

Simulation numérique du comportement dynamique et thermique d'un écoulement d'air à travers un canal muni des chicanes sous forme aile (Application aux capteurs solaires plans à air)

Ahmed Youcef *

Unité de Recherche en Energies Renouvelables en Milieu Saharien, URERMS
Centre de Développement des Energies Renouvelables, CDER
B.P. 478, Route de Reggane, 01000 Adrar, Algeria

(reçu le 25 Septembre 2017 - accepté le 30 Septembre 2017)

Résumé - Une investigation numérique du comportement hydrodynamique et thermique de l'écoulement d'air dans un canal rectangulaire munie des chicanes sous forme aile est effectuée dans le présent papier. L'effet de l'insertion des chicanes a été analysé. Les équations de Navier-Stokes et de l'énergie, sont résolues par la méthode des volumes finis à l'aide de l'utilisation de l'algorithme Simple. Les contours de température et de vitesse ont été obtenus pour différents cas traités. L'étude a montré que, une augmentation de la vitesse près des chicanes générée tout d'abord par la présence des zones de recirculation qui accompagnent par un changement brusque du sens d'écoulement.

Abstract - A numerical investigation of the hydrodynamic and thermal behavior of the air flow in a rectangular channel provided with wing-shaped baffles is carried out in the present paper. The effect of baffle insertion was analyzed. The Navier-Stokes and energy equations are solved by the finite volume method using the Simple algorithm. The temperature and velocity contours were obtained for different cases treated. The study showed that an increase in speed near the baffles first generated by the presence of recirculation zones that accompany by a sudden change in direction of flow.

Mots clés: Canal - Chicane delta - Convection forcée - Volumes finis - CFD.

1. INTRODUCTION

Les ailettes sont de première importance dans les capteurs solaires à parcours du fluide et par voie de conséquence, ils assurent des taux élevés de transfert de chaleur. Dans la littérature, les différentes formes, orientations et emplacement des chicanes ont fait l'objet de plusieurs travaux scientifiques. En convection forcée dans les conduites en présence des obstacles ou chicanes.

Plusieurs travaux de recherches sont menés afin de caractériser l'écoulement et le transfert de chaleur et étudiés les facteurs qui influent sur l'efficacité du capteur solaire [1, 2]. Ces facteurs peuvent être conceptuels ou structurels: la longueur, la hauteur de la veine d'air mobile, le type de la plaque absorbante et de la couverture, la vitesse du vent. Certains travaux portent sur l'amélioration des échanges convectifs par l'introduction de chicanes dans la veine d'écoulement du fluide.

En effet, l'utilisation des rugosités artificielles sous différentes formes et géométries apparaît le moyen le plus efficace et économique pour l'amélioration des performances de ces systèmes. Beaucoup de travaux de recherches numériques et expérimentales ont été faites pour caractériser l'écoulement, on peut citer une investigation numérique pour un fluide en convection forcée laminaire entre deux parois planes parallèles avec chicanes a été réalisée par Kelkar *et al.* [3].

Les résultats prouvent que l'écoulement est caractérisé par de fortes déformations et de grandes régions de recirculation, en général, le nombre de Nusselt et le coefficient de

* a_youcef83@yahoo.fr

frottement augmentent avec le nombre de Reynolds. Leurs résultats montrent aussi que les performances thermiques augmentent avec l'augmentation de la taille de chicanes et avec la diminution de l'espacement entre chicanes.

Cheng *et al.* [4], ont étudié la convection forcée entre deux plaques planes parallèles munies d'ailettes transversales qui ne sont pas symétriquement placées, leurs résultats ont indiqué que la position relative à des rangées de chicanes est un facteur influent sur le champ d'écoulement, particulièrement pour des chicanes avec de grandes tailles.

Tandiroglu [5] a étudié l'effet des paramètres géométriques sur la convection forcée transitoire à convection forcée turbulente dans un tube circulaire muni des chicanes. Il a utilisé neufs (9) chicanes en total pour tester l'effet de leurs orientations et leurs espacements sur l'amélioration du transfert thermique.

Ko *et al.* [6] ont conclu que l'utilisation des chicanes poreuses abouties à une augmentation du coefficient de transfert de chaleur allant jusqu'à 300 % par rapport au transfert de chaleur dans le canal sans aucune chicane. R. Saim *et al.* [7], cette étude a montré que l'usage des chicanes de forme trapézoïdale assure une augmentation considérable de vitesse par apport aux chicanes de forme rectangulaire, mais le seul inconvénient est provoqué à une augmentation du coefficient de friction.

Une étude expérimentale a été effectuée par M. Molki *et al.* [8]. Ils ont constaté que les hauteurs dans les chicanes augmentent la chute de pression beaucoup plus rapidement et augmentent aussi le coefficient de transfert de chaleur. K. Aoues *et al.* [9] ont mené un travail théorique en vue d'améliorer le coefficient de transfert convectif entre l'air et l'absorbeur, en plaçant des chicanes cylindriques perpendiculaire à l'écoulement dans la veine d'air dynamique entre l'absorbeur et l'isolant.

Les auteurs ont trouvé que le meilleur rendement est obtenu avec des chicanes cylindriques arrangées en quinconce. A. Labed *et al.* [10] ont mené des travaux expérimental et théorique afin d'améliorer les performances du capteur solaire plan à air en introduisant un nouveau modèle de rugosité artificielle. Les rugosités artificielles sont de petits canaux, dont la base est de forme trapézoïdale, les auteurs ont conclu que les chicanes introduites dans la veine d'air utile agissent favorablement sur le transfert thermique, cependant elles engendrent des pertes comparativement à un canal lisse.

S. Youcef-Ali [11] a étudié expérimentalement un capteur solaire, auquel il a ajouté des plaques rectangulaires minces orientées parallèlement à l'écoulement et soudées à la face inférieure de l'absorbeur.

Dans le but d'améliorer l'efficacité d'un capteur solaire à air, N. Moumami *et al.* [12] ont créé un écoulement turbulent entre l'absorbeur et la plaque arrière par l'utilisation des obstacles rectangulaires perpendiculaires à l'écoulement, et qui permettent de réduire les zones mortes.

2. FORMULATION MATHÉMATIQUES DU PROBLÈME

2.1 Géométrie du problème

La géométrie du problème est présentée sur la figure 1. Il s'agit d'un conduit rectangulaire muni à sept chicanes de forme aile delta, traversé par un écoulement d'air et exposé à un flux de chaleur uniforme.

2.2 Equations gouvernantes

Les équations de la conservation peuvent se généraliser sous une seule forme d'équations aux dérivées partielles.

Si on note toute variable générale mesurée par le symbole ϕ , l'équation différentielle générale s'écrit:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \operatorname{div}(\rho\mathbf{V}\phi) = \operatorname{div}(\Gamma_\phi \cdot \operatorname{grad}\bar{\phi}) + S_\phi \quad (1)$$

On peut considérer que les équations suivantes décrivent le phénomène d'écoulement à l'intérieur de capteur solaire plan.

Equation de continuité

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (2)$$

Equation de quantité de mouvement

Suivant x:

$$u \cdot \frac{\partial u}{\partial x} + v \cdot \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (3)$$

Suivant y:

$$u \cdot \frac{\partial v}{\partial x} + v \cdot \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (4)$$

Equation d'énergie

$$\rho C_p \left(u \cdot \frac{\partial T}{\partial x} + v \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \lambda_f \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (5)$$

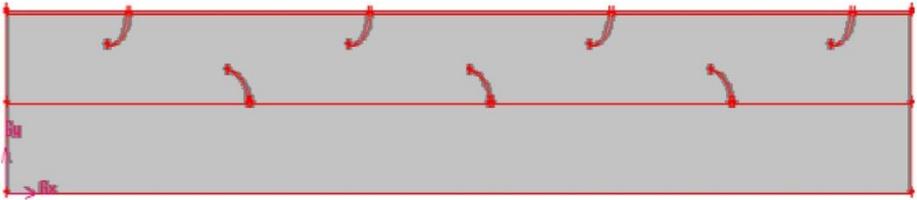


Fig. 1: Géométrie du problème

2.3 Conditions aux limites

Les conditions aux limites pour l'ensemble des équations régissant sont présentées ci-dessous:

1. Entrée: $x = 0$

Pour l'air comme fluide caloporteur

$$\begin{cases} \mathbf{u} = \mathbf{u}_{\text{entrée}} \\ v = 0 \\ T = T_{\text{entrée}} \end{cases} \quad (6)$$

Pour l'absorbeur et l'isolateur

$$\begin{cases} \mathbf{u} = \mathbf{v} = 0 \\ \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \end{cases} \quad (7)$$

2. Sortie: $x = L$

Pour l'air

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial x} = \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial x} = \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad (8)$$

Pour l'absorbant et l'isolant

$$\begin{cases} \mathbf{u} = \mathbf{v} = 0 \\ \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \end{cases} \quad (9)$$

3. Parois absorbante et isolante

$$\lambda_{\text{abs}} \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=y_1} = G_v \quad (10)$$

$$\lambda_{\text{iso}} \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=0} = h(T_{\text{iso}}|_{y=0} - T_{\infty}) \quad (11)$$

3. RESOLUTION NUMERIQUE

La méthode des volumes finis, basée sur l'algorithme Simple, est utilisée pour résoudre le système d'équation muni des conditions aux limites ci-dessus. Par conséquent, l'équation algébrique générale peut être écrite comme:

$$a_{i,j} \cdot \phi_{i,j} = a_{i+1,j} \cdot \phi_{i+1,j} + a_{i-1,j} \cdot \phi_{i-1,j} + a_{i,j+1} \phi_{i,j+1} + a_{i,j-1} \cdot \phi_{i,j-1} + b \quad (12)$$

4. RESULTATS ET DISCUSSIONS

Les dimensions du capteur sont:

- Longueur de capteur solaire $L = 90$ cm;
- Epaisseur de l'absorbant $E_{\text{abs}} = 0.15$ m;
- Epaisseur de l'isolant $E_{\text{iso}} = 5.5$ cm;
- Distance entre l'absorbant et l'isolant $H = 5.5$ cm;
- Epaisseur et l'hauteur des chicane sont $E_{\text{chi}} = 1$ mm, $h = 2$ cm respectivement;
- Espacement entre chicane égale à $l = 24$ cm;
- Entrée de capteur munie d'un ventilateur qui débite un débit de l'air de l'ordre de 30 kg/h à la température de $T_{\text{fe}} = 300$ K;
- Le flux de solaire après vitrage $G_v = 714$ W/m² (Juillet /11-12 heures/Tlemcen) [13].

4.1 Etude du champ dynamique dans le capteur

On va présenter l'évolution de la vitesse et de la température dans les sections longitudinales et transversales à des endroits importants, qui imposent des variations de ces paramètres dans la veine d'écoulement du capteur.

- $y = 1$ cm : Section de la face inférieure de l'absorbant.

- $y=5.5$ cm : Section de la face supérieure de l'isolant.
- $y=7.5$ cm : Section des faces supérieure des chicanes attachées à l'isolateur.
- $y=8.25$ cm : Section moyenne de la conduite de l'écoulement d'air.
- $y=9$ cm : Section des faces supérieures des ailettes attachées à l'absorbeur.

Tableau 1: Propriétés physiques de l'absorbeur et l'isolateur

Matériaux	ρ kg/m ³	C_p J/kg°C	λ W/m°C
Cuivre (absorbeur)	8978	381	387.6
Polystyrène (isolant)	12	1300	0.047

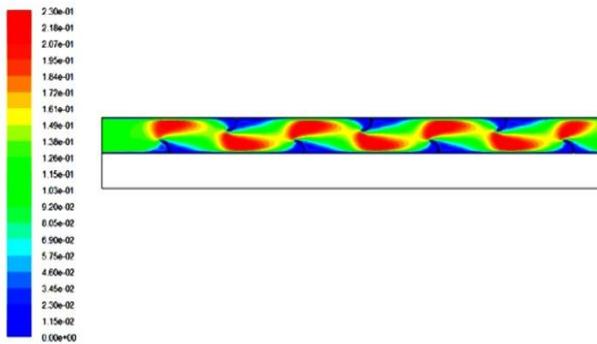


Fig. 2: Présentation du contour de la vitesse (m/s) dans le capteur

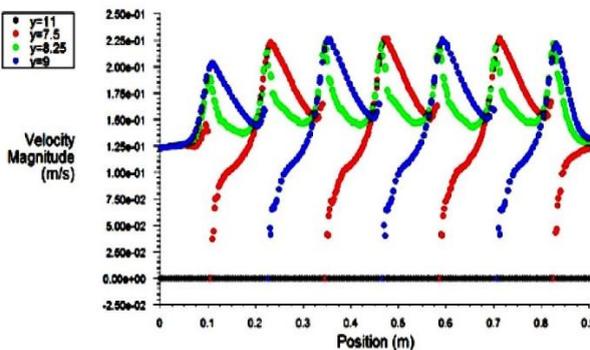


Fig. 3: Courbe de vitesse dans des sections longitudinales du capteur

La figure 2 présente les contours de vitesse dans le capteur solaire avec des chicanes aile delta. L'échelle des vitesses est représentée par des couleurs variant du bleu (faibles vitesses) au rouge (grandes vitesses).

La figure 3 montre une augmentation de la vitesse à partir de la première chicane pour la section $y=9$ cm à cause de rétrécissement de la section de passage, est une diminution de la vitesse dans la section $y=7.5$ cm pour la même position car el situé dans la zone de recirculation.

Les valeurs nulles de la vitesse située sur la section $y=11\text{ cm}$ présenté par la figure 3 indiquent les sommes des ailettes attachées à l'absorbeur ($y=9\text{ cm}$) et les sommes des chicanes attachées à l'isolateur ($y=7.5\text{ cm}$).

La valeur maximale de la vitesse est de 0.23 m/s .

4.2 Etude du champ thermique dans le capteur

La figure 4 présente la variation de la température dans le capteur solaire à air muni des chicanes sous forme d'aile. L'échelle des températures est représentée par des couleurs variant du bleu (basse température) au rouge (haute température).

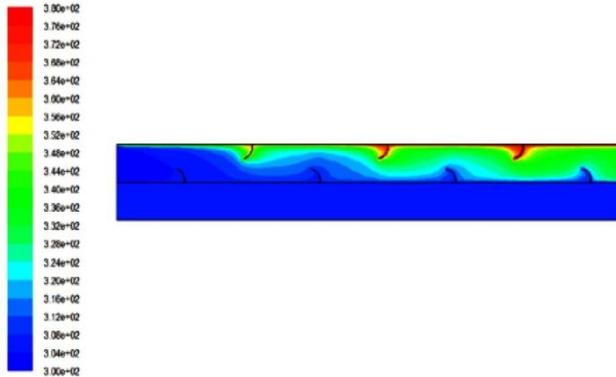


Fig. 4: Présentation du contour de température ($^{\circ}\text{K}$) dans le capteur

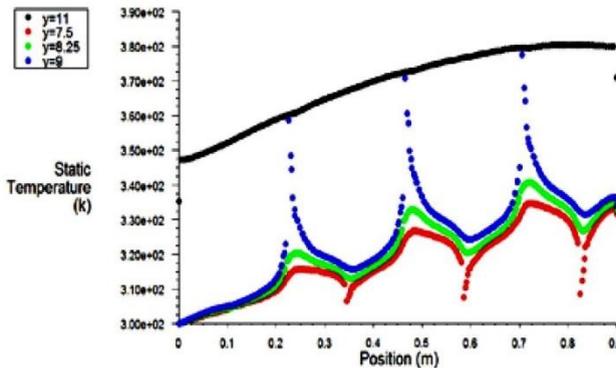


Fig. 5: Evolution de température dans des sections longitudinales dans le capteur

On remarque à l'entrée une couche verte à faible épaisseur collée à la face inférieure de l'absorbeur et dilatée à partir de la première chicane attachée à l'absorbeur donc on a un échange thermique très important au niveau des chicanes.

La température augmente dans le capteur sur la direction axiale et prend de plus en plus des valeurs importantes à cause de la convection entre l'absorbeur et l'air passe dans le canal.

Le champ de température présenté sur la figure 5 montre une baisse de température dans les zones situées en aval de chaque chicane. Les températures les plus élevées sont pour la plupart des ailettes situées au voisinage de la paroi supérieure et à l'extrémité. La température maximale atteinte est de l'ordre de 390 K .

4.3 Etude du champ dynamique thermique autour de la deuxième chicane

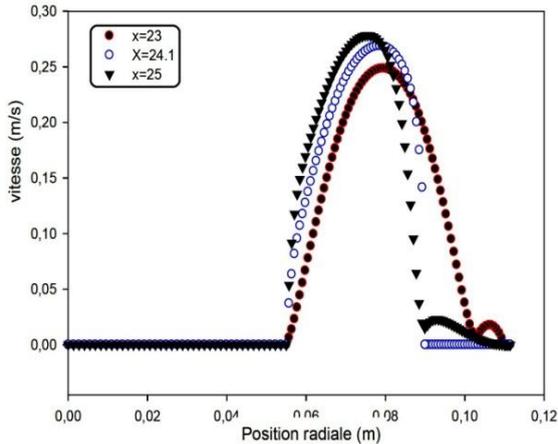


Fig. 6. Distribution de la vitesse autour de la seconde chicane

On remarque que la vitesse maximale augmente suivant la direction de l'écoulement autour de la chicane.

Pour $x = 23$ cm, la vitesse moyenne est $U = 0.25$ m/s ; pour $x = 24.1$ cm, la vitesse moyenne est $U = 0.273$ m/s et pour $x = 25$ cm, la vitesse moyenne est $U_{\text{moy}} = 0.28$ m/s .

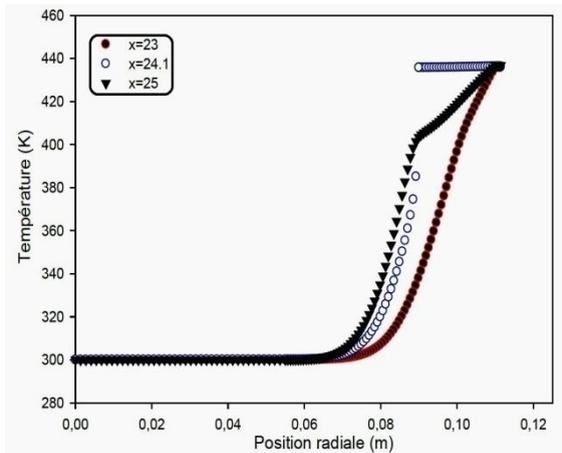


Fig. 7: Courbe de température autour de la seconde chicane

Pour la figure 7, on observe clairement que la température au niveau des trois sections augmente à partir de $y = 5.5$ cm jusqu'à la température de la face inférieure de l'absorbeur.

Dans la même section par exemple $y = 8.5$ cm, on remarque que la température prend une valeur de 315 K pour $x = 22$ cm et une valeur de 324 K pour $x = 24.05$ cm, et la température de 326K pour la section $x = 25$ cm .

5. CONCLUSION

L'analyse des résultats obtenus a permis d'associer des élévations de température du fluide par l'effet des chicanes et des ailettes à la sortie de chaque section.

Les résultats numériques, obtenus sont présentés pour analyser le comportement dynamique et thermique d'un écoulement d'air dans un capteur solaire plan à air avec chicanes. Ces résultats constituent un apport important pour l'enrichissement des connaissances sur la convection forcée à l'intérieur des conduites. Les profils et la distribution de la vitesse montrent des zones de recirculation relativement élevée au-dessus des facettes de chaque chicane.

La perturbation la plus élevée est obtenue en amont de chaque chicane. Ces zones de circulation sont responsables de l'augmentation de la température du fluide caloporteur. La présence des ailettes réduit la région d'entrée, et c'est dans cette partie où les échanges thermiques sont les plus importants.

La température de l'air augmente dès que le fluide se trouve de nouveau en contact avec les chicanes et ceci se répète d'une manière analogue d'une cellule à une autre.

Cette étude a montré que l'usage des chicanes 'aile delta' dans la veine dynamique d'un capteur solaire plan demeure un moyen efficace pour l'amélioration de ses performances. L'ensemble des résultats présentés montre bien la nette amélioration apportée par l'utilisation de ces obstacles.

NOMENCLATURE

T_{fe} , Température du fluide entrée, K	h , Coefficient Echange convection, W/m^2K
u, v , Composant de vitesse, m/s	x, y , Coordonnées, m
V , Vecteur vitesse	P , Pression, N/m^2
I , Espacement entre chicanes, m	λ , Conductivité thermique, W/mK
S_{Φ} , Terme source --- t , Temps, s	Γ_{Φ} , Coefficient diffusion
H , Hauteur, m	λ_s , Conductivité thermique solide, $W/K.m$
L , Longueur du capteur solaire, m	λ_f , Conductivité thermique fluide, $W/K.m$
ρ , Masse volumique air, kg/m^3	C , Chaleur spécifique, $J/kg.K$
$G_{/v}$, flux solaire après vitrage, V/m^2	ϕ , Valeur dépendante
e_{abs} , Epaisseur absorbeur, m	e_{iso} , Epaisseur isolant, m
e_{chi} , Epaisseur chicane, m	

REFERENCES

- [1] C. Choudhury and H.P. Gary, 'Performance of Air Heating Collectors with Packed Air Flow Passage', Solar Energy, Vol. 50, N°3, 205 – 221, 1993.
- [2] A. Varun, R.P. Saini and S.K. Singal, 'A Review on Roughness Geometry Used in Solar Air Heaters', Solar Energy, Vol. 81, pp. 1340 - 1350, 2007.
- [3] K.M. Kellar and S.V. Patankar, 'Numerical Prediction of Flow and Heat Transfer in Parallel Plate Channel with Staggered Fins', Journal of Heat Transfer, Vol. 109, pp. 25 - 30, 1987.
- [4] X-H. Cheng and W-H. Huang, 'Numerical Prediction for Laminar Forced Convection in Parallel-Plate Channels with Transverse Fin Arrays', International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 34, N°11, pp. 2739 - 2749, 1991.
- [5] A. Tandiroglu, 'Effect of Flow Geometry Parameters on Transient Heat Transfer for Turbulent Flow in a Circular Tube with Baffle Inserts', International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 49, pp. 1559 - 1567, 2006.

- [6] K.H. Ko and N.K. Anand, '*Use of Porous Baffles to Enhance Heat Transfer in a Rectangular Channel*', International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 46, N°22, pp. 4191 - 4199, 2003.
- [7] H. Benzenine, R. Saim, S. Abboudi and O. Imine, '*Numerical Simulation of the Dynamic Turbulent Flow Field Through a Channel Provided with Baffles: Comparative Study Between Two Models of Baffles: Transverse Plane and Trapezoidal*', Revue des Energies Renouvelables Vol. 13 N°4, pp. 639 – 651, 2010.
- [8] M. Molki and A.R. Mostoufizadeh, '*Turbulent Heat Transfers in Rectangular Ducts with Repeated-Baffle Blockages*', International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 32, N°8, pp. 1491 - 1499, 1989.
- [9] K. Aoues, N. Moumami, M. Zellouf, A. Labed et, E. Achouri, '*Etude de l'Influence des Rugosités Artificielles sur les Performances Thermiques des Capteurs Solaires Plans à Air*', Revue des Energies Renouvelables, Vol. 11, N°2, pp. 219 - 227, 2008.
- [10] A. Labed, N. Moumami, K. Aoues, M. Zellouf et A. Moumami, '*Etude Théorique et Expérimentale d'un Capteur Solaire Plan à Air Muni d'une Nouvelle Forme de Rugosité Artificielle*', Revue des Energies Renouvelables, Vol 12, N°4, pp. 551 - 561, 2009.
- [11] S. Youcef-Ali, '*Study and Optimization of the Thermal Performances of the Offset Rectangular Plate Fin Absorber Plates with Various Glazing*', Renewable Energy, Vol. 30, pp. 271 – 280, 2005.
- [12] N. Moumami, S. Youcef-Ali, A. Moumami and J.Y. Desmons, '*Energy Analysis of a Solar Air Collector with Rows of Fins*', Renewable Energy, Vol. 29, pp. 2053 – 2064, 2004.
- [13] M. Capderou, '*Atlas Solaire de l'Algérie : Aspect Energétique*', T2, Office des Publications Universitaires, 1985.