriétés de $Gd_{0.73}Dy_{0.27}$

	$Gd_{0.73}Dy_{0.27}$
Température de Curie (K)	266
EMC ($\Delta H=5T$)	11
Températures de fonctionnement	235-315 (K)
Masse volumique en (Kg/m^3)	8075
Conductivité thermique ($W/m/K$) à 293 K	10.5
Chaleur spécifique en ($J/kg/k$) à 293 K	215

Les échanges thermique jouent un rôle très importants dans la réfrigération magnétique .C'est pourquoi il est essentiel d'étudier les transferts thermiques au sein du système

L'écoulement est considéré incompressible et seuls les échanges convectifs sont pris en considération. Les bilans énergétiques du système sont simplifiés comme suit :

$$\begin{cases} m_f c_f (T_f) \left(\frac{\partial T_f}{\partial t} + d(t) \frac{\partial T_f}{\partial x} \right) = hS(T_f - T_m) \\ m_m c_m \frac{\partial T_m}{\partial t} = hS(T_f - T_m) \\ Q = hS(T_m - T_f) \end{cases} \quad (2)$$

Avec m, c, T, h, Q et S sont respectivement la masse ,la chaleur spécifique ,la température, le coefficient de transfert convectif la chaleur et la surface ,les indices f et m correspondent respectivement au fluide et au matériau.

Pour résoudre ce système on utilise la méthode des différences finis .Une résolution sous MATLAB nous permet de tracer le profil de température et de la chaleur échangée par convection pendant les deux phases d'aimantation et de désaimantation [10].

On peut bien constater depuis les figures (Figure 3) et (Figure 4) que le système atteint le régime permanent après un certain nombre de cycle .Ce régime est atteint lorsque les températures aux deux cotés chaud et froid soient égales respectivement aux températures des réservoirs chaud et froid.

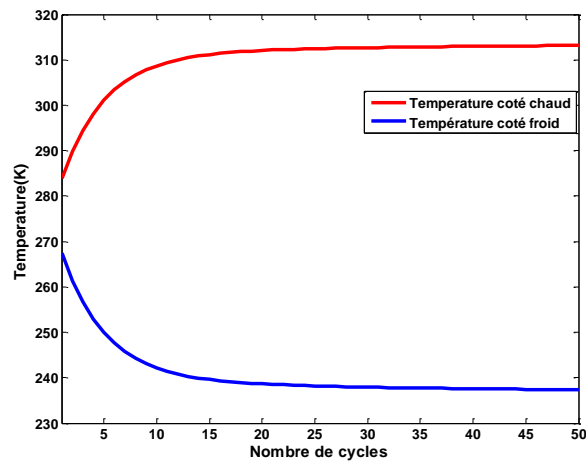


Figure 3 : Profil de température de deux cotés chaud et froid du Régénérateur

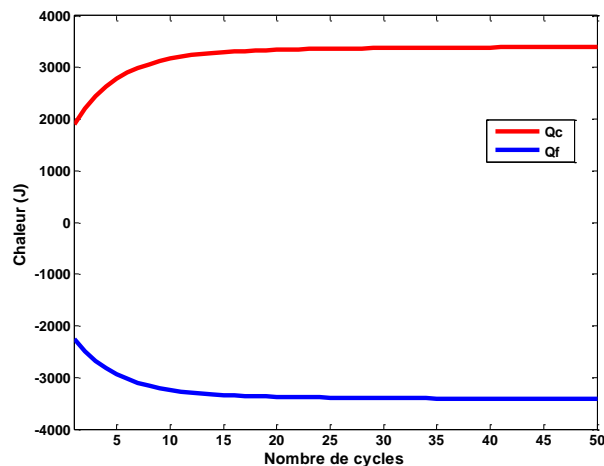


Figure 4 : Chaleur échangée pendant les deux phases aimantation et désaimantation

3-Etude paramétriques d'un système AMRR

Une étude paramétrique consiste à étudier les effets des paramètres (physiques, géométriques ...) d'un système sur les réponses de ce système.

On s'intéresse dans notre cas à étudier les effets du débit de l'écoulement (Débit), la longueur du lit (L_m), l'épaisseur du film de fluide (E_f), et fréquence des cycles (F).

Les réponses choisies sont :

- **La chaleur Q** absorbée par le régénérateur lors de l'écoulement du fluide caloporteur de la source chaude vers la source froide et cédée par le générateur lors de l'écoulement dans le sens inverse. Puisque le rendement du système augmente avec la quantité de chaleur Q , alors on cherche à la maximiser.

- **Le nombre de cycles (N_c)** nécessaires pour atteindre le régime permanent de fonctionnement. C'est à dire que la température coté froid atteint la température froide désirée et la température du coté chaud atteint la température chaude fixées dès le début .On a intérêt à minimiser le nombre de cycle du régime transitoire pour que le système puisse atteindre son état d'équilibre plus rapidement.

3.1. Méthode traditionnelle

L'étude paramétrique traditionnelle consiste à faire varier un seul facteur et garder tous les autres facteurs constants, de manière à mettre en évidence son effet sur la réponse désirée.

Les figures suivantes montrent les influences des paramètres mis en jeu sur respectivement la chaleur échangée Q et le nombre de cycles N_c .

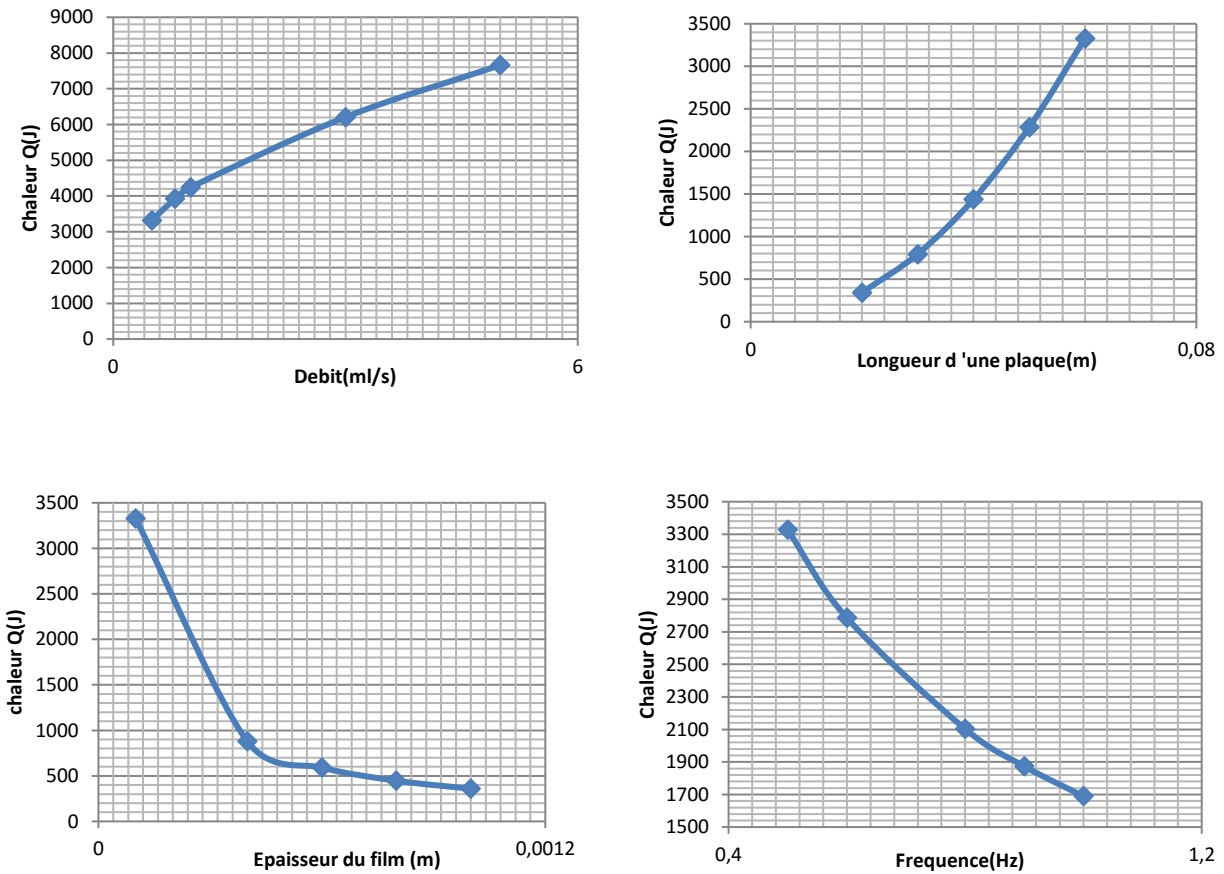


Figure 5 : Influences des paramètres Débit, L_m , E_f et F sur la chaleur échangée par convection.

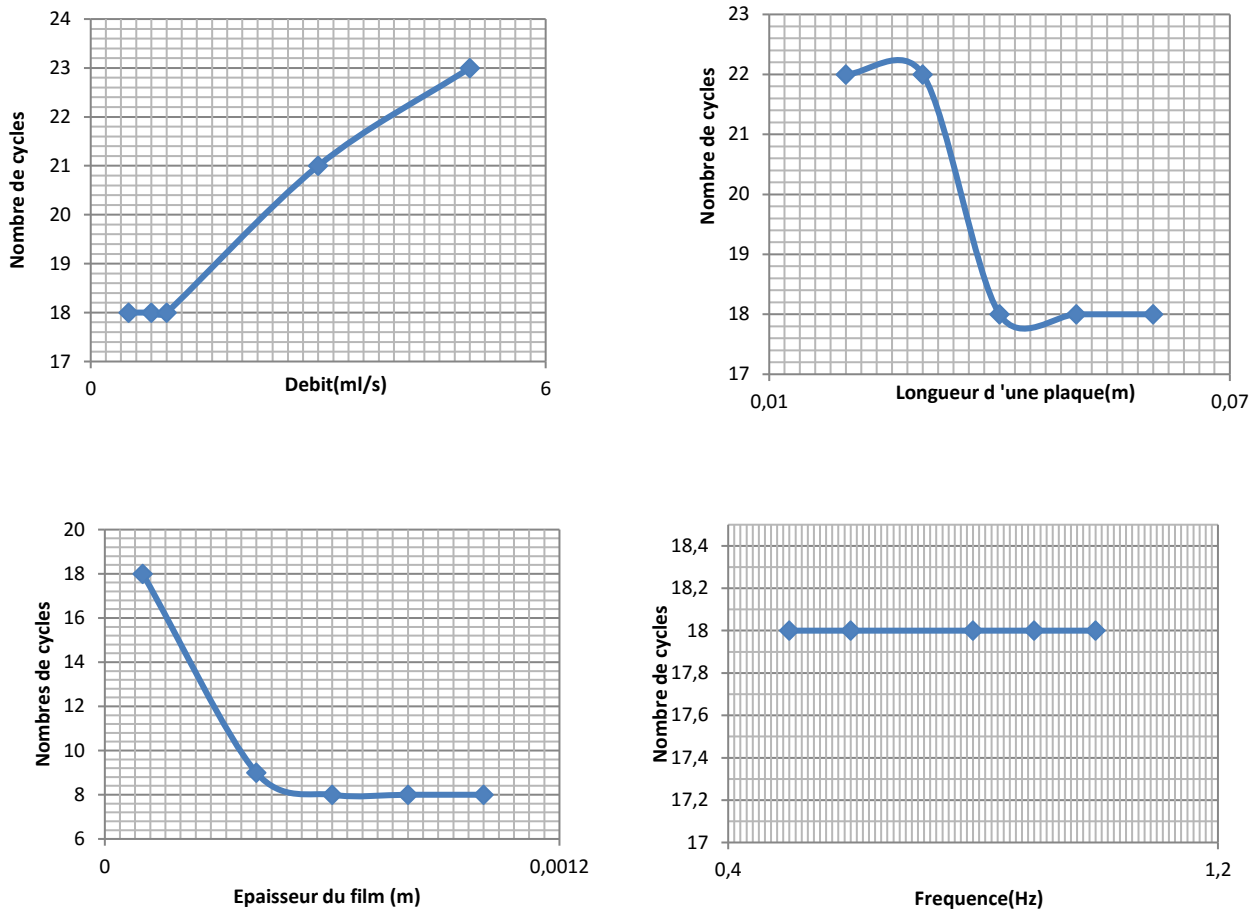


Figure 6 : Influences des paramètres Débit, L_m , E_f et F sur le nombre de cycles .

3.2. Méthode des plans d'expériences

Cette méthode a pour avantage d'étudier toutes les combinaisons possibles des facteurs pris en considération dans l'expérience [11].

On a choisi d'étudier un plan factoriel complet qui permet d'estimer non seulement les effets principaux mais aussi toutes les interactions possibles.

Si on a k facteur à X niveaux, alors le nombre d'expériences nécessaire pour l'ensemble des combinaisons est assez facile à calculer. Dans notre cas d'étude $X = 2$, c'est-à-dire que nous étudierons des plans à 2 niveaux. Le nombre d'expériences réalisées par un plan complet à 2 niveaux est donnée par : $n = 2^k$

Avec k : le nombre des facteurs, dans notre cas $k=4$.

On va utiliser la notation de Yates :

- -1 le niveau bas de chaque facteur
- +1 le niveau haut de chaque facteur

Tableau2 : Valeurs minimales et maximales des paramètres

	Debit(m^3/s)	L_m (m)	E_r (m)	F(Hz)
Valeur minimale	5.10-6	0.02	0.0001	0.5
Valeur maximale	5. 10-5	0.06	0.001	1

Les 16 essais de simulations correspondants à chaque combinaison sont regroupés dans le tableau suivant :

Tableau3 : Matrice d'expériences

Essai	Débit (m^3/s)	L_m (m)	E_r (m)	Fréquence(Hz)	Q (J)	Nc
1	1	1	1	1	441.8529	10
2	1	1	1	-1	885.8432	12
3	1	1	-1	1	3.9315e+03	21
4	1	1	-1	-1	7.6616e+03	23
5	1	-1	1	1	48.9196	10
6	1	-1	1	-1	98.1059	11
7	1	-1	-1	1	406.5695	26
8	1	-1	-1	-1	797.9635	26
9	-1	1	1	1	180.6890	10
10	-1	1	1	-1	358.9392	8
11	-1	1	-1	1	1.6892e+03	18
12	-1	1	-1	-1	3.3268e+03	18
13	-1	-1	1	1	19.8124	11
14	-1	-1	1	-1	39.3243	10
15	-1	-1	-1	1	176.0080	20
16	-1	-1	-1	-1	342.9832	22

3.2.1 Modélisation à l'aide de logiciel DOE :

Pour appliquer la méthode des plans d'expériences pour un plan factoriel complet à 16 essais, il suffit de remplir la matrice précédente et le logiciel DOE se charge de calculer les effets, leurs interactions et donner une configuration optimale.

Diagrammes de Pareto :

Le diagramme de Pareto est un graphique simplement lisible qui permet de mettre en évidence les effets les plus importants influents sur le système.

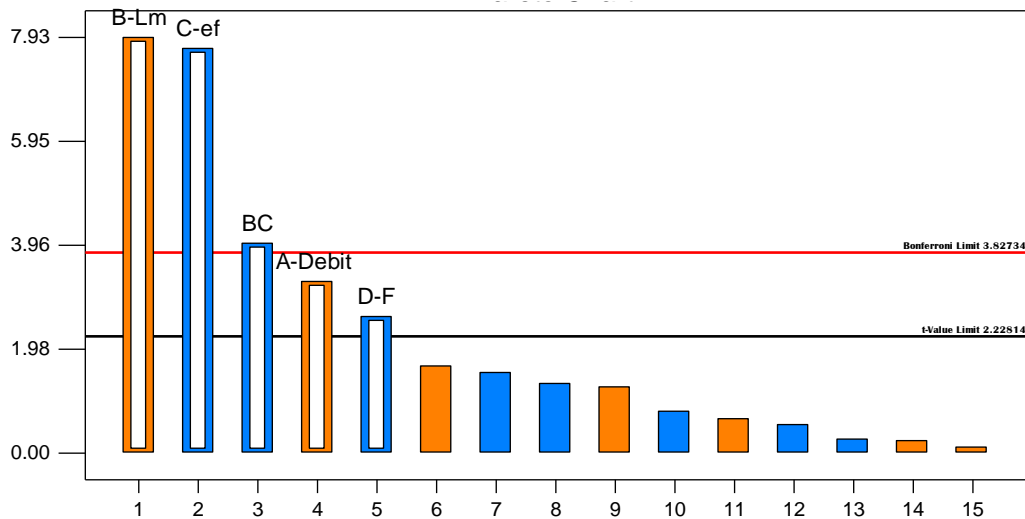


Figure 5 : Diagramme de Pareto pour la chaleur échangée par convection

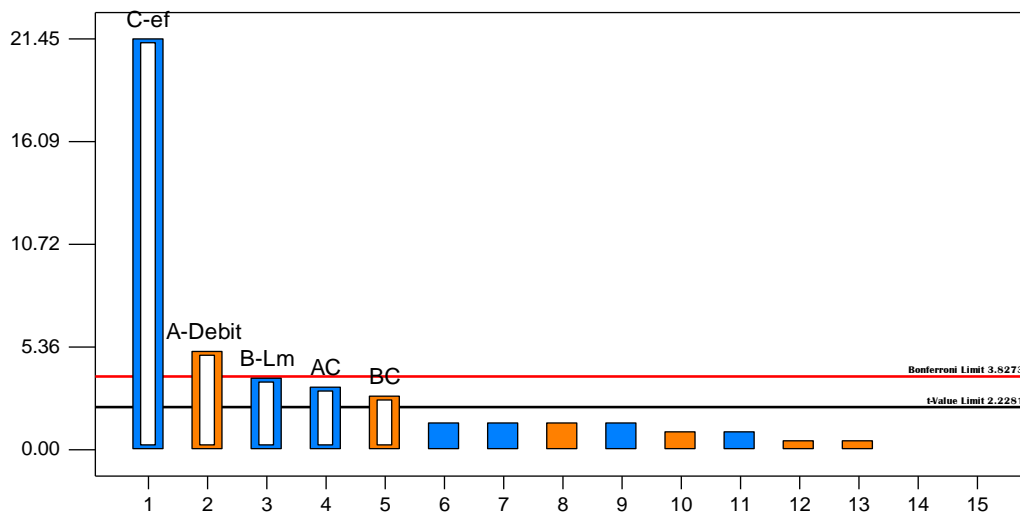


Figure 6 : Diagramme de Pareto pour nombre de cycles

Modélisation de Q :

Les effets les plus significatifs pour la chaleur échangée par convection entre le matériau magnétocalorique et le fluide caloporteur sont respectivement selon un ordre d'importance décroissant la longueur du lit L_m , et l'épaisseur du film de fluide caloporteur, Ces deux facteurs ont presque le même ordre d'importance, ensuite les facteurs moins significatifs tels que le produit $(L_m * E_f)$, le débit et finalement la fréquence. Tout les autres paramètres et leurs interactions sont considérés négligeables.

Tableau 4 : contribution des paramètres significatifs sur Q

Paramètre	L_m	E_f	$L_m * E_f$	Débit	F
Effet sur Q	37.88%	35.90%	9.65%	6.46%	4.09%

- Equations aux valeurs réelles de Q :

$$Q^{1/2} = 5.58 + 2.573 \cdot 10^5 \text{ Debit} + 1133.72 L_m + 1126.03 E_f - 18.43F - 7.86 \cdot 10^5 L_m * E_f \quad (3)$$

- Equations aux valeurs codées de Q:

$$Q^{1/2} = 27.50 + 5.79Debit + 14.02L_m - 13.65E_f - 4.61F - 7.08L_m * E_f \quad (4)$$

Modélisation de N_c :

Les effets significatifs des paramètres et des interactions sur le nombre de cycles sont donnés dans le tableau (Tableau 5). On remarque que le nombre de cycles nécessaire pour atteindre le régime permanent dépend essentiellement de l'épaisseur du film de fluide (87.01%) alors que les autres paramètres influencent peu cette réponse.

Tableau 5 : Contributions des paramètres significatifs sur N_c

Paramètre	Ef	Debit	Lm	Débit*Ef	Lm*Ef
Effet sur N_c	87.01%	4.98%	2.63%	2.01%	1.48%

- Equation aux valeurs réelles de N_c :

$$N_c = 23.87 + 1.08.10^5 Debit - 95.83 L_m - 13734.56 E_f - 8.64.10^7 Debit * E_f + 83333.33L_m * E_f \quad (5)$$

- Equations aux valeurs codées de N_c :

$$N_c = 16.00 + 1.38Debit - 1.00 L_m - 5.75 e_f - 0.88Debit * e_f + 0.75L_m * e_f \quad (6)$$

3.2 Optimisation

Après avoir obtenue une information sur les effets des principaux paramètres influents le système, le logiciel DOE nous fournit les valeurs optimales de ces paramètres qui assurent une énergie maximale échangée par convection entre le matériau magnéto-calorique et le fluide caloporteur ($Q = 1887.84.129$ J) pour un nombre de cycles minimal ($N_c = 19$ cycles).

Tableau6 : Valeurs optimales

	Debit (m^3/s)	L_m (m)	E_f (m)	F (Hz)	Q (J)	N_c
Valeur optimale	$5.00 \cdot 10^{-6}$	0.043	0.00011	0.50	1887.84	19

Conclusions

La réfrigération magnétique est une technologie prometteuse, plus écologique et plus efficace du point de vue énergétique. Cependant des nombreux axes sont à améliorer pour rendre les systèmes de réfrigération magnétique compétitifs avec les systèmes conventionnels. Dans ce papier un modèle d' AMRR est présenté et une étude paramétrique est effectuée afin de prévoir la meilleure configuration géométrique et physique possible.

Nomenclature

Symboles

T	Temperature, K
h	Coefficient d'échange thermique, $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
c	Capacité thermique massique, $J/kg^{-1}K^{-1}$
m	Masse, kg
L	Longueur d une plaque, m
E	Epaisseur ,m
F	Fréquence, Hz

Symboles grecs

λ	Conductivité thermique, $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
ρ	Masse volumique, Kg/m^3

Indices

Q	Chaleur échangée par convection		
N	Nombre de cycles	m	matériau
t	Temps, s	f	fluide
S	Entropie, J/K	C	chaude
B	champ magnétique, T	F	froide

Références

1. D.Coulomb ,Thermag IV conference forward. In Proc. Fourth IIF-IIR International Conference on Magnetic Refrigeration at Room Temperature, pages 3–4, Baotou, China.
2. H.R.Bouchkara Recherche sur les systems de refrigeration magnétique. Modélisation numérique, conception et optimisation. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble. tel-00331526
3. O.Sari, M Balli ,From conventional to magnetic refrigerator technology .International journal of refrigeration vol 37 p 8-15 jan 2014
4. A.Lebouc,F, Allab, J.M Fournier, J.P Yonnet. Réfrigération magnétique, [RE 28], Techniques de l'Ingénieurs (2005)
5. K.L. Engelbrecht, G.F Nellis, S.A. Klein, A.M. Boeder, “Modeling Active Magnetic Regenerative Refrigeration Systems”, International Conference on Magnetic Refrigeration at Room Temperature ,Montreux, Switzerland, 27-30, September 2005.
6. B.f. Yu, Q. Gao, B. Zhang, X.Z. Meng, Z. Chen, “Review on Research of Room Temperature Magnetic Refrigeration”, International Journal of Refrigeration 26, 622-636, 2003.
7. F. Allab, “Conception et réalisation d'un dispositif de réfrigération magnétique basé sur l'effet magnétocalorique et dédié a la climatisation automobile”, Thèse deDoctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble,2008
8. Allab, F., Kedous-Lebouc, A., Fournier, J.M., Yonnet, J.P., 2005. Numerical modeling for active magnetic regenerative refrigeration. IEEE Transactions on Magnetics 41 (10), 3757– 3759.
9. W.Iwasaki , Magnetic refrigeration technology for an international clean energy network using hydrogen energy (WE-NET),International journal of hydrogen energy ,Volume 28 ,pages 559-567,2003.
10. Z. Meddeb,.R.Ben Sidhom et al Thermodynamic study of the active magnetic refrigerative refrigeration in transitional regime .International journal of fluid mechanics and thermal sciences (2015).10.11648
11. M. Pillet, “Les Plans d'Expériences par la Méthode TAGUCHI”, Les Editions d'Organisation, ISBN 2-70-812031-X, 1997..