

Etude d'un système de réfrigération magnétique active à régénération en fonction des paramètres géométriques et physiques

Rabaa Ben Sidhom^{#1}, Zina Meddeb^{*}, Mounir Bouzaiane[#]

[#]Département de physique, Faculté des sciences de Tunis, Université Tunis Al Manar. Tunisie

¹rab3a.sidhom@yahoo.fr

^{*}Unité de recherche Energétique et Environnement, Ecole nationale d'ingénieurs de Gabes. Université de Gabes. Tunisie

Résumé - Les technologies conventionnelles de réfrigération reposant sur la compression/détente des gaz frigorigènes, comportent plusieurs inconvénients. Une des solutions réside dans la réfrigération magnétique qui a l'avantage de ne pas utiliser de gaz à effet de serre et qui présente des rendements énergétiques bien supérieurs. La réfrigération magnétique repose sur l'effet magnétocalorique important que présentent certains matériaux autour de leur température de Curie. On s'intéresse dans ce papier à étudier un système de réfrigération magnétique active à régénération (AMRR) fonctionnant autour de la température ambiante. Pour ce faire, une étude thermodynamique et numérique est faite. Les effets des paramètres géométriques et physiques du système (fluide caloporteur, géométrie des plaques, débit...) sont examinés sur les profils de température et les transferts thermiques à fin de prévoir une configuration optimale.

Mots clés — réfrigération magnétique, AMRR, étude paramétrique, plans d'expériences

I. INTRODUCTION

La réfrigération est l'une des technologies les plus importantes du monde moderne, on la retrouve dans des applications très diverses telles que la climatisation, la conservation des aliments, la médecine, le refroidissement des appareils électronique, la liquéfaction des gaz et autres. A l'heure actuelle, les machines frigorigènes à compression sont les plus répandues. Mais cette technologie présente plusieurs problèmes environnementaux et a déjà atteint la limite de son efficacité. C'est pourquoi d'autres alternatives sont envisagées. La réfrigération magnétique semble être une alternative excellente sur le plan environnemental et énergétique. Plusieurs travaux de recherches sont menés pour rendre cette technologie compétitive avec les technologies conventionnelles de réfrigération.

II-LA REFRIGERATION MAGNETIQUE ACTIVE A REGENERATION

A. 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 entraîne l'alignement des moments magnétiques selon la direction du champ et par suite la diminution de l'entropie magnétique. Cette diminution 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 [1][2]:

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

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

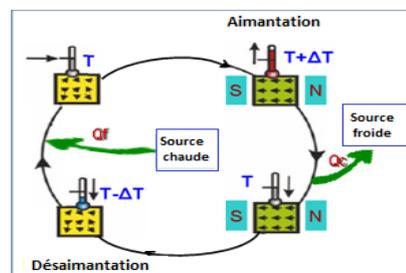


Fig.1 Description de l'effet magnétocalorique

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

1) Principe de fonctionnement des systèmes AMRR

L'application directe de l'EMC ne procure pas des écarts de température exploitables dans la plupart des applications de la réfrigération [3] [4]. 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 [5] composée de 4 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 Gadolinium de température initiale constante situé entre deux réservoirs chaud et froid [6][7]. Cette configuration est illustrée dans la figure (Fig.2).

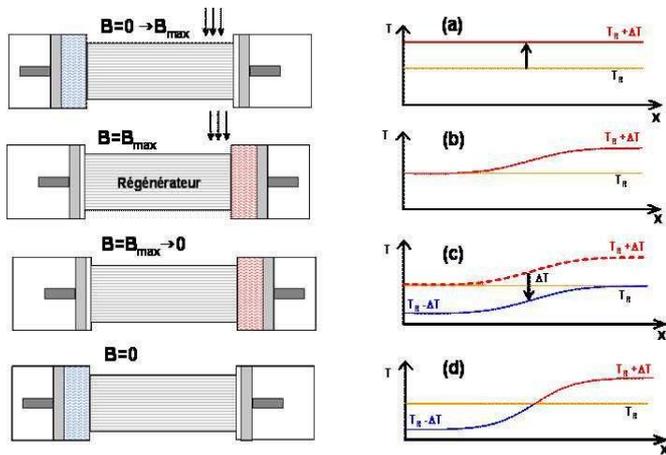


Fig.2 Principe de fonctionnement d'un cycle AMRR

2) Etude thermique

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. On considère le cas monodimensionnel d'un lit en plaques superposées de gadolinium (EMC=1.75 sous l'action d'un champ magnétique de 1 T) et un film de fluide caloporteur (Eau). L'écoulement est considéré incompressible et seuls les échanges convectifs sont pris en considération. Les bilans énergétiques d 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 [8].

On peut bien constater depuis les figures (Fig.3) et (Fig.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.

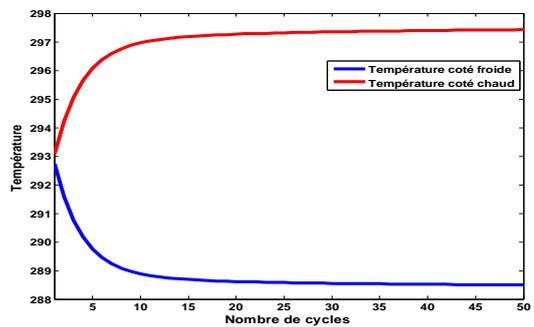


Fig.3 Profil de température de deux cotés chaud et froid du Régénérateur

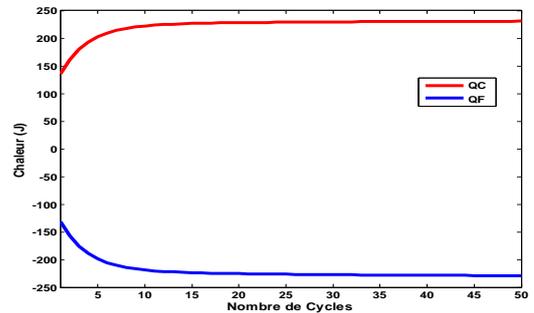


Fig. 4 Chaleur échangée pendant les deux phases aimantation et désaimantation

III-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 d'une plaque (e_m), et la différence de température entre les deux réservoirs chaud et froid (ΔT).

Les réponses choisies sont :

- 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.

- **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.

A. *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, le nombre de cycles N_c et la chaleur échangée Q.

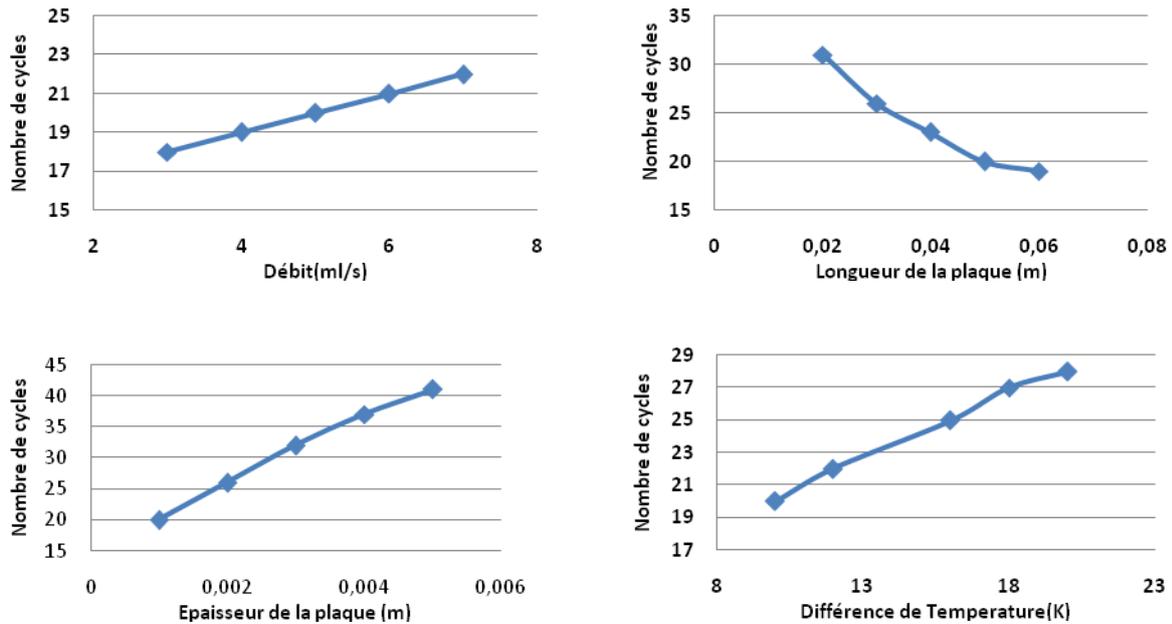


Fig.5 Influences des paramètres Débit, L_m , e_m et ΔT sur le nombre de cycle N_c

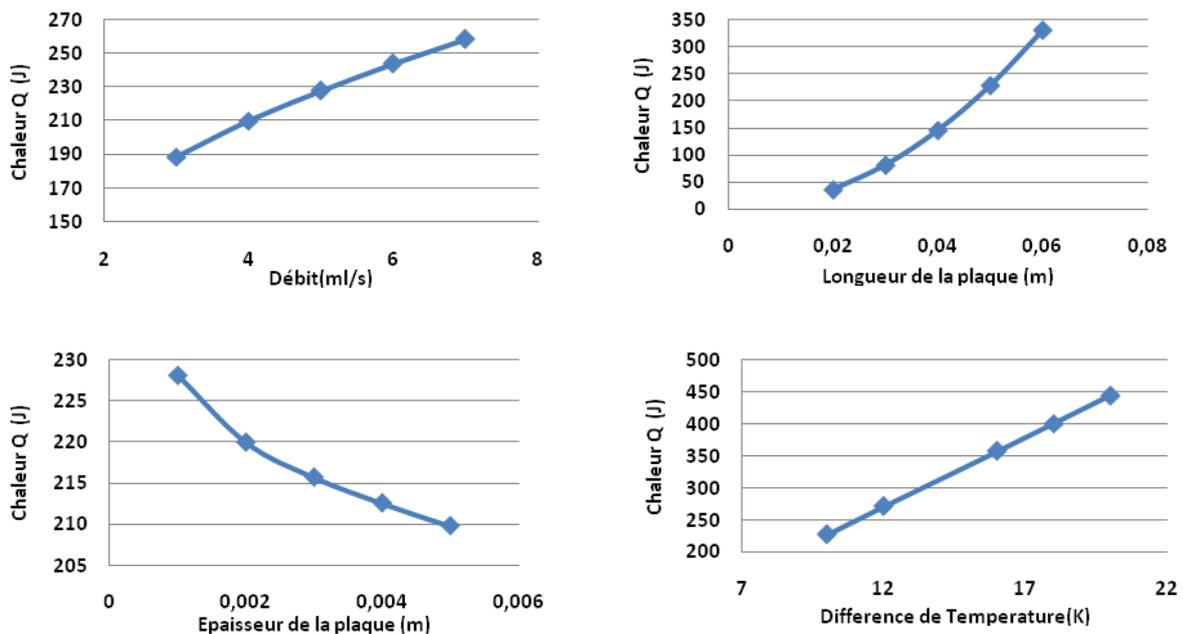


Fig.6 Influences des paramètres Débit, L_m , e_m et ΔT sur la chaleur échangée Q

Cette méthode nous permet de calculer l'effet de chaque facteur pour une combinaison bien particulière des autres facteurs mais rien ne garantie que cet effet reste valable pour d'autres combinaisons. Pour surmonter cette incertitude, on a recours à la méthode des plans d'expériences.

C. Méthode des plans d'expériences

Cette méthode a pour avantage d'étudier toutes les combinaisons possibles des facteurs pris en considération dans l'expérience [9].

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

TABLEAU I

VALEURS MINIMALES ET MAXIMALES DES PARAMETRES

	VALEUR MAXIMALE	VALEUR MINIMALE
DEBIT(M3/S)	6.10-6	3. 10-6
L _M (M)	0.06	0.03
E _M (M)	0.003	0.001
ΔT (K)	20	10

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

TABLEAU II
 MATRICE D EXPERIENCES

Essai	Debit (m ³ /s)	L _m (m)	em (m)	ΔT (K)	Nc	Q (J)
1	1	1	1	1	40	665.270
2	1	1	-1	1	26	688.074
3	1	-1	1	1	52	160.933
4	1	-1	-1	1	41	169.872

5	-1	1	1	1	39	517.108
6	-1	1	-1	1	21	530.443
7	-1	-1	1	1	45	125.452
8	-1	-1	-1	1	34	130.967
9	1	1	1	-1	32	335.131
10	1	1	-1	-1	19	353.312
11	1	-1	1	-1	35	79.853
12	1	-1	-1	-1	28	86.769
13	-1	1	1	-1	32	261.085
14	-1	1	-1	-1	18	273.115
15	-1	-1	1	-1	33	62.800
16	-1	-1	-1	-1	23	67.007

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.

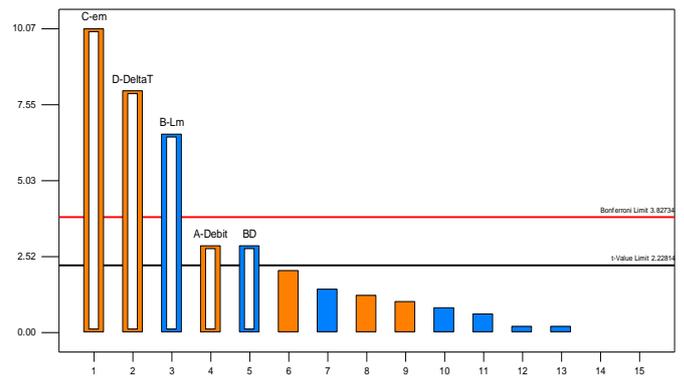


Fig. 5 Diagramme de Pareto pour Nc

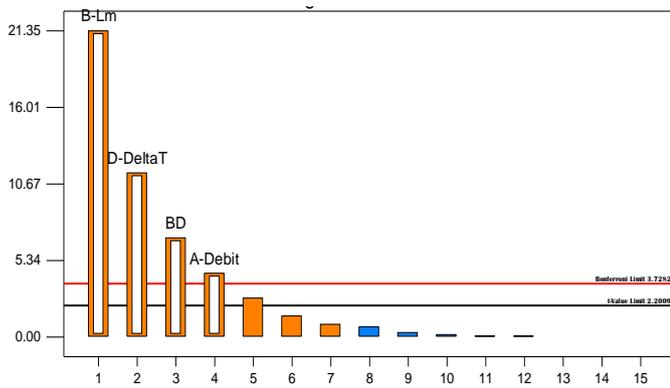


Fig.6 Diagramme de Pareto pour la chaleur Q

On remarque que les interactions d'ordre 3 sont négligeables pour les deux réponses, on se limite alors aux effets d'ordre 1 et 2.

Modélisation de Nc :

Les effets significatifs des paramètres et des interactions sur le nombre de cycles sont donnés dans le tableau (TABLEAU III), la géométrie du lit (longueur et épaisseur) ainsi que la différences de temperature entre les deux réservoirs chaud et froid ,sont les paramètres les plus important qui agissent sur le nombre de cycle nécessaire pour atteindre le régime permanent .

TABLEAU III
 CONTRIBUTIONS DES PARAMETRES SIGNIFICATIFS SUR Nc

Paramètre	Effet sur Nc
Epaisseur d'une plaque	43.07%
Différence de température ΔT=Tc-TF	27.28%
Longueur d'une plaque	18.37%
Débit	3.52%
Lm*ΔT	3.52%

Equation aux valeurs réelles de Nc :

$$N_c = -3.500 + 1.166.10^6 Debit + 83.333 L_m + 6125 e_m + 2.025\Delta T - 23.333L_m\Delta T \quad (3)$$

Equations aux valeurs codées de Nc :

$$N_c = 32.38 + 1.75Debit - 4 L_m + 6.13 e_m + 4.88\Delta T - 1.75L_m\Delta T \quad (4)$$

Modélisation de Q :

Les effets les plus significatifs pour la chaleur échangée par convection entre le matériau magnéto-calorique et le fluide caloporteur sont respectivement selon un ordre d'importance décroissant la longueur du lit Lm ,la différence de Temperature ΔT , le produit (Lm* ΔT) et finalement le débit .Tout les autres paramètres et leurs interactions sont considérés négligeables .

TABLEAU IV
 CONTRIBUTIONS DES PARAMETRES SIGNIFICATIFS SURQ

Paramètre	Effet sur Q
Longueur d'une plaque Lm	68.49%
Différence de température ΔT=Tc-TF	19.69%
Lm * ΔT	7.19%
Débit	2.98%

Equations aux valeurs réelles de Q :

$$Q = -115.387 + 2.381.10^7 Debit + 322.975 L_m - 14.916 \Delta T + 739.547L_m \Delta T \quad (5)$$

Equations aux valeurs codées de Q:

$$Q = 281.70 + 35.70Debit + 171.24 L_m + 91.82\Delta T + 55.47L_m\Delta T \quad (6)$$

D. 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= 603.129 J) pour un nombre de cycles minimal (Nc= 26 cycles).

TABLEAU V
 VALEURS OPTIMALES

	Valeur optimale
Debit (m ³ /s)	4.622 10 ⁻⁶
Lm (m)	0.059
em (m)	0.001

ΔT (K)	20
N_c	25.51
Q (J)	603.129

II. 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 de AMRR est présenté et une étude paramétrique est effectuée afin de prévoir la meilleure configuration géométrique et physique possible.

REFERENCES

- [1] *I.H.R. Bouchkara Recherche sur les systems de refrigeration magnétique. Modélisation numérique, conception et optimisation..These de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble. tel-00331526*
- [2] *O.Sari, M Balli ,From conventional to magnetic refrigerator technology .International journal of refrigeration vol 37 p 8-15 jan 2014*
- [3] *A.Lebouc,F, Allab, J.M Fournier, J.P Yonnet., (2005). Réfrigération magnétique, [RE 28], Techniques de l'Ingénieurs*
- [4] *4.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.*
- [5] *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.*
- [6] *F. Allab, "Conception et réalisation d'un dispositif de réfrigération magnétique basé sur l'effet magnétocalorique et dédié à la climatisation automobile", Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, 2008*
- [7] *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.*
- [8] *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*
- [9] *M. Pillet, "Les Plans d'Expériences par la Méthode TAGUCHI", Les Editions d'Organisation, ISBN 2-70-812031-X, 1997..*