

Performances thermiques et pertes de charges de différentes configurations de capteurs solaires plans à air Etude expérimentale dans la région de Biskra, Algérie

Adnane Labeled ¹✉, Noureddine Moummi ¹, Adel Benchabane ²,
Kamel Aoues ² et Miloud Zellouf ²

¹ Laboratoire de Génie Mécanique, LGM, Faculté des Sciences et de la Technologie

² Laboratoire de Génie Énergétique et Matériaux, LGEM, Faculté des Sciences et de la technologie
Université Mohamed Khider, B.P. 145, R.P. 07000, Biskra, Algérie

(reçu le 20 Août 2014 – accepté le 29 Mars 2015)

Résumé - Dans cette étude, nous présentons les résultats expérimentaux relatifs aux expériences menées sur des capteurs solaires plans à air. En premier lieu, nous décrivons les différentes configurations étudiées. De ce fait, nous avons opté à combiner trois solutions technologiques, à savoir, i) introduire différentes géométries de rugosités dans la veine d'air mobile, ii) inverser le sens de l'écoulement de l'air dans le capteur, iii) faire circuler le fluide caloporteur de part et d'autre de la plaque d'acier inférieure 'double passage'. En deuxième phase, nous exposons les résultats qui traduisent l'influence des différentes solutions technologiques proposées sur les performances thermiques et la consommation électrique d'un capteur solaire en comparant les rendements thermiques et les pertes de charge pour tous les cas étudiés.

Abstract - Solar air heaters can be used for many applications at low and moderate temperatures. There are different factors affecting the solar air heater efficiency, e.g. collector length, collector depth, type of absorber plate, glass cover plate, wind speed, etc. In this work, we present an extensive comparative study on the thermal performance and pressure drop of various designs of solar air heaters. thus, we propose three technological solutions: i) adding different forms of obstacles in the air flow duct, ii) reversing the flow direction (blowing up / blowing down), iii) rotating the flow around the bottom plate to obtain a double pass flat plate collector having a trapezoidal obstacles. Thus, we have proceeded to the comparison of the seven models in order to determine the best performing system.

Mots clés: Capteur solaire - Rendement thermique - Rugosités artificielles - Pertes de charge.

1. INTRODUCTION

Les capteurs solaires plans à air transforment l'énergie radiante du soleil en énergie thermique extraite par l'air en écoulement dans le capteur. Les capteurs solaires à air sont moins compliqués par rapport aux chauffe-eau solaires et très attrayants pour les technologies solaires à basses températures, qui nécessitent des températures de l'air en dessous de 100 °C.

En effet, les CSPs sont largement utilisés au fil des années, parce qu'ils sont relativement simples avec une utilisation minimale de matériaux, facile à utiliser et ont un faible coût [1, 2]. Les CSPs à air sont utilisés pour le chauffage, le séchage des produits industriels et le séchage des produits agricoles comme les légumes, fruits, céréales, épices, plantes médicinales, bois, tabac, poissons,....

Plusieurs travaux de recherches sont menés sur les CSP à air afin de caractériser l'écoulement et le transfert de chaleur et étudier les facteurs qui influent sur l'efficacité

✉ adnanelabel@yahoo.fr, a.labeled@univ-biskra.dz

de ces systèmes [3, 4]. 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, etc. Augmenter la surface de l'absorbeur augmente le transfert de chaleur (absorbeur-air), mais augmente également les pertes thermiques.

Certains travaux portent sur l'amélioration des échanges convectifs, par l'introduction de chicane dans la veine d'écoulement du fluide [5, 6]. 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.

Dans le cadre des travaux menés au Laboratoire de Génie Mécanique concernant l'optimisation des performances thermiques des CSPs à air, conçu pour les applications de séchage [7-15]. Les auteurs ont utilisé différentes formes d'obstacles montés sous la plaque absorbante dans la veine d'air mobile afin d'accroître le parcours offert au fluide caloporteur permettant ainsi un meilleur échange thermique.

2. PROTOCOLE EXPERIMENTALE

2.1 Description du capteur solaire et de l'installation expérimentale

La surface de captation du capteur solaire étudié est égale à 1.76 m^2 , d'une longueur $L_c = 1.96 \text{ m}$ et d'une largeur $l_c = 0.9 \text{ m}$, (Fig. 1). Nous résumons les principaux composants du capteur comme suit:

- Une seule couverture transparente de verre d'épaisseur 5 mm.
- Une plaque absorbante mince de 0.4 mm d'épaisseur, en acier galvanisé peinte en noir mat.
- Une plaque arrière mince de 0.4 mm d'épaisseur, en acier galvanisé placée sur l'isolant.
- La hauteur entre la couverture transparente et la plaque absorbante est égale à 20 mm.
- La hauteur de la veine d'air dynamique est de 25 mm.
- L'isolation arrière est assurée par une feuille de polystyrène de 30 mm d'épaisseur, par le boîtier en bois et puis elle est assurée également par deux feuilles de contre-plaqué de 5 mm d'épaisseur.

L'installation expérimentale comprend:

- La mesure du rayonnement solaire à l'aide d'un Pyranomètre de type 'Kipp & Zonen'.
- La mesure de la température de l'air ambiant, de la température du fluide caloporteur à l'entrée et à la sortie du capteur solaire, ainsi que celle de l'absorbeur par l'intermédiaire d'un enregistreur de température de marque 'Philips' à 12 voies. Les mesures sont effectuées à l'aide des thermocouples de type 'K' et 'J' en Fer constantan.
- La mesure de la vitesse de l'air à différents points dans le canal d'écoulement et de la vitesse du vent en utilisant un anémomètre à fil chaud de type 'VT 300'.
- La mesure des pertes de charge à l'aide d'un capteur de pression 'CP 300'.

2.2 Présentation des différentes configurations étudiées

Notre contribution à travers cette étude, consiste à optimiser ces systèmes classiques en vue d'améliorer leurs performances, par la proposition de trois solutions d'optimisation issues de la synthèse effectuée sur la technologie de ces systèmes.

De ce fait, nous avons opté à combiner trois solutions technologiques:

- ✓ La première consiste à introduire différentes géométries de rugosités dans la veine d'air mobile.
- ✓ La deuxième consiste à inverser le sens de l'écoulement de l'air dans le capteur. Cette idée n'a jusqu'à présent été envisagée dans les travaux rencontrés dans la littérature.
- ✓ La troisième consiste à faire circuler le fluide caloporteur de part et d'autre de la plaque d'acier inférieure 'double passage'.

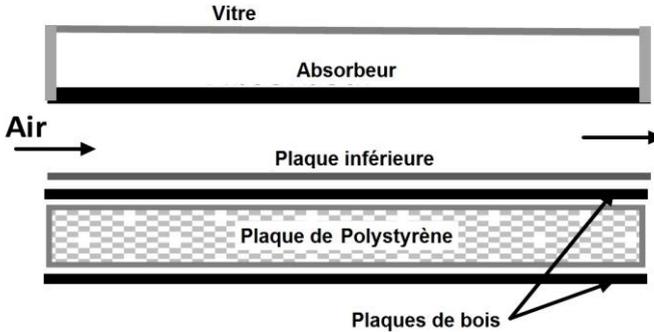


Fig. 1: Schéma du modèle étudié

Sept (07) configurations géométriques offertes au passage de l'air dans la veine d'écoulement.

Nous présentons sur les figures 2 et 3 les différentes géométries des chicanes et les différentes configurations des CSP à simple passage d'air étudiées, respectivement.

- Configuration N-1: capteur sans chicanes, entrée de l'air par le bas;
- Configuration N-2: capteur sans chicanes, entrée de l'air par le haut;
- Configuration A-1: capteur avec chicanes rectangulaires, entrée de l'air par le bas;
- Configuration A-2: capteur avec chicanes rectangulaires, entrée de l'air par le haut;
- Configuration B-1: capteur avec chicanes trapézoïdales, entrée de l'air par le bas;
- Configuration B-2: capteur avec chicanes trapézoïdales, entrée de l'air par le haut.

Dans la figure 4, nous présentons la 7^{ème} configuration (Configuration C). Il s'agit d'un CSP à double passage d'air autour la plaque d'acier inférieure.

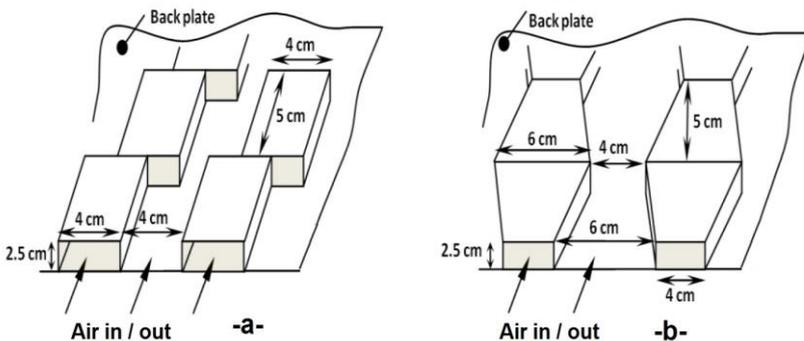


Fig. 2: Schématisation des différentes formes des obstacles utilisés

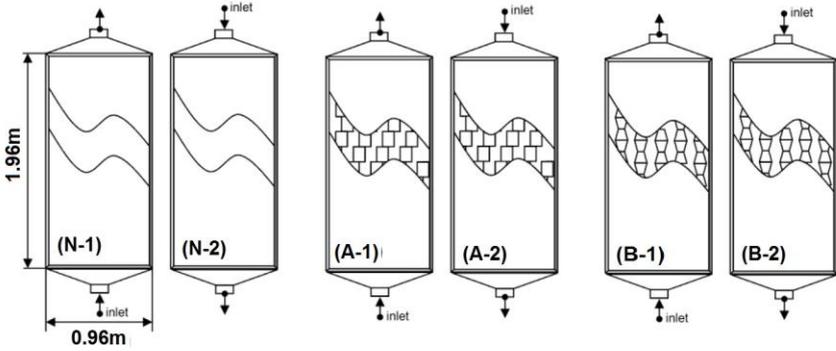


Fig. 3: Présentation des six modèles étudiés: (N) sans obstacles, (A) avec des obstacles rectangulaires et (B) avec des obstacles trapézoïdaux Indices 1 et 2 indiquent, respectivement, que l'entrée de l'air est par le bas ou par le haut du CSP

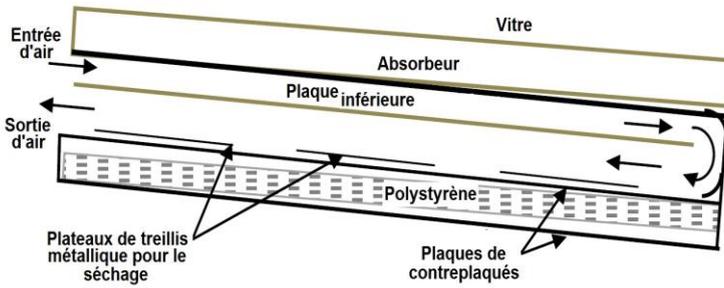


Fig. 4: Schéma du capteur C (double passage d'air)

2.3 Inclinaison et orientation du CSP

Les expériences menées sont réalisées sur des CSP's installés au site de l'Université de Biskra. Caractérisée par son climat saharien, Biskra est située à une latitude de 34°48' Nord et une longitude de 5°44' Est. Son altitude par rapport au niveau de la mer est de 85 m, la pression atmosphérique à cette altitude est 1,004 bar.

Le capteur est orienté face au Sud et placé sur des supports inclinés de 34°48' par rapport à l'horizontale.

3. RESULTATS ET DISCUSSION

3.1 Rendement en fonction du débit

En régime stationnaire, où la variation de la température est inférieure à 0.5°C/min l'analyse des échanges de chaleur du capteur solaire plan à air permet d'écrire l'énergie utile récupérée sous la forme suivante [8]: (en négligeant l'énergie thermique stockée)

$$Q_u = \dot{m}C_p(T_{fo} - T_{fi}) \quad (1)$$

La norme ASHRAE standard exige que, pour les essais d'efficacité des capteurs solaires, le rayonnement solaire doit être au-dessus de 630 W/m² [16]. Les rendements instantanés sont déterminés à partir de la formule ci-dessous:

$$\eta = \frac{\dot{m}C_p(T_{fo} - T_{fi})}{I_G \cdot A_c} \quad (2)$$

La figure 5, regroupe les courbes de la variation du rendement en fonction du débit pour les différentes configurations de CSPs.

Comme nous l'avons constaté, le rendement du capteur augmente lorsque le débit augmente. De même, l'utilisation des chicanes trapézoïdales induit une amélioration du rendement, ceci s'explique par le fait que la forme trapézoïdale induit une diminution des sections de passage de l'air.

Nous avons vu précédemment que la diminution de la section de passage implique l'augmentation du nombre de Reynolds; ce qui signifie que l'échange thermique convectif entre l'air et l'absorbeur s'améliore et par conséquent le rendement du capteur augmente.

Nous remarquons aussi, que les rendements des capteurs dont l'entrée de l'air est par le haut (Configurations: N-2, A-2 et B-2) sont plus élevés que ceux des capteurs ayant l'entrée de l'air par le bas (Configurations: N-1, A-1 et B-1). Cette élévation est plus remarquable pour les faibles débits. Ceci est dû à l'importance de la convection naturelle à l'égard de la convection forcé à faibles nombre de Reynolds, ce qui perturbe l'écoulement dans les régions avoisinants l'absorbeur et permet d'arracher le maximum de calories.

On constate que les configurations de chicanes proposées et étudiées (rectangulaires et trapézoïdales), ainsi que le faite que l'entrée de l'air se fait par le haut, apportent une amélioration sensible du rendement de ses systèmes solaires.

En première approche, on peut établir un classement de ces formes de chicanes d'après l'amélioration apportée aux rendements des capteurs A et B, ainsi qu'aux pertes de charge et consommations électriques résultantes.

Par ailleurs, l'inversement du sens d'écoulement du bas vers le haut (blowing up) pour être du haut vers le bas (blowing down), présente une amélioration remarquable du rendement, dans le cas du capteur sans chicanes.

En ce qui concerne la configuration C (capteur avec chicanes trapézoïdales à double passage d'air), on remarque que son rendement est légèrement inférieur à celui de la configuration B-2 pour les débits inférieurs à 45 m³/h, et il devient légèrement supérieur pour les débits supérieurs à 80 m³/h.

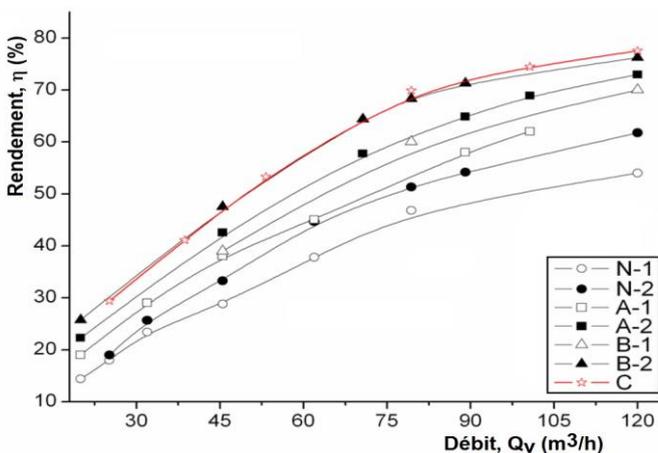


Fig. 5 : Comparaison des rendements des différentes configurations en fonction du débit

3.2 Pertes de charge et consommations électriques engendrées

Les courbes des figures 6 et 7, qui traduisent la variation des pertes de charge mesurées et les consommations électriques résultantes en fonction du débit, ont permis de tirer les conclusions suivantes.

Certes les solutions proposées apportent des améliorations remarquables sur les performances thermiques des capteurs solaires plans à air par comparaison à un capteur lisse. Cependant ces améliorations engendrent des pertes de charges supplémentaires.

Dans cette partie, nous essayons de voir les (ΔP) engendrées et voir si ces améliorations restent acceptables. Dans les différents capteurs, nous avons constaté d'après les mesures de pertes de charge que ces dernières augmentent dans le même sens que l'augmentation du débit.

Dans les configurations dont le sens de l'écoulement est du bas vers le haut nous remarquons que les pertes de charge sont moins importantes que les pertes de charge créées par l'inversement du sens de l'écoulement (du haut vers le bas).

Les chicanes trapézoïdales placées dans le capteur B et la double circulation de l'air autour de la plaque d'acier (capteur C) font augmenter les pertes de charge ainsi que la consommation électrique.

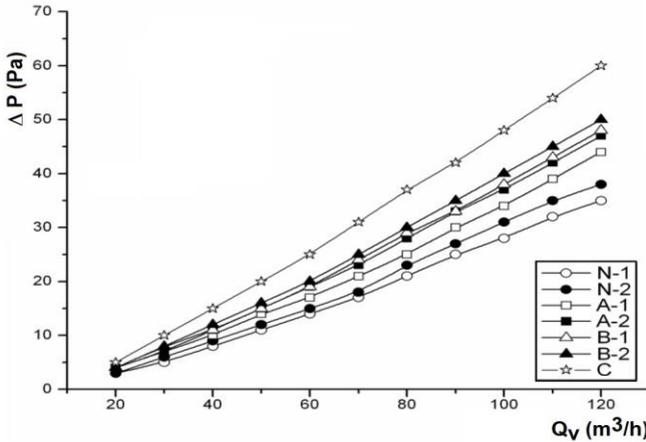


Fig. 6: Pertes de charge en fonction du débit pour les configurations étudiées

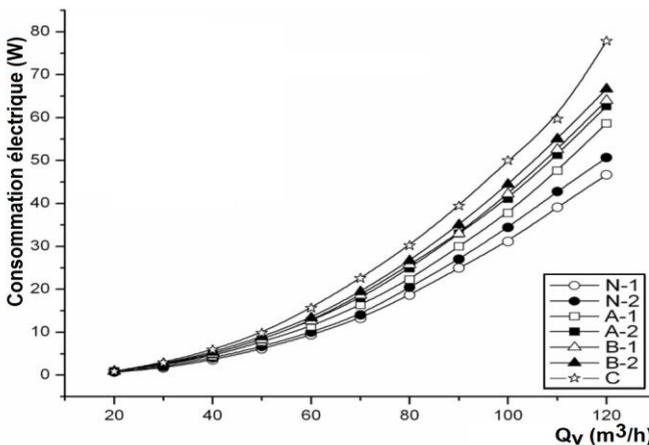


Fig. 7: Puissances électriques consommées en fonction du débit

4. CONCLUSION

A la suite des travaux entrepris dans cette étude et de ceux que nous venons de mener, nous espérons avoir contribué à l'étude et le développement des capteurs solaires plans à air.

Il ressort des valeurs enregistrées que l'adjonction de chicanes, de forme trapézoïdales avec une incidence normale à l'écoulement et pour le cas de la configuration et la disposition choisies, paraît la plus avantageuse par rapport à celle des chicanes rectangulaires et que dans les deux cas, le rendement du capteur est nettement supérieur à celui d'un capteur sans chicanes, une amélioration de 15 % pour un débit de 80 m³/h est remarquée pour le cas d'un capteur garni de chicanes trapézoïdales, et que par exemple pour avoir un rendement de 50 % avec un capteur sans chicanes, le débit nécessaire est de 75 m³/h, alors qu'avec un capteur garni de chicanes trapézoïdales, le débit nécessaire n'est que de 45 m³/h, autrement dit.

Les profils des températures de l'air et de l'absorbeur relevés à partir de l'entrée du capteur ont permis la détermination de leurs évolutions réelles pour mieux comprendre et étudier les causes et les conséquences d'une bonne ou mauvaise distribution afin d'agir comme nous avons pu le constater après avoir étudié l'influence du *type de chicanes* et le *sens de l'entrée* sur le rendement.

En mesurant les pertes de charge relatives aux différentes formes étudiées, nous avons pu avoir une idée sur l'importance de ces dernières, et aussi de la section de passage offerte au fluide caloporteur.

NOMENCLATURE

A_C , Surface de capitation du CSP, m ²	C_p , Chaleur massique de l'air, J/kgK
L_C , Longueur du CSP, m	l_C , Largeur du CSP, m
\dot{m} , Débit massique de l'air, kg/s	P , Puissance électrique consommé, W
T_{fo} , Température de l'air à la sortie, °C	Q_v , Débit volumique, m ³ /h
Q_u , Quantité de chaleur utile récupérée par le CSP, W/m ²	η , Rendement thermique du CSP, %

REFERENCES

- [1] J.A. Duffie and D. Beckman, '*Solar engineering of thermal processes*', John & Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, USA Ed, 2006.
- [2] S. Kalogirou, '*Solar thermal collectors and applications*', Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 30, N°3, pp. 231 - 295, 2004.
- [3] C. Choudhury and H.P. Gary, '*Performance of air heating collectors with packed airflour passage*', Solar Energy, Vol. 50, N°3, pp. 205 – 221, 1993.
- [4] Varun, R.P. Saini and S.K. Singal, '*A review on roughness geometry used in solar air heaters*', Solar Energy, Vol. 81, N°11, pp. 1340 - 1350, 2007.
- [5] N. Moummi, S.Youcef-Ali, A. Moummi and J.Y. Desmons, '*Energy analysis of a solar air collector with rows of fins*', Renewable Energy, Vol. 29: N°9, pp. 2053 - 2064, 2004.
- [6] S.H. Vishavjeet, R.P. Saini and J.S. Saini, '*Performance of artificially roughened solar air heaters*', Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 13, N°8, pp. 1854 – 1869, 2009.
- [7] K. Aoues, N. Moummi, M. Zellouf, A. Moummi, A. Labed, E. Achouri et A. Benchabane, '*Amélioration des performances thermiques d'un capteur solaire plan à air: Etude*

- expérimentale dans la région de Biskra'*, Revue des Energies Renouvelables, Vol. 12, N°2, pp. 237 – 248, 2009.
- [8] A. Labeled, N. Moumami, K. Aoues, M. Zellouf et A. Moumami, '*Etude théorique et expérimentale des performances 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.
- [9] A. Labeled, N. Moumami, A. Benchabane, K. Aoues and A. Moumami, '*Performance investigation of single- and double-pass solar air heaters through the use of various fin geometries*', International Journal of Sustainable Energy, DOI: 10.1080/14786451.2011.590899, 2011.
- [10] A. Labeled, N. Moumami and A. Benchabane, '*Experimental study on the performance and optimisation of flat plate collector: comparaison between two technological solutions*', Congrès Algérien de Mécanique (CAM 2011), Guelma Algérie, 14-17 Novembre, 2011.
- [11] A. Labeled, N. Moumami, A. Benchabane et M. Zellouf, '*Etude expérimentale de l'efficacité d'une nouvelle forme de rugosité artificielle sur les performances d'un capteur solaire plan à air- application au séchage du Henné*', Premier Séminaire National de Génie Mécanique (SNGM 01), Biskra, 7 et 8 Décembre, 2011.
- [12] A. Labeled, N. Moumami and A. Benchabane, '*Experimental investigation of various designs of solar dryer: Application for the drying of hot chili*', Sixth International Conference on Thermal Engineering: Theory and Applications, Istanbul, Turkey, 29 au 1^{er} Juin, 2012.,
- [13] N. Moumami, A. Moumami, K. Aoues, C. Mahboub and S. Youcef Ali, '*Systematic forecasts of solar collector's performance in various sites of different climates in Algeria*', International Journal of Sustainable Energy, Vol. 29, N°3, pp. 142 – 150, 2010.
- [14] K. Aoues, N. Moumami, M. Zellouf and A. Benchabane, '*Thermal performance improvement of solar air flat plate collector. A theoretical analysis and an experimental study in Biskra, Algeria*', Ambient Energy, Vol. 2, N°2, pp. 95 - 102, 2011.
- [15] A. Labeled, N. Moumami and A. Benchabane, '*Experimental investigation of various designs of solar flat plate collectors: Application for the drying of green chili*', Journal of Renewable Sustainable Energy, Vol. 4, N°4, 043116, 2012.
- [16] S. Karsli, '*Performance analysis of new-design solar air collectors for drying applications*', Renewable Energy, Vol. 32, N°10, pp. 1645 – 1660, 2007.