

# Optimisation des paramètres d'un échangeur de chaleur avec agitateur par la méthode Taguchi et l'algorithme génétique.

## Optimization a heat exchanger parameter with stirrer using Taguchi method and genetic algorithm.

Sihem BOUZID<sup>1\*</sup>, Larbi BENDADA<sup>2</sup>, Nacer HABIR<sup>3</sup>, Yamina HARNANE<sup>4</sup>

<sup>1,2</sup>Laboratoire Conception et modélisation avancée des systèmes mécaniques et thermo fluides (LCMASMTF), Université Oum El Bouaghi, Algérie.

<sup>3</sup>Laboratoire des Matériaux et Structure des Systèmes Électromécaniques et leurs Fiabilité (LMSEF), Université Oum El Bouaghi, Algérie.

<sup>4</sup> Laboratoire de Génie Mécanique (LGM), Université de Biskra, Algérie.

\*(auteur correspondant : [sihembouzid69@gmail.com](mailto:sihembouzid69@gmail.com))

**Résumé :** Résoudre un problème d'optimisation, c'est rechercher, parmi un ensemble de solutions qui vérifient des contraintes données, la (ou les) solution(s) qui rend (ent) minimale (ou maximale) une fonction mesurant la qualité de cette solution. Cette fonction est appelée fonction objectif ou fonction évaluation. Il s'agit d'optimiser les paramètres d'un échangeur de chaleur double calandre avec agitateur. Notre étude a consisté en la réalisation de 54 tests en agissant sur trois paramètres : débit de fluide chaud, vitesse de rotation de l'agitateur et température d'entrée du fluide chaud en considérant deux modes : serpentin et calandre d'un échangeur de chaleur avec agitateur. L'analyse de Taguchi a permis d'optimiser les niveaux des paramètres de fonctionnement. L'efficacité obtenue vaut 0,2964 et 0,4100 pour les modes serpentin et calandre, respectivement. L'évaluation des générations pour l'optimisation de l'efficacité est d'environ 25 générations avec un optimum égal à 0,2952 et 0,3365 pour les modes serpentin et calandre, respectivement. Les meilleures valeurs des individus obtenues via l'algorithme génétique sont A1B3C1 en mode serpentin et A3B3C1 en mode calandre.

**Mots clés :** échangeur de chaleur, optimisation, efficacité, Taguchi, algorithmes génétiques.

**Abstract:** Solving an optimization problem is to find, among a set of solutions which satisfy given constraints, the solution (s) that minimize or maximize a function measuring this solution quality. This function is called objective function or evaluation function. This is to optimize the parameters of a double shell heat exchanger with stirrer. Our study consisted to carry-out 54 tests by acting on three parameters: hot fluid flow rate, stirrer rotation speed and hot fluid inlet temperature considering two modes: coil and shell of a heat exchanger with stirrer. Taguchi's analysis allowed the optimization of the operating parameter levels. The obtained efficiency obtained is of 0.2964 and 0.4100 for coil and shell modes, respectively. The generations' evaluation efficiency optimization is about 20 generations with an optimum of 0.2952 and 0.3365 for coil and shell modes, respectively. The best values for individuals obtained via genetic algorithm are A1B3C1 and A3B3C1 in coil and shell modes, respectively.

**Keywords:** heat exchanger, optimization, efficiency, Taguchi, genetic algorithms.

## Nomenclature

		<i>Indices et exposants</i>			<i>Symbols grecs</i>		
T	Température, °C		s	sortie			
$q_c$	Débit volumique, l.mn <sup>-1</sup>	c	chaud	AG	Algorithme	$\omega$	vitesse de
S/B	Rapport Signal-bruit	f	froid		génétique		rotation, trs.mn <sup>-1</sup>
n	Nombre de tests	e	entrée	ABC	Paramètres à	$\eta$	efficacité
					différents niveaux		

## 1. Introduction

Dans l'équipement de toute installation énergétique, il y a au moins un échangeur de chaleur. Les ingénieurs en énergie cherchent le meilleur fonctionnement des échangeurs de chaleur pour leur permettre de décider quel échangeur est le plus adapté à leur construction ou quels sont les meilleurs paramètres de fonctionnement pour le rendement attendu. Cette étude implique l'optimisation des paramètres d'un échangeur de chaleur avec agitateur de type TD360d. Le travail a été effectué en deux parties : Réalisation des tests de fonctionnement de l'échangeur en agissant sur trois paramètres : débit de fluide chaud, vitesse de rotation de l'agitateur et température d'entrée du fluide chaud ; puis utilisation des algorithmes de Taguchi et génétiques afin d'optimiser ces mêmes paramètres pour maximiser l'efficacité de l'échangeur.

## 2. Revue Bibliographique

Quelques références de la littérature, réalisées dans le contexte de notre travail sont présentées ici. Sampreeti Jena et al [1] ont établi une corrélation entre la minimisation de la longueur et la minimisation du coût pour deux types de disposition de tube (triangulaire et carrée). Benoît Allen et Louis Gosset [2] ont présenté un modèle permettant d'estimer le coût total des échangeurs de chaleur tubulaires avec condensation dans les tubes ou dans la calandre, ainsi que la réduction du coût au minimum. Mariajayaprakash, Arokiasamy et al [3] ont utilisé la méthode de Taguchi pour identifier les différents paramètres de processus affectant les caractéristiques de qualité des amortisseurs. Dans l'article de Saphir Sanay, Hassan Hajabdollahi [4], le coût total et les paramètres géométriques sont les sept paramètres de conception considérés pour la conception optimale d'un échangeur de chaleur tubes et calandre. Gognan Xie et al [5] ont appliqué un algorithme génétique (AG) avec succès à la conception thermique d'échangeurs de chaleur à tube et calandre (FTHE). Le poids total minimum ou le coût total annuel des FTHE est pris respectivement comme fonction objectif dans l'AG. T.Achouri et C.Bougriou [6] ont développé un programme en langage Fortran qui leur a permis d'obtenir le diamètre optimal correspondant au coût total minimal de l'échangeur (coûts de réalisation et de pompage) pour la même puissance thermique transférée. Cette étude fait l'objet d'une contribution d'optimisation pour des échangeurs industriels de ce type dont le but est d'optimiser leur fonctionnement là où le plan expérimental est difficile à réaliser.

## 3. Méthode expérimentale/modèle mathématique

L'échangeur de chaleur utilisé à calandre chemisée avec serpentins et agitateur Td360d, de marque TecQuipment figure 1, imite les échangeurs de chaleur les plus courants dans l'industrie. Il existe deux modes de fonctionnement : Mode calandre, l'eau chaude s'écoule à travers la calandre (l'eau froide est interne) ; Mode serpentins, l'eau chaude s'écoule à travers le serpentins en chauffant l'eau froide dans le réservoir (l'eau froide est externe) figure 2.



Figure 1. Echangeur TD360d

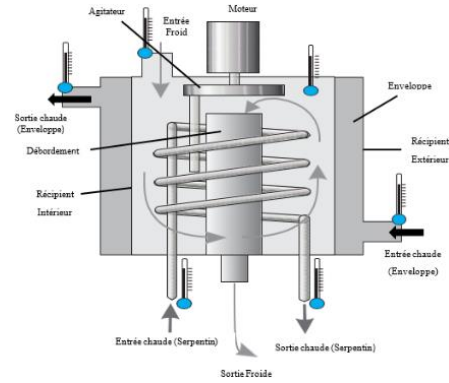


Figure 2. Modes de fonctionnement

**3.1 Tests réalisés :** Les tests ont été réalisés suivant la combinaison des paramètres indiqués sur le tableau 1.

	A	B	C
	Débit volumique $q_c$	Vitesse de rotation $\omega$	Température T
Niveau	l/min	trs/min	°C
1	1	0	40
2	2	50	50
3	3	100	60

Tableau 1. Valeurs des différents paramètres

La combinaison des 3 paramètres pour 3 valeurs chacun nous a fourni 27 tests à exécuter pour chacun des deux modes : Serpentin et calandre (au total 54 tests). Pour chaque test on a calculé la valeur moyenne, à partir d'un ensemble de mesures effectuées durant 900s à un intervalle de 30s chacun (300 lectures), de l'efficacité selon les équations suivantes :

- L'efficacité thermique du circuit chaud :

$$\eta_c = \frac{T_{ce} - T_{cs}}{T_{ce} - T_{fe}} \quad (1)$$

- L'efficacité thermique du circuit froid :

$$\eta_f = \frac{T_{fs} - T_{fe}}{T_{ce} - T_{fe}} \quad (2)$$

- L'efficacité moyenne :

$$\eta = \frac{\eta_c + \eta_f}{2} \quad (3)$$

### 3.2 Modèle mathématique

En se basant sur les résultats de la partie expérimentale, nous avons utilisé deux méthodes d'optimisation : la méthode de Taguchi et la méthode des Algorithmes Génétiques.

### 3.2.1 Méthode de Taguchi

La technique de Taguchi utilise l'approche du rapport signal sur bruit pour mesurer l'écart de la caractéristique de qualité à partir de la valeur souhaitée. Le rapport S / B est utilisé comme fonction objectif d'optimisation des paramètres. Comme l'objectif est de maximiser l'efficacité en déterminant le niveau optimal de chaque facteur, le type « plus grand est le meilleur » rapport S/B est choisi et le calcul est effectué par la formule :

$$S/B_H = -10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (4)$$

$y_i$  : i ème valeur de la caractéristique calculée (efficacité).

### 3.2.2 Méthode des Algorithmes Génétiques AG

Nous avons développé un modèle mathématique se basant sur un réseau orthogonal. Ce modèle a été utilisé en tant que fonction objectif dans l'algorithme génétique mono-objectif. Les corrélations entre les différents paramètres ont été obtenues par la régression, méthode moindres carrés. Les fonctions objectifs et les contraintes sont définies comme suit :

$$\text{Maximiser l'efficacité } \eta : Y (A, B, C) \quad (5)$$

Sous les contraintes :

- Débit volumique  $q_c$  :  $1 \leq A \leq 3$  (6)

- Vitesse  $\omega$  :  $0 \leq B \leq 100$  (7)

- Température  $T_{ce}$  :  $40 \leq C \leq 60$  (8)

Le calcul par l'outil Minitab nous a fourni la fonction objectif (Eq. 9) pour le mode serpentin :

$$\eta \text{ moyenne} = - 0,0580. q_c + 0,00935.\omega + 0,00353.T_{ce} + 0,328 \quad (9)$$

et la fonction objectif (Eq. 10) pour le mode calandre :

$$\eta \text{ moyenne} = + 0,0217.q_c + 0,000302.\omega + 0,000697. T_{ce} + 0,287 \quad (10)$$

## 4. Résultats

### 4.1 Méthode de Taguchi

Pour mieux illustrer la qualité de simulation des modèles et bien analyser leur robustesse, nous traçons les courbes représentant l'effet de l'interaction des différents paramètres à différents niveaux, respectivement pour le mode Serpentin et le mode calandre, ceci successivement en termes d'efficacité ( $\eta$ ) illustrée sur la figure 3 et la figure 4.

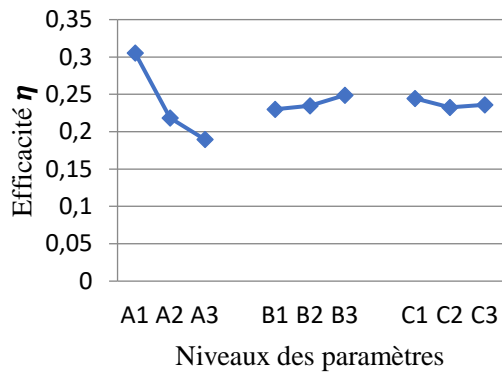


Figure 3. Efficacité moyenne « mode serpent »

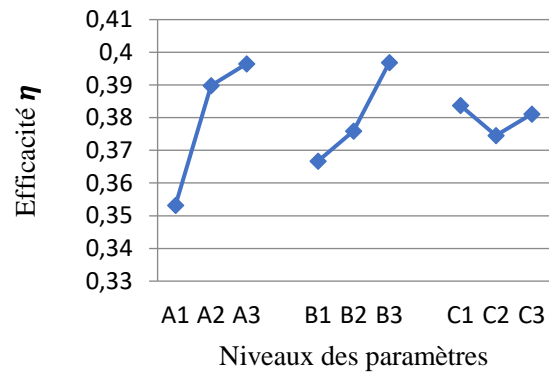


Figure 4. Efficacité moyenne « mode calandre »

Pour faciliter et résumer la lecture des figures 3 et 4, nous avons dressé le tableau 2 et le tableau 3 ci-dessous spécifiant les valeurs maximales de l'efficacité ( $\eta$ )

Niveaux	A	B	C
1	0,3055	0,23	0,2445
2	0,2182	0,2346	0,2328
3	0,1896	0,2487	0,2361
Maximum	0,3055	0,2487	0,2445

Tableau 2. Valeurs maximales de l'efficacité « mode serpent »

Niveaux	A	B	C
1	0,3531	0,3667	0,3838
2	0,3899	0,3759	0,3746
3	0,3965	0,3969	0,3811
Maximum	0,3965	0,3969	0,3838

Tableau 3. Valeurs maximales de l'efficacité « mode calandre »

De même la représentation est effectuée en termes de rapport Signal/bruit (S/B) nous obtenons la figure 5 et la figure 6.

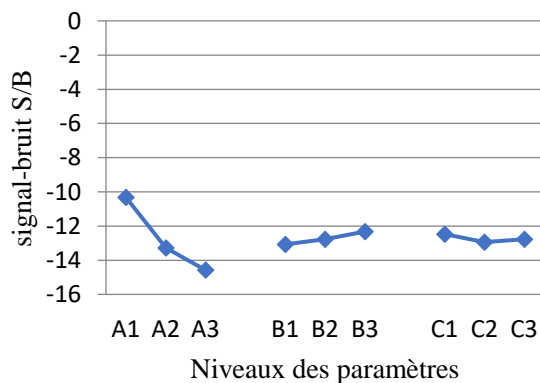


Figure 5. Rapport signal-bruit (S/B) « mode serpent »

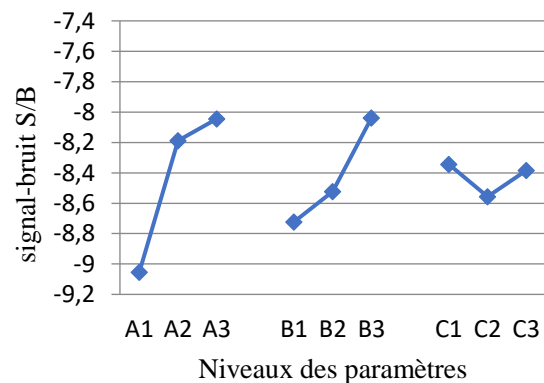


Figure 6. Rapport signal-bruit (S/B) « mode calandre ».

Les tableaux 4 et 5 ci-dessous spécifiant les valeurs maximales du rapport signal/bruit (S/B).

Niveaux	A	B	C
1	-10,3251	-13,0788	-12,4734
2	-13,2770	-12,7722	-12,9335
3	-14,5797	-12,3306	-12,7749
Maximum	-10,3251	-12,3306	-12,4734

Tableau 4. Valeurs maximales du rapport signal-bruit (S/B) "mode serpent" "

Niveaux	A	B	C
1	-9,0545	-8,7239	-8,3448
2	-8,1871	-8,5225	-8,5571
3	-8,0441	-8,0394	-8,3839
Maximum	-8,0441	-8,0394	-8,3448

Tableau 5. Valeurs maximales du rapport signal-bruit (S/B) "mode calandre" "

En analysant la figure 3, il est clair que, d'une part, l'efficacité moyenne de l'échangeur de chaleur  $\eta$  est maximale pour les niveaux des paramètres A1, B3 et C1 pour le mode Serpentin, et A3, et B3 et C1 pour le mode calandre sur la figure 4 ; d'autre part, sur la figure 5 le rapport signal-bruit S/B est maximum pour les niveaux des paramètres A1, B3 et C1 pour le mode Serpentin, et A3, B3 et C1 pour le mode calandre figure 6. Comme le rapport signal-bruit S/B maximum signifie une meilleure caractéristique de qualité du processus, la combinaison optimale des niveaux de facteurs de contrôle est donc déterminée comme : A1B3C1 pour le mode Serpentin et A3B3C1 pour le mode calandre.

## 4.2 Méthode des Algorithmes Génétiques

Le problème de l'algorithme génétique a été résolu respectivement pour le mode Serpentin et calandre. Avec Toolbox dans Matlab, nous avons choisi le nombre de générations par défaut 50, le nombre d'individus 3. Les graphes sont illustrés sur la figure 7, la figure 8 en termes de valeurs de forme moyenne et meilleure (fitness value et mean value), au-delà de 25 générations les deux courbes se superposent indiquant le résultat optimum.

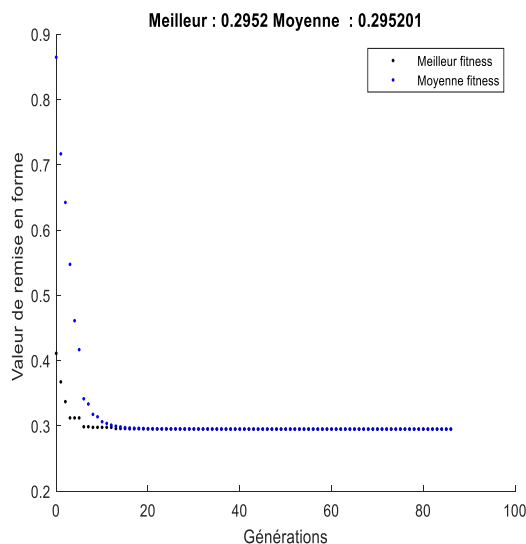


Figure 7. Génération pour l'optimisation de l'efficacité « mode Serpentin ».

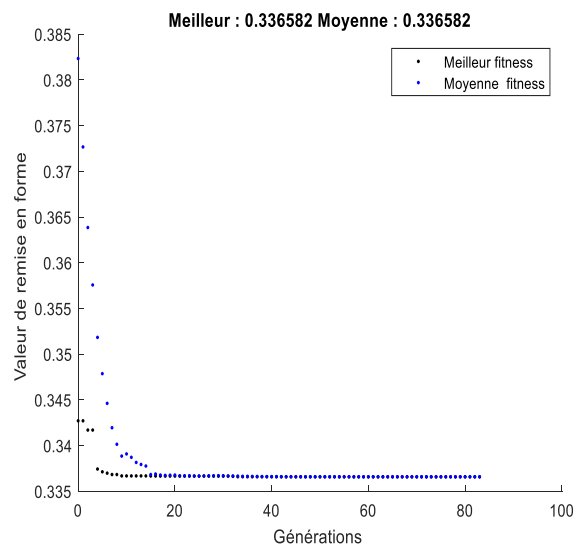


Figure 8. Génération pour l'optimisation de l'efficacité « mode calandre ».

Ces résultats sont obtenus à 88 itérations pour le mode serpent et à 83 itérations pour le mode calandre.

Les graphes illustrés sur la figure 9 et la figure 10 représentent l'optimisation en termes de Meilleur individu, pour les deux cas la variable 3 est dominante, vient en deuxième position la variable 1 et en dernière position la variable 2 pour le mode serpentin. Inversement pour le mode calandre, la variable 2 vient en deuxième position et la variable 1 en dernier.

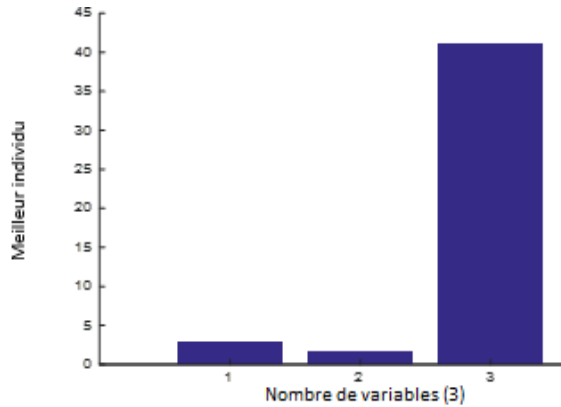


Figure 9. Meilleures valeurs des individus obtenues par AG « mode Serpentin ».

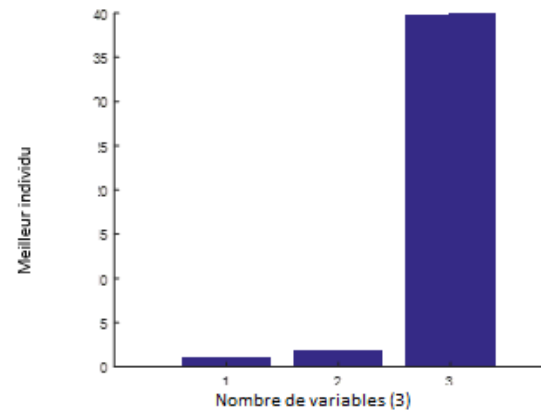


Figure 10. Meilleures valeurs des individus obtenues par AG « mode calandre ».

Les résultats de l'optimisation de l'échangeur de chaleur obtenus par la méthode de Taguchi et l'algorithme génétique ainsi que les valeurs fournies par les tests de l'expérimental, sont résumés dans le tableau 6 et le tableau 7 respectivement pour le mode serpentin et le mode calandre ci-dessous :

	Débit volumique (l/s)	Vitesse (tr/min)	Température (°C)	Efficacité moyenne
Expériences	1	100	50	0.3533
Méthode de Taguchi	1	100	40	0.2964
Algorithme Génétique	1	100	40	0,2952

Tableau 6. Résultats de l'optimisation par Taguchi et AG « mode Serpentin »

	Débit volumique (l/s)	Vitesse (tr/min)	Température (°C)	Efficacité moyenne
Expériences	3	100	60	0.4199
La méthode de Taguchi	3	100	40	0.4100
algorithme Génétique	3	100	40	0,33658

Tableau 7. Résultats de l'optimisation par Taguchi et AG « mode calandre »

## 5. Conclusion

Concernant l'analyse de Taguchi, le calcul ainsi réalisé fournit la même combinaison de niveaux A1B3C1 pour le mode Serpentin et A3B3C1 pour le mode calandre pour la valeur maximale soit en termes d'efficacité ou en termes de rapport signal/bruit. Les fonctions objectifs obtenues par l'algorithme génétique ont permis l'évaluation des générations pour l'optimisation de l'efficacité à environ 25 générations avec une valeur meilleure égale à 0.2952 pour le mode Serpentin et 0.3365 pour le mode calandre. En comparant entre les deux méthodes, on peut dire que la méthode Taguchi donne un optimum pour l'efficacité supérieur à celui donné par l'algorithme AG ( $0.2964 > 0.2952$ ) pour le mode serpentin. De même pour le mode calandre ( $0.41000 > 0.33658$ ). En plus, la méthode de Taguchi a fourni des résultats plus proches de ceux de l'expérimental comparé à la méthode AG. Et de là on conclut que l'efficacité Optimum de fonctionnement de l'échangeur de chaleur, dans ce cas, est obtenu en mode calandre pour un débit 3l/min, une vitesse de rotation 100, une température d'entrée chaude 40°C, elle vaut dans ce cas 41%.

## Références

- [1] J. Sampreeti,. Multi-objective optimization of design parameters of a shell & tube type heat exchanger using genetic algorithm, Int. J. Curr. Engine Techn, .3 (2013).
- [2] A. Benoit, Optimisation d'échangeurs de chaleur : Condenseur à calandre, réseau d'échangeur de chaleur et production d'eau froide, Thèse de l'Université Laval QUÉBEC, (2010).
- [3] A. Mariajayaprakash,.Optimisation of shock absorber process parameters using failure mode and effect analysis and genetic algorithm, J. Indus. Engine Int. Springer, Heidelberg, 9 (2013), 1-10.
- [4] S. Sanaye, Multi-objective optimization of shell and tube heat exchangers, Appl. Ther. Engine, 30 (2010), 1937–1945.
- [5] X. Gongnan, Application of a genetic algorithm for thermal design of fin-and-tube heat exchangers, Heat Trans. Engine., 29 (2008), 597-607.
- [6] A.Touati, Etude Technico-économique des échangeurs de chaleur à triple tube concentrique, Thèse de l'Université de BATNA, (2014).