

## Amélioration des transferts thermiques d'un évaporateur à ailette hélicoïdale externe: Structure à marches d'escalier

M. El Haimer<sup>1</sup>, A. Irhzo<sup>2</sup>, M. Faraji<sup>3\*</sup> et M. Najam<sup>3</sup>

<sup>1</sup> LSGP, Ecole Supérieure de Technologie, Université Hassan II, Casablanca, Maroc.

<sup>2</sup> Faculté des Sciences Ain Chock, Université Hassan II, Casablanca, Maroc

<sup>3</sup> Laboratoire de Physique des Matériaux, Microélectronique, Automatique et Thermique, LPMMAT  
Département de Physique, Faculté des Sciences Ain- Chock  
Université Hassan II, Casablanca, Maroc

(reçu le 18 Mars 2014 – accepté le 30 Mars 2015)

**Résumé** - Une nouvelle conception et une nouvelle technique de construction des tubes à paroi modifiée pour les évaporateurs à film ruisselant est proposée. Le nouveau tube à ailette hélicoïdale externe est construit par l'empilement de plusieurs plaques simples et identiques. Chaque plaque est, à l'origine, un disque individuel à orifice au centre et dont une partie est enlevée suivant un angle donné. L'empilement des plaques respecte un décalage régulier les uns des autres de manière à obtenir un tube cylindrique avec ailette hélicoïdale à marches d'escaliers, comme l'escalier en colimaçon. Chaque marche d'escalier agit, à la fois, comme promoteurs de turbulence au niveau du film ruisselant et comme facteur d'augmentation de la surface d'échange, tout deux, responsables de l'amélioration des transferts thermiques convectifs. L'étude hydrodynamique a permis d'établir des modèles simplistes des différents types d'écoulements. En régime d'échauffement, l'étude thermique a permis d'établir les variations du coefficient partiel de transfert thermique et de la hauteur partielle d'unité de transfert de chaleur avec le débit du film ruisselant et la densité des marches d'escalier. L'analyse des résultats expérimentaux a montré une croissante amélioration des transferts thermiques convectifs, à la fois, avec le débit du film et avec la densité des marches d'escalier. La dualité, existante pour les ailettes lisses, entre surface d'échange et coefficient convectif a disparu. La comparaison des performances thermiques entre tubes à ailettes avec et sans marches d'escalier, d'un côté, et tubes à ailettes optimisées, de l'autre côté, confirme le rôle important de la densité des marches d'escalier dans l'amélioration des transferts thermiques côté film.

**Abstract** - A new concept of construction for falling film evaporator's tubes with modified external wall are proposed. This new evaporator is not worked as a single piece; it is built of individual discs of which a section with a given angle is cut out. The discs are assembled with respect to others a regular gap such as to make a spiral staircase. Each step acts, both, as a turbulence promoter which remixes the streaming film and as an increasing heat exchange area factor, thus enhances the convective heat transfer. The hydrodynamic study allows establishing simple models for different regimes of streaming film. During the heating regime, the thermal study allows establishing variations of heat transfer coefficients and of height of transfer unit according to the flow rate film and to the steps density. The analysis of the experimental results shows both an increasing heat transfer enhancement with the flow rate film and with the steps density. The duality, characteristic of external spiral smooth fin tube, between heat exchange surface and heat transfer coefficient is disappeared. The thermal performances comparisons between external spiral fins with and without steps case, and between optimized spiral fins confirm the important role of steps density for heat transfer enhancement.

**Mots clés:** Echangeur - Ailette hélicoïdale - Densité de marches d'escalier - Coefficient partiel de transfert thermique - Hauteur partielle d'unité de transfert thermique.

---

\* farajimustapha@yahoo.fr

## 1. INTRODUCTION

Les échangeurs basés sur la technique du film ruisselant sont très répandus dans l'industrie et utilisés en tant qu'évaporateurs, condenseurs, absorbeurs, réacteurs, etc. Ces appareils ont connu un développement considérable sur le plan technologique ayant permis d'améliorer leurs performances. Il s'agit en général de nouvelles structures de surfaces d'échange permettant d'augmenter les flux de chaleur et d'améliorer les coefficients de transfert thermiques entre la paroi et le film ruisselant. Les structures des surfaces utilisées, pour cet objectif, peuvent être classées en trois catégories:

1- *Les microstructures*- Ce sont des rugosités appliquées à la paroi, par sablage ou autres, dont le rôle principal est d'influencer la mouillabilité de la paroi et d'éviter la formation des zones sèches quand le débit est trop faible ou le flux thermique est trop important.

2- *Les méso structures*- Ce sont des rainures ou grillages appliqués à la paroi et agissant comme promoteurs de turbulence, améliorant, ainsi, les transferts thermiques côté film.

3- *Les macrostructures*- La géométrie de la paroi est, totalement, modifiée et conçue de façon à augmenter la surface d'échange thermique par rapport à celle d'une paroi lisse et d'influencer l'écoulement pour le rendre turbulent en vue d'améliorer les transferts thermiques même à faible vitesse.

Les tubes cylindriques à ailettes hélicoïdales externes ou internes constituent une solution séduisante pour les macrostructures. Le liquide, à chauffer et à évaporer, ruisselle sous forme d'un film mince sur une ailette hélicoïdale enroulée autour d'un tube vertical cylindrique chauffé par un fluide caloporteur circulant à contre-courant.

Les études hydrodynamiques et thermiques, concernant les tubes à ailettes hélicoïdales internes et externes, ont fait l'objet de plusieurs travaux de recherches qui ont été discutés dans les références [1-12] et qui ont permis, d'une part, de montrer leur nombreux avantages géométriques, hydrodynamique et thermiques, d'autre part, de comparer leurs performances thermiques à celles des tubes cylindriques lisses, verticaux et de même diamètres de bases.

L'étude de l'influence de l'angle de pente axiale, pour les tubes à ailettes hélicoïdales externes et internes a mis en évidence une dualité entre un coefficient élevé de transfert convectif côté film et une surface d'échange thermique augmentée comme discuté par El-Haimer *et al.* [11] pour les ailettes hélicoïdales externes et par Schwarzer *et al.*, [2, 5] pour les ailettes hélicoïdales internes.

En effet, pour une hauteur donnée de tube, d'un côté, une ailette hélicoïdale à forte pente axiale permet un écoulement plus rapide, donc, turbulent et favorable aux transferts thermiques, mais elle offre une surface d'échange thermique faible. De l'autre coté, une ailette hélicoïdale à faible pente axiale permet un écoulement à faible vitesse, donc, défavorable aux transferts thermiques, mais elle offre une surface d'échange plus grande.

Pour enlever cette dualité entre surface d'échange augmentée et coefficient de transfert convectif élevé et obtenir un meilleur compromis entre eux, deux solutions sont possibles:

- La *première solution* est basée sur le dédoublement de la surface d'échange thermique de l'ailette hélicoïdale tout en gardant une forte pente axiale qui garantit un coefficient de transfert thermique élevé. Cette solution, étudiée dans la référence [11], a montré que le tube à double ailettes à forte pente axiale, placées en parallèle, présente un meilleur compromis pour cette dualité.

- La deuxième solution est basée sur l'amélioration des transferts thermiques, côté film, par la création de promoteurs de turbulence sur l'ailette hélicoïdale, siège du parcours du film ruisselant, tout en gardant une faible pente axiale qui garantit une surface d'échange thermique importante.

Le présent travail étudie, dans le cadre de la deuxième solution, une nouvelle macrostructure pour l'échangeur à ailette hélicoïdale externe et qui présente trois caractéristiques-

- L'ailette hélicoïdale externe et lisse est remplacée par une ailette hélicoïdale externe, de même pente axiale, mais, présentant des marches d'escalier, comme l'escalier en colimaçon. Les marches d'escalier devraient agir en tant que promoteurs de turbulence qui permettraient d'obtenir un écoulement turbulent favorable au transfert thermique convectif.

- L'ailette hélicoïdale externe à marches d'escalier offre une surface d'échange plus élevée, comparée à celle offerte par une ailette hélicoïdale lisse, de même pente axiale, de même diamètre de base et de même hauteur.

- L'ailette hélicoïdale externe à marches d'escalier est caractérisée par une construction simple

L'étude concerne l'influence des marches d'escalier sur l'hydrodynamique du film ruisselant, d'une part, et sur le coefficient de transfert thermique convectif partiel, côté film et la hauteur d'unité de transfert thermique partielle, d'autre part. Elle intéressera trois tubes à ailettes hélicoïdales à marches d'escalier qui ne diffèrent que par leurs densités de marches d'escalier, définies par le nombre de marches d'escalier par tour.

Une étude comparative, entre tubes à ailettes hélicoïdales avec et sans marches d'escalier, de même pente axiale, de même diamètre de base et de même hauteur, permet de confirmer l'excellent rôle des marches d'escalier dans l'amélioration des transferts thermiques, côté film. Une comparaison, basée sur le critère de  $HUT_f$ , entre tubes à ailettes hélicoïdales, thermiquement optimisées, est aussi présentée.

## 2. PRESENTATION DE L'ECHANGEUR A MARCHES D'ESCALIER

### 2.1 Principe de la nouvelle technique de construction de l'échangeur à marches d'escalier

Le principe de la nouvelle technique de réalisation consiste à construire le tube à marches d'escalier par empilement d'un grand nombre de plaques à orifices circulaires, toutes identiques, de forme simple et facile à construire en grande série. Chaque plaque est, à l'origine, un disque individuel en graphite présentant un orifice circulaire au centre et dont une partie est enlevée suivant un angle donné.

La figure 1 donne une représentation schématique d'une telle plaque et le **Tableau 1** regroupe ses différents paramètres géométriques.

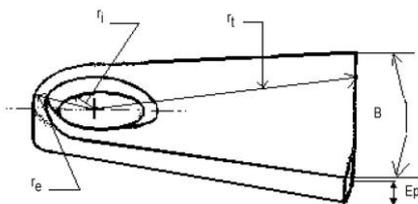


Fig. 1: Forme géométrique d'une plaque

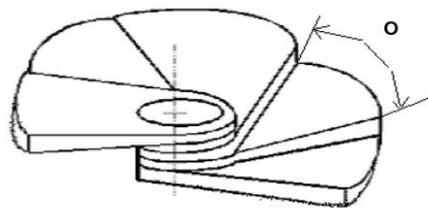


Fig. 2: Empilement des plaques

**Tableau 1:** Paramètres géométriques caractérisant une plaque

Angle de surface B (°)	Rayon intérieur de l'origine: $r_i$ (mm)	Rayon extérieur de l'orifice: $r_e$ (mm)	Rayon de tête $r_t$ (mm)	Epaisseur $E_p$ (mm)
140	20	25	70	4

La figure 2 illustre l'empilement de plaques qui respecte un décalage régulier de manière à former des marches d'escalier, comme l'escalier en colimaçon. La génératrice résultante est une hélicoïdale caractérisée par-

- une densité de marches d'escalier-  $d$ , définie par le nombre de plaques empilées par tour.
- une pente axiale équivalente caractérisant l'inclinaison axiale de l'ailette.

Les plaques présentent, chacun, un orifice circulaire de 40 mm de diamètre et leur empilement crée un espace cylindrique permettant le passage du fluide caloporteur. Des joints toriques sont installés entre les plaques assurant leur étanchéité.

## 2.2 Paramètres géométriques de l'empilement formant l'ailette à marches d'escalier

Les principales caractéristiques géométriques de l'empilement à marches d'escalier sont:

- Nombre de plaques total-  $n_p$
- Nombre de plaques empilées par tour ou densité de marches d'escalier-  $d$  ;
- Angle séparant deux marches successives d'escalier-  $O$  ;
- Angle de pente axiale équivalente, caractérisant l'inclinaison axiale de l'ailette-  $\theta$  ;
- Hauteur de l'ailette à marches d'escalier-  $H$  .

La structure de l'ailette à marches d'escalier offre une surface plus grande que l'ailette lisse. Le facteur d'augmentation de surface  $F_a$ , définie par le rapport de la surface du tube à ailette avec marches d'escalier et celle du même tube à ailettes sans marches d'escalier, est supérieur à un.

**Tableau 2:** Paramètres géométriques de l'empilement des plaques pour trois densités de marches d'escalier

Empilement	$d$	$n_p$	$n_T$	$O$ (°)
Forte densité	12	125	10.4	30
Moyenne densité	7.2	125	17.36	50
Faible densité	3.4	125	36.44	105
Empilement	$\theta$ (°)	$F_a$	$H$ (mm)	
Forte densité	10	1.25	500	
Moyenne densité	7.5	1.12	500	
Faible densité	3.2	1.072	500	

La géométrie de l'échangeur à marches d'escalier peut être modifiée en changeant, uniquement, la valeur de la densité de marches d'escalier. Cette technique permet, à partir d'une seule maquette, d'obtenir plusieurs configurations qui ne diffèrent que par leurs densités de marches d'escalier. Trois maquettes à marches d'escalier sont expérimentées dont les paramètres géométriques sont regroupés au **Tableau 2**.

Le banc d'essai utilisé, pour les diverses expériences, permet:

- l'alimentation en fluide caloporteur (eau chaude);

- l'alimentation et la collecte du film ruisselant (eau froide);
- la mesure des températures en différents points de l'ailette (Thermocouples de type Chromel /Alumel);
- la mesure des débits massiques du caloporteur et du film ruisselant (Rotamètres à flotteur classiques).

### 3. ETUDE HYDRODYNAMIQUE DU FILM RUISSELANT

#### 3.1 Description des différents régimes d'écoulement

L'hydrodynamique du film ruisselant sur la surface extérieure des ailettes hélicoïdales, internes et externes, avec et sans marches d'escalier, est très complexe et encore peu étudié [2-6], [8], [11-12]. Les conditions hydrodynamiques du film ruisselant utilisent l'eau à la température ambiante et sous la pression atmosphérique. Elle ruisselle, par gravité, sur des ailettes hélicoïdales externes, tandis que le fluide caloporteur circule à contre-courant.

L'augmentation progressive du débit du film ruisselant, à l'entrée de l'échangeur à marches d'escalier, a permis d'identifier trois régimes d'écoulements différents-

- Régime 1- Régime sans débordement- A faible débit et, grâce aux marches d'escalier, le film ruisselle et mouille, progressivement, mais rapidement, toute la surface supérieure de l'ailette.

- Régime 2- Régime avec débordement- Pour une valeur critique du débit du film ruisselant, les actions combinées des marches d'escalier et de l'effet centrifuge de l'écoulement spiralé s'accroissent et permettent au film ruisselant de déborder, aussi, sur la surface inférieure de l'ailette. Grâce à la bonne mouillabilité du graphite, le film débordant reste en contact avec la paroi de l'ailette depuis les surfaces: supérieure, latérale et inférieure.

- Régime 3- Régime avec engorgement- Pour des débits très élevés, le phénomène de débordement devient très important et provoque l'éjection du film débordant à l'extérieur du tube.

Le **Tableau 3** résume les différents régimes d'écoulement et indique les valeurs des deux débits de transition pour trois maquettes expérimentales qui diffèrent par leurs densités de marches d'escalier.

**Tableau 3:** Débits critiques de transition

Maquettes expérimentales	Débits critiques de transition (g/l) (film ruisselant- eau à 298K)		
	Sans débordement	Avec débordement	Engorgement du fluide
Forte densité (12)	0	5	130
Moyenne densité (712)	0	7	110
Faible densité (3.4)	0	8	400

Grâce à un traceur, soigneusement, injecté dans l'écoulement et une caméra numérique de haute résolution les observations, visuelles et répétées, des différents régimes d'écoulement ont permis de dégager les points suivants-

- Les marches d'escalier créent une accélération du film et permettent sa bonne répartition sur les surfaces supérieures de l'ailette hélicoïdale qui se mouillent rapidement.

Par conséquent, le régime sans débordement avec zones sèches, apparaissant sur les ailettes hélicoïdales lisses, cité en références [3-4], [6], [11-12], disparaît rapidement pour laisser place au régime sans débordement et sans zones sèches qui constitue le régime 1. Les marches d'escalier sont donc un facteur important influençant la mouillabilité de la paroi.

- Au niveau d'une marche d'escalier, la chute du film ruisselant provoque son accélération locale et favorise la création d'une turbulence dès que le débit est suffisant. Cette turbulence, favorable aux transferts thermiques, se propage, progressivement, comme une onde, sur une partie de la surface supérieure de l'ailette et précipite son débordement sur la surface inférieure. Par conséquent, le premier débit critique de transition vers le régime avec débordement devient faible.

- Grâce à la bonne mouillabilité du graphite, le film ruisselant reste en contact avec les parois quand il chute au niveau d'une marche d'escalier, ceci éviterait la détérioration locale des transferts thermiques.

- La surface maximale mouillée par le film ruisselant est obtenue au régime 2. Ce dernier sera exploité, par conséquent, dans tous les essais d'échauffement.

## 3.2 Modèles d'écoulements simplistes

### 3.2.1 Modèle simpliste d'écoulement en régime sans débordement

Grâce à un traceur, utilisé à la surface libre du film ruisselant, les observations, répétées de l'écoulement hélicoïdal ont montré-

- Au niveau de la surface supérieure de la plaque horizontale, l'écoulement hélicoïdal fait avancer les gouttes liquides du traceur avec une légère déviation vers l'extrémité extérieure de la plaque sous l'effet des forces centrifuges, favorisant ainsi le ré-mélangeage radiale du film ruisselant. L'avancement de l'écoulement, à ce niveau, peut être modélisé par un écoulement piston turbulent.

- Au niveau d'une marche d'escalier, les gouttes liquides du traceur entre dans la turbulence créée par la chute du film et se mélangent parfaitement. A ce niveau, l'écoulement, peut être modélisé par un mélangeur parfait.

En conclusion, en régime sans débordement, l'écoulement sur une ailette avec marches d'escalier peut être modélisé par une cascade d'écoulements pistons et de mélangeurs parfaits, comme illustré, en **a-**, dans une coupe en développement bidimensionnel représentant l'hydrodynamique du film sur une ailette à marches d'escalier à faible densité.

Il est évident de remarquer, d'après la figure 3, que la densité de marches d'escalier est liée à la pente axiale équivalente de l'ailette hélicoïdale, de même, plus la densité de marches d'escalier est grande, plus l'effet des écoulements pistons se réduit et celui des mélangeurs parfaits augmente.

A la limite, quand la densité de marches d'escalier devient forte pour un tube donné, ce dernier se comporte, principalement, comme un mélangeur parfait unique, comme illustré en **b-**,...

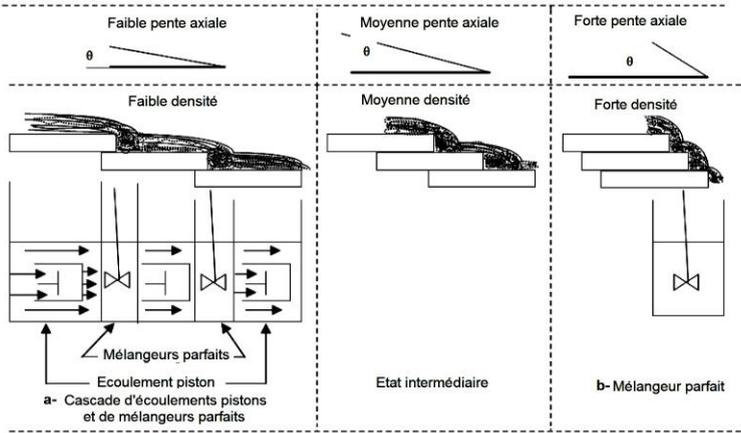


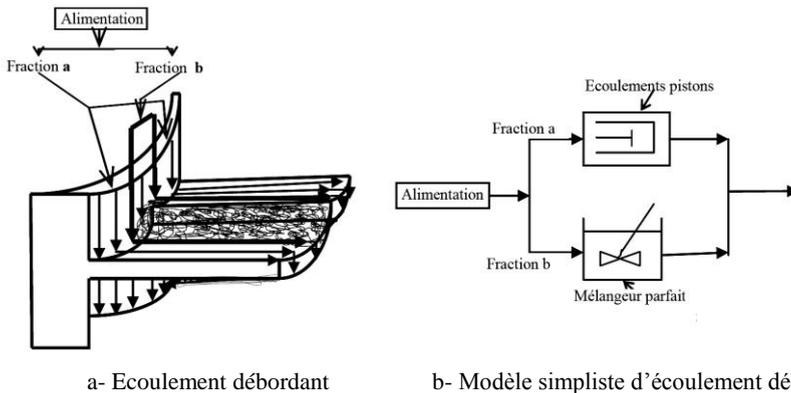
Fig. 3: Ecoulement du film sans débordement sur des marches d'escalier à différentes densités et modèles simplistes

### 3.2.2 Modèle simpliste d'écoulement en régime avec débordement

L'écoulement avec débordement [11] est interprété par la superposition de deux écoulements simples:

- Un écoulement, spiralé avec débit constant, circulant, uniquement, sur la surface supérieure des plaques et leurs marches d'escalier. C'est l'écoulement décrit en régime sans débordement.
- Un écoulement débordant de débit variable avec le débit d'alimentation.

L'observation d'un traceur, injecté, soigneusement, à la surface libre du film débordant, indique que ce dernier se partage en deux fractions débordantes. Une fraction (a), qui déborde directement sur les surfaces supérieures des plaques horizontales, suit une trajectoire quasi verticale passant par les surfaces latérales et inférieures. Son hydrodynamique peut être modélisée par des écoulements pistons radiaux placés en parallèles. Une fraction (b), qui rencontre les marches d'escalier, entre en turbulence et déborde directement sur les surfaces latérale et inférieure.



a- Ecoulement débordant

b- Modèle simpliste d'écoulement débordant

Fig. 4: Schéma et modèle simpliste d'écoulement débordant

Son écoulement peut être modélisé par des mélangeurs parfaits en parallèles. A titre d'exemple, la figure 4 illustre les schémas de l'écoulement débordant sur une partie de

l'aillette avec une seule marche d'escalier (schéma 4a) et du modèle simpliste correspondant (schéma 4b).

La superposition des deux écoulements spiralé et débordant crée le mouvement complexe du film.

## 4. ETUDE DES TRANSFERTS THERMIQUES

Toutes les manipulations, en régime d'échauffement sont conduites avec un débit du caloporteur  $M_c = 420\text{g/s}$  correspondant au Nombre de Reynolds  $Re_c = 11000$ . A cette valeur, le régime d'écoulement établi à l'intérieur du tube de base est turbulent, ce qui permettrait de négliger l'influence de la résistance thermique convective côté caloporteur et d'étudier l'influence de la densité des marches d'escalier et de l'hydrodynamique sur les transferts thermiques côté film.

### 4.1 Etude du transfert thermique partiel côté film

#### 4.1.1 Coefficient partiel de transfert thermique côté film

Le coefficient partiel de transfert thermique décrit un phénomène local d'échange thermique entre ailette et film ruisselant. Il permet d'évaluer les améliorations du transfert thermique convectif dues à des écoulements adéquats. Les deux méthodes utilisées, pour la détermination de la conductance partielle de transfert thermique, sont la méthode de Wilson [14, 15] et la méthode directe [15] et qui sont discutées dans les références [1-3, 6, 7, 9, 11-12].

Le choix de la méthode directe est adopté pour les mêmes raisons citées en références [7, 11 et 12] dont deux points sont retenus:

1 - La méthode directe n'impose aucun modèle pour l'aillette hélicoïdale avec ou sans marches d'escalier.

2 - La méthode directe ne fait pas d'hypothèses comportementales sur les transferts thermiques dans le caloporteur et dans le corps de l'aillette. Il consiste à mesurer, directement, les températures de la paroi extérieure de l'aillette et du cœur du film ruisselant à l'entrée et à la sortie de la maquette et à appliquer la loi de Newton [13] pour le flux thermique transféré entre la paroi extérieure et le film ruisselant.

Le coefficient partiel de transfert thermique entre paroi extérieure et film ruisselant est donné [13] par:

$$h_f = \frac{Q}{A_f \times \Delta T_{ml(p-f)}} \quad (1)$$

$\Delta T_{ml(p-f)}$  est définie [13] par-

$$\Delta T_{ml(p-f)} = \frac{(T_{pe} - T_{fe}) - (T_{ps} - T_{fs})}{\ln \frac{(T_{pe} - T_{fe})}{(T_{ps} - T_{fs})}} \quad (2)$$

Sur la figure 5, sont représentées les variations du coefficient partiel de transfert thermique, côté film, en fonction du débit massique du film ruisselant et de la densité de marches d'escalier.

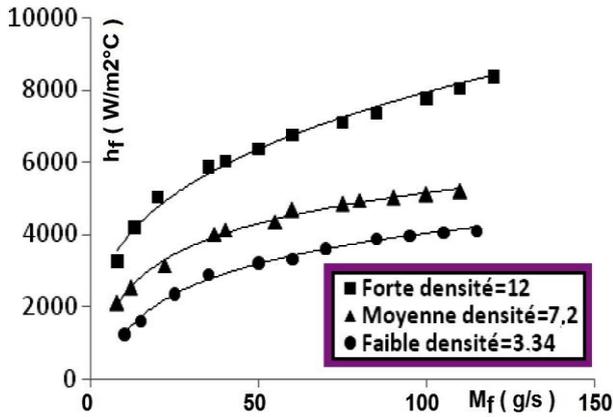


Fig. 5: Influence de la densité de marches d'escalier sur  $h_f$

L'analyse de la figure 5 permet de dégager les points suivants:

1- Aux faibles débits du film ruisselant allant jusqu'à 40 g/s et pour les trois tubes à densités de marches d'escalier, les valeurs du coefficient partiel de transfert thermique sont fortement croissantes.

Par conséquent, les marches d'escalier, jouant le double rôle de facteur influençant la mouillabilité de la paroi et de promoteurs de turbulence, sont très efficaces dans cette gamme de faibles débits et compensent l'effet négatif de la faible vitesse d'écoulement.

2- Aux grands débits, les comportements thermiques des trois tubes se distinguent:

- Pour les tubes à moyenne et faible densités de marches d'escalier, l'amélioration des valeurs de la conductance thermique partielle s'atténue, légèrement, ceci s'explique par la surépaisseur du film débordant qui prend de l'importance et par les valeurs faibles et moyennes des densités de marches d'escalier qui restent, semble-t-il, insuffisantes pour maintenir une forte croissance pour  $h_f$ .

- Pour le tube à forte densité de marche d'escalier, les valeurs de la conductance thermique partielle continuent leur forte croissance, même aux grands débits, grâce aux actions, combinées, des marches d'escalier à forte densité, en tant que promoteurs de turbulence, et de l'effet centrifuge de l'écoulement hélicoïdale, responsable du rémélangeage radiale du film, [11].

En effet, l'écoulement est modélisé par une association d'écoulements pistons et de mélangeurs parfaits. Quand la densité de marches d'escalier est très grande, les effets de l'écoulement piston se réduisent au détriment des effets d'écoulement mélangeur parfait qui prennent de l'importance.

Par conséquent, le tube à forte densité de marche d'escalier se comporte, principalement, comme un mélangeur parfait garantissant une forte croissance pour le coefficient partiel de transfert thermique côté film, même aux grands débits.

En moyenne, l'ailette à forte densité de marches d'escalier transfère, respectivement, 51.2 % et 102.7 % de plus que l'ailette à moyenne et faible densités de marches d'escalier.

Le **Tableau 4** résume le classement des trois tubes suivant le critère du coefficient partiel  $h_f$  et place le tube à forte densité de marches d'escalier au premier rang, à moyenne densité au deuxième rang et à faible densité au dernier rang.

**Tableau 4:** Classement des trois tubes suivant le critère  $h_f$ 

Classement suivant $h_f$	1 <sup>er</sup>	2 <sup>ème</sup>	3 <sup>ème</sup>
<b>Tube à densité de marches d'escalier</b>	Forte = 12	Moyenne = 7.2	Faible = 3.43

#### 4.1.2 Hauteur partielle d'unité de transfert côté film

Le coefficient de transfert thermique côté film ne suffit pas comme base pour comparer des tubes à géométries modifiées, car il ne prend pas en considération l'augmentation de la surface d'échange par rapport au volume de l'échangeur.

Par ailleurs, la hauteur partielle d'unité de transfert thermique côté film est une grandeur importante puisqu'elle évalue la 'difficulté' des transferts thermiques entre la paroi de l'ailette et le film ruisselant. Il faut réaliser une hauteur de  $HUT_f$  mètres d'échangeur pour transférer une unité d'énergie au fluide receveur. Par conséquent, un échangeur est d'autant plus efficace que sa  $HUT_f$  est faible.

Elle est définie, pour une hauteur  $H$  donnée du tube à ailette, par la relation [13]:

$$HUT_f = \frac{H \cdot M_f \cdot C_p}{h_f \cdot A_f} \quad (3)$$

La comparaison des échangeurs thermiques, utilisant cette grandeur, est très significative puisque sa définition, d'après l'équation (3), intègre, à la fois, la surface mouillée de l'ailette  $A_f$  qui est la surface effective d'échange thermique et le coefficient partiel de transfert convectif côté film  $h_f$ .

La figure 6 présente les variations de la hauteur partielle d'unité de transfert en fonction du débit massique du film ruisselant et de la densité de marches d'escalier.

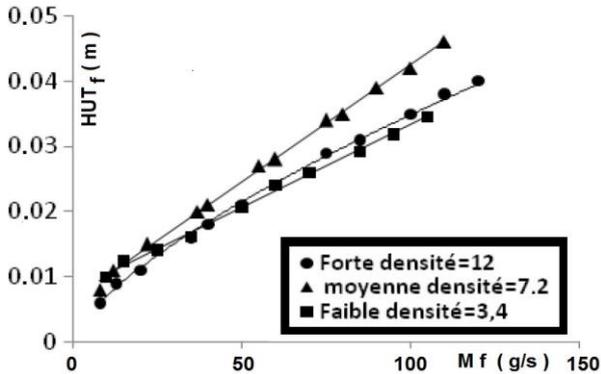


Fig.6 : Influence de la densité de marches d'escalier sur  $HUT_f$

L'analyse de la figure 6 montre que:

- Pour les deux tubes à faible et moyenne densités de marches d'escalier, les valeurs de  $HUT_f$  augmentent linéairement avec le débit massique du film ruisselant. Cette linéarité s'explique classiquement d'après l'équation (3) par les valeurs quasi-constantes, aussi bien, de la conductance partielle côté film  $h_f$  que de la surface mouillée de l'ailette  $A_f$ , en régime de débordement.

- Pour le tube à forte densité de marche d'escalier, les valeurs de  $HUT_f$  augmentent avec le débit massique du film ruisselant suivant une loi de puissance 0.7. Ce résultat est justifié par la croissance continue de  $h_f$  même aux grands débits.

- Pour les deux tubes à forte et à faible densités de marches d'escalier, les valeurs de  $HUT_f$  sont, sensiblement, égales. Pour des débits dépassant 50 g/s, elles sont, nettement, inférieures à celles du tube à moyenne densité de marches d'escalier, d'environ, 14.6. Par conséquent, les deux tubes à forte et à faible densités de marches d'escalier se classent, tous les deux, au premier rang.

On note que la dualité, entre la surface d'échange et le coefficient convectif, n'existe plus pour les tubes à marches d'escalier. Ce résultat, important, peut être expliqué par la présence des marches d'escalier qui jouent double rôle: d'une part, elles créent la turbulence qui améliore le transfert thermique côté film, d'autre part, elles augmentent la surface d'échange de l'ailette. En effet,

- Pour le tube à forte densité de marches d'escalier, les valeurs du coefficient partiel convectif  $h_f$  sont élevées et dépassent, en moyenne, celles du tube à faible densité de marches d'escalier de 109 %. Il semble que cette forte amélioration de  $h_f$  compense la faible augmentation de la surface d'échange, due à la forte densité de marches d'escalier et qui ne dépasse pas 7 % par rapport à une ailette lisse de manière à obtenir un produit  $A_f \times h_f$  très élevé permettant, d'après l'équation (3), de réduire les valeurs de  $HUT_f$ .

- Pour le tube à faible densité de marches d'escalier, la surface d'échange est, relativement, très élevée et dépasse celle du tube à forte densité de marches d'escalier d'environ 106.6 %. Il semble que cette forte augmentation de la surface d'échange compense la faible augmentation du coefficient partiel de transfert thermique  $h_f$ , de manière à obtenir, aussi, un produit  $A_f \times h_f$  très élevé, réduisant les valeurs de  $HUT_f$ .

En conclusion, le double rôle joué par les marches d'escalier en tant que promoteurs de turbulence, principalement, pour le tube à forte densité de marches d'escalier et en tant que facteur d'augmentation de surface, principalement, pour le tube à faible densité de marches d'escalier permet, à ces deux tubes d'acquérir, ensemble, un produit  $A_f \times h_f$  élevé permettant d'obtenir des valeurs de la hauteur d'unité de transfert partielle très faibles et comparables.

Le **Tableau 5** résume le classement des trois tubes suivant le critère  $HUT_f$ .

**Tableau 5:** Classement des trois tubes suivant le critère  $HUT_f$

Classement suivant $HUT_f$	1 <sup>er</sup>	2 <sup>ème</sup>	3 <sup>ème</sup>
<b>Tube à densité de marches d'escalier</b>	Forte = 12	Moyenne = 7.7	Faible = 3.43

#### 4.2 Etude comparative des ailettes avec et sans marches d'escalier

Pour mettre en évidence l'importance des marches d'escalier sur l'amélioration des transferts thermiques côté film, une étude comparative des caractéristiques thermiques partielles entre ailettes hélicoïdales avec et sans marches d'escalier et présentant la même pente axiale équivalente et la même hauteur est effectuée.

#### 4.2.1 Comparaison du coefficient partiel de transfert thermique côté film.

La figure 7 présente les variations du coefficient partiel de transfert thermique côté film en fonction du débit massique du film ruisselant, pour deux échangeurs à ailettes hélicoïdales avec et sans marches d'escalier. Le tube à marches d'escalier présente une forte densité de marches d'escalier  $d=12$  et qui correspond à une pente axiale équivalente à  $10^\circ$ . Le tube, sans marches d'escalier, est caractérisé par la même pente axiale égale ( $10^\circ$ ) et la même hauteur (500 mm).

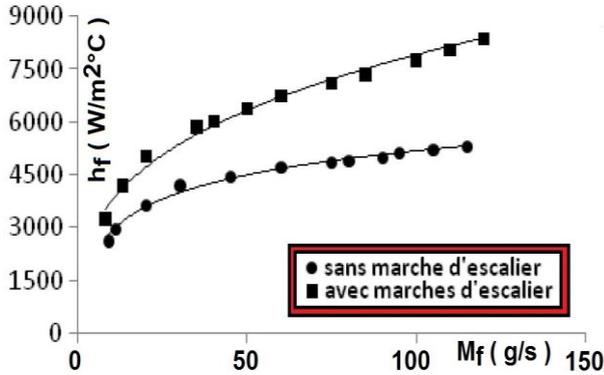


Fig. 7: Comparaison de  $h_f$  entre deux ailettes

avec et sans marches d'escalier de même pente axiale ( $10^\circ$ )

L'analyse de la figure 7 montre que:

- Aux faibles débits du film ruisselant allant jusqu'à 40 g/s, les valeurs de  $h_f$ , pour les deux tubes augmentent, de façon très significatives. Toute fois, les valeurs de  $h_f$ , relatives à l'ailette avec marches d'escalier présentent, en moyenne, une amélioration de 48 % par rapport à celles de l'ailette sans marches d'escalier.

- Aux grands débits du film, l'amélioration des valeurs de  $h_f$ , pour le tube à forte densité de marches d'escalier, continue de croître grâce à l'effet des marches d'escalier, alors que celle relative au tube sans marches d'escalier, commence à s'atténuer progressivement pour se stabiliser et devenir quasi constante, à cause de l'épaisseur du film. L'écart entre les valeurs de  $h_f$ , pour ces deux tubes, s'agrandit et atteint, à titre d'exemple, pour un débit dépassant 110 g/s un pourcentage moyen de 55 %.

Ce constat conduit à la conclusion suivante:

- Les actions, combinées, des marches d'escalier, en tant que promoteurs de turbulence, et de l'effet centrifuge de l'écoulement hélicoïdal, responsable du ré-mélangeage radiale du film [11] sont très efficaces dans l'amélioration de  $h_f$ , dans toute la gamme des débits du film ruisselant, en régime avec débordement, et semblent, bien, compenser l'inconvénient de la surépaisseur du film aux grands débits. Le tube à forte densité de marches d'escalier se comporte comme un vrai mélangeur parfait.

- L'effet du ré-mélangeage radial seul, dû à l'écoulement hélicoïdal, expliqué en référence [11], et responsable de l'amélioration du coefficient partiel  $h_f$ , pour l'ailette sans marches d'escalier, diminue légèrement avec l'augmentation du débit du film, et semble être insuffisant pour compenser, tout seul, l'effet négatif de la surépaisseur du

film ruisselant aux grands débits, ce qui explique la baisse progressive de l'amélioration de  $h_f$  pour l'ailette sans marches d'escalier.

#### 4.2.2 Comparaison des hauteurs partielles d'unité de transfert thermique côté film.

La figure 8 présente les variations de la hauteur d'unité de transfert thermique partielle côté film en fonction du débit massique du film ruisselant, pour deux échangeurs à ailettes hélicoïdales, de même hauteur, avec et sans marches d'escalier et présentant, respectivement, une forte densité de marches d'escalier ( $d=12$ ) et une forte pente axiale égale à  $10^\circ$ .

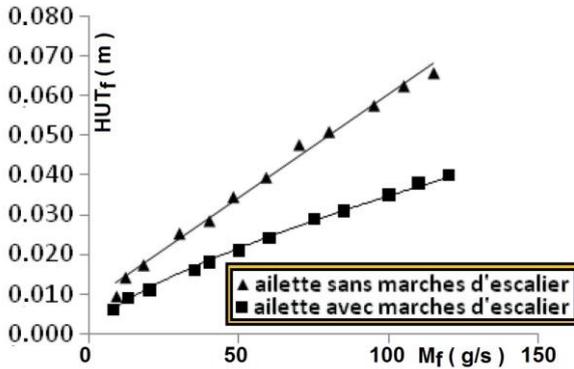


Fig. 8: Comparaison de  $HUT_f$  entre deux ailettes

avec et sans marches d'escalier de même pente axiale ( $10^\circ$ )

L'analyse de la figure 8, montre que:

- Les valeurs de la hauteur partielle d'unité de transfert thermique, pour les deux tubes avec et sans marches d'escalier, augmentent avec le débit du film ruisselant, traduisant, ainsi, une difficulté croissante du transfert thermique côté film, due essentiellement à l'augmentation de l'épaisseur du film ruisselant aux grands débits.

- Les valeurs de  $HUT_f$ , relatives au tube à forte densité de marches d'escalier, sont inférieures à celles relatives au tube sans marches d'escalier. A titre d'exemple, sur une gamme de débits entre  $10 \text{ g/s}$  et  $110 \text{ g/s}$ , elles sont inférieures, en moyenne, de 61%, marquant une amélioration moyenne de la qualité de transfert thermique, due essentiellement à la présence des marches d'escalier.

- Aux grand débits du film ruisselant, les valeurs de  $HUT_f$ , des deux tubes avec et sans marches d'escalier s'écartent les uns des autres. En effet, celles du tube avec marches d'escalier régressent suivant une loi de puissance 0.7 tandis que celles du tube sans marches d'escalier continuent de croître linéairement. Ce constat confirme, d'une part, l'hypothèse qui qualifie le tube à forte densité de marches d'escalier comme un vrai mélangeur parfait favorisant les transferts thermiques, d'autre part, l'hypothèse que la forte pente axiale, toute seule, et sans marches d'escalier, reste insuffisante pour compenser la dégradation des transfert thermiques causée par la sur épaisseur du film ruisselant aux grands débits.

#### 4.3 Comparaison des ailettes, thermiquement, optimisées

L'ailette thermiquement optimisée est celle caractérisée par un produit  $A_f \times h_f$  élevé qui garantit, d'après l'équation (3), des valeurs faibles de  $HUT_f$ .

Les tubes à ailettes à forte et à faible densités de marches d'escalier, ainsi que le tube à double ailette à forte pente axiale, décrit et étudié en référence [11], satisfont tous cette condition.

La figure 9 présente les variations de la hauteur d'unité de transfert thermique partielle côté film, en fonction du débit massique du film ruisselant, pour ces trois tubes à ailettes hélicoïdales thermiquement optimisées.

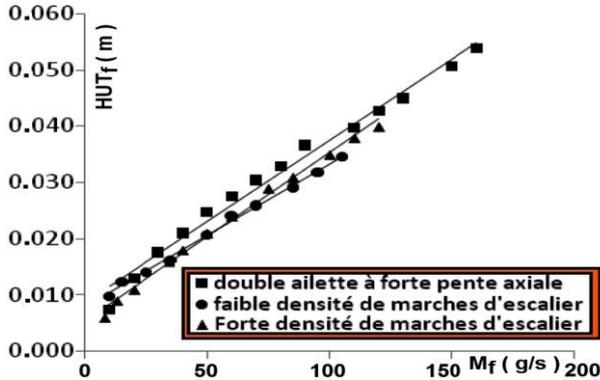


Fig. 9: Comparaison des  $HUT_f$  pour des ailettes thermiquement optimisées

L'analyse de la figure 9 montre que les valeurs de la hauteur partielle d'unité de transfert thermique, pour les trois tubes à ailettes hélicoïdales thermiquement optimisées, se trouvent, globalement, regroupées ensemble dans le même nuage de points expérimentaux. En première approximation, les trois tubes à ailettes optimisées peuvent être considérés équivalents des points de vue performance thermique et compacités géométriques.

Mais, l'analyse, précise de la figure 9 montre qu'il existe une très légère distinction pour les tubes à forte et faible densités de marches d'escalier dont les valeurs sont légèrement faibles par rapport à celles du tube à double ailette sans marches d'escalier.

Ce résultat indique il y a une légère amélioration des transferts thermiques pour les tubes à forte et à faible densités de marches d'escalier, ne dépassant pas 16 % par rapport au tube à double ailette hélicoïdale. Par conséquent, les tubes à forte et faible densité de marches d'escalier restent plus intéressants et de plus ils jouissent des avantages suivants:

- Construction facile qui se fait par simple empilement d'un certain nombre de plaques.
- Souplesse permettant de varier le nombre de plaques et/ou la densité de marches d'escalier.
- Entretien et changement facile des plaques défectueuses.

## 5. CONCLUSION

Cette étude a permis de montrer l'impact direct et favorable des marches d'escalier, créées dans l'ailette hélicoïdale, particulièrement, leur densité sur l'hydrodynamique du film ruisselant et sur les transferts thermiques convectifs partiels, en régime d'échauffement.

L'hydrodynamique du film est modélisée par des associations d'écoulements pistons et d'écoulements mélangeurs parfaits. Ces derniers prennent de l'importance avec l'augmentation la densité des marches d'escalier.

Les transferts thermiques sont très améliorés par l'augmentation de la densité des marches d'escalier. Quand celle-ci passe de 7.2 à 12, la conductance partielle de transfert thermique augmente, en moyenne, de 55 %. Le critère utilisant la grandeur  $HUT_f$  classe les tubes à forte et à faible densités de marches d'escalier au premier rang.

Par conséquent, la dualité, existante pour les ailettes lisses, entre surface d'échange et coefficient partiel de transfert convectif côté film a disparu. Le tube avec marches d'escalier a montré une amélioration moyenne de 55 % pour  $h_f$  et une baisse moyenne de 61 % pour  $HUT_f$  par rapport au même tube sans marches d'escalier.

La comparaison de trois tubes à ailettes hélicoïdales thermiquement optimisées indique qu'il y a une légère amélioration des transferts thermiques pour les tubes à forte et à faible densités de marches d'escalier par rapport au tube à double ailette hélicoïdale d'environ 16 %.

L'ailette à marches d'escalier est première solution basée sur la création de promoteurs de turbulence sur le parcours du film ruisselant. Une deuxième solution, permettant d'améliorer d'avantage les performances des tubes à ailettes, est d'utiliser une double ailette à marches d'escalier à partir de l'empilement décalé de plaques en forme de papillon.

Une troisième solution s'intéresserait à l'élaboration d'un modèle mathématique rigoureux liant, à la fois, la géométrie de l'ailette avec ses marches d'escalier simple ou double, l'écoulement du film ruisselant et les transferts thermiques.

## NOMENCLATURE

$A_f$ , Surface d'échange thermique côté film, $m^2$	$h_f$ , Coefficient de transfert thermique partiel côté film, $W/m^2K$
$C_p$ , Chaleur massique de l'eau, $W/kg.K$	$d$ , Densité de marches d'escalier
$F$ , Facteur de correction	$F_a$ , Facteur d'augmentation de surface
$E_p$ , Epaisseur de la plaque, mm	$H$ , Hauteur du tube, mm
$B$ , Angle de surface de la plaque, $^\circ$	$M_c$ , Débit massique du caloporteur, $kg/s$
$Q$ , Flux thermique moyen transféré, $W$	$n_t$ , Nombre de tour
$n_p T$ , Nombre de plaques par tour	$n_p$ , Nombre de plaques
$M_f$ , Débit massique du film, $kg/s$	$r_t$ , Rayon de tête de la plaque, mm
$HUT_f$ , Hauteur partielle d'unité de transfert thermique, m	$O$ , Angle séparant deux marches d'escalier successives, $^\circ$
$\theta$ , Angle de pente axiale équivalente, $^\circ$	$Re_c$ , Nombre de Reynolds caloporteur
$r_i$ , Rayon intérieur de l'orifice circulaire de la plaque, mm	$r_e$ , Rayon extérieur de l'orifice circulaire de la plaque, mm
$T_f$ , Température du film ruisselant, $K$	$T_p$ , Température de la paroi, $K$
$e$ : Entrée échangeur	$s$ : Sortie échangeur
$\Delta T_{ml} (p-f)$ , Température moyenne logarithmique entre paroi et film, $K$	

## REFERENCES

- [1] H. Le Goff, A.Y. Soetrisnanto, B. Schwarzer and P. LeGoff, 'A New Falling Film Evaporator with Spiral Fins', The Chemical Engineering Journal, Vol. 50, N°3? pp. 169 - 171, 1996.
- [2] B. Schwarzer, M. Semnani Rahbar and P. Le Goff, 'A Spiral Fin Tube: A Novel Type of Falling Film heat and Masse Exchanger', Proceedings of the Eurotherm Seminar N°33, Recent Developments in Heat Exchanger Technology, Vol. 1, pp. 215 – 221, Paris, France, 13-14 October, 1993.
- [3] B. Schwarzer, M.S. Rahbar and P. Le Goff, 'A Novel Type of Falling Film Heat and Mass Exchanger', International Absorption Heat Pump Conference, New-Orleans, LA, USA, July 19 - 24, 1994.
- [4] M. El-Haimer, P. Le Goff, A. Soetrisnanto and M. Barkaoui, 'Un nouvel évaporateur à film ruisselant sur spirale externe, Essais hydrodynamiques'. Congrès Maghrébin de Génie des Procédés, Gabès, Tunisie, 1994.
- [5] S. Bessenet, V. Renaudin, J.P. Leclaire and J.M. Hornut, 'RTD studies in a Falling Film Graphite Evaporator with Internal Spiral Fins: Influence of the geometry', The Canadian Journal of Chemical Engineering, Vol.78, N°3, pp. 486 - 494, 2000.
- [6] B. Schwarzer, S. Mojtaba and H. Le Goff, 'Film Ruisselant dans un Tube à Ailette Spirale Intérieure', 4<sup>ième</sup> Congrès Français de Génie des Procédés, Grenoble, France, 21-23, Septembre1993.
- [7] M. El-Haimer, M. Barkaoui, P. Le Goff, A. Soetrisnanto and A. Irhzo, 'Un Nouvel Evaporateur à Film Ruisselant sur Spirale Externe, Essais d'échauffement', International Thermal Energy and Environment Congress, ITEEC 97, Marrakech, June 9-12, June1997.
- [8] Z. Meddeb and M.R. Jeday, 'Etude Expérimentale et Théorique de l'Écoulement sur des Ailettes Spirales', 4<sup>èmes</sup> Journées sur les Ecoulements et les Transferts, Hammamet, 2002.
- [9] Z. Middeb, M.R. Jeday and S. Harman, 'Flux Thermique et Coefficients de Transfert Global et Partiel d'un Echangeur à Ailette Spiralee en Graphite', Mécanique et Industries, Vol. 5, N°5, pp. 519 -527, 2004.
- [10] Z. Meddeb et M.R. Jeday, 'Modélisation du Début de l'Evaporation dans un Nouvel Echangeur/Evaporateur à Ailettes Spirales en Graphite', Journal Maghrébin de Physique, Vol. 2, N°2, pp. 1-12, 2003.
- [11] M. El Haimer, M. Faraji et M. Najam, 'Etude Expérimentale de l'Hydrodynamique et du Transfert Thermique d'un Evaporateur à Ailette Hélicoïdale Externe : Influence de la Géométrie de l'Ailette', Revue des Energies Renouvelables, Vol. 16, N°2, pp. 177 - 200, 2013.
- [12] A. Soetrisnanto, 'Un Nouvel Evaporateur à Film Ruisselant Sur Ailette Spiralee', Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy, France, 1992.
- [13] J.F. Saccadura, 'Initiation aux Transferts Thermiques', Editions Techniques et Documentation, Paris, 1993.

- [14] D.E. Briggs and E.H. Young, '*Modified Wilson Plot Technics for Obtaining Heat Transfer Correlations for Shell and Tube Heat Exchange Heat Transfer*', Chemical Engineering Progress Symposium, Vol. 65, N° 92, pp. 34 – 45, 1969.
- [15] F.P. Incropera and D.P. DeWitt, '*Fundamentals of Heat and Mass Transfer*', Wiley, NY, 53 p., 1990.