

## PERFORMANCES THERMIQUES D'UN CAPTEUR SOLAIRE A AIR A DOUBLE PASSE MUNI D'UN MILIEU POREUX

A.N. Korti

Laboratoire Energétique et Thermique Appliquée ETAP, Université de Tlemcen, Faculté de Technologie, Département de Mécanique

Email: Korti72@yahoo.fr

**Résumé** – Cette étude porte sur une modélisation mathématique d'un capteur solaire à air de conception conventionnelle à double passes (circulation d'air de part et d'autre de l'absorbeur). Le deuxième passage est muni d'un milieu poreux afin d'augmenter la surface d'échange et donc le rendement du capteur. Des bilans énergétiques ont été appliqués dans les différentes régions du capteur basés sur les équations de conservation de l'énergie. Ces équations non linéaires ont été discrétisées numériquement par la méthode des différences fines et résolues par la méthode itérative de Gauss-Seidel. La solution est obtenue sous forme d'évolution des températures nodales de vitrage, du fluide passant dans le premier et le deuxième canal, de l'absorbeur et de l'isolation.

**Keywords** – Capteur solaire, énergie solaire, milieu poreux, rendement thermique

**Abstract** – The present study analyses a mathematical modeling of a double pass of a conventional solar air collector (air circulate around the absorber). The second passage uses a porous medium in order to increase the exchange surface and therefore the efficiency of the collector. Energy balances have been applied in different parts of collector based on the energy conservation equations. These nonlinear equations were discretized numerically using finites differences method FDM and solved by Gauss-Seidel iterative method. The solution is obtained in the form of the temperatures evolution of the glass, the fluid passing through the first and second channel, the absorber, and the insulation.

**Keywords:** Solar collector, solar energy, porous media, thermal efficiency

### INTRODUCTION

L'utilisation de l'énergie solaire n'est pas liée uniquement à ses avantages économiques mais aussi à son caractère propre (énergie non polluante). Le soleil peut être classé comme une source d'énergie très importante. Cette énergie peut être exploitée dans plusieurs domaines tels que, le séchage solaire, climatisation des locaux, production de l'eau chaude, la réfrigération solaire, etc. Toutes ces applications ne peuvent être réalisées qu'avec des dispositifs qui permettent de concentrer le rayonnement solaire qui arrive sur la terre, tels que, les capteurs solaires thermiques plans et/ou concentrateurs.

L'utilisation d'un double passage d'air dans les capteurs solaires à air a été largement étudiée dans le but d'augmenter la surface d'échange et le temps de séjour de l'air dans le capteur. Cette technique a trouvée sa place même dans les capteurs photo-thermiques (hybride) dans le but de refroidir les cellules photovoltaïques [1]. Une étude de simulation d'un capteur solaire à double passes avec milieux poreux a été analysée par Naphon [2]. L'idée principale est de réduire au maximum les pertes de chaleur de la couverture du capteur et de maximiser l'extraction de chaleur à partir de l'absorbeur. Les milieux poreux forment une surface étendue pour le transfert de chaleur où le coefficient de transmission de chaleur volumétrique est très haut. Il augmentera le transfert de chaleur à partir de l'absorbeur vers l'écoulement d'air. Sopian [3] a entrepris des études expérimentales sur le capteur solaire à double passes avec et sans des milieux

poreux dans le deuxième canal. Le capteur a seulement une couverture en verre et un absorbeur noirci en métal. La matière employée comme milieu poreux est la laine en acier.

La performance thermique d'un capteur solaire à air à double passe et double vitrage avec un lit thermique au-dessus de la plaque absorbante du capteur a été étudiée expérimentalement et théoriquement par Ramadan et al. [4]. Le calcaire et le gravier ont été employés comme des matériaux de lit thermique. L'étude a montré que d'employer des lits thermiques de masses plus élevées et de faibles porosités assure l'augmentation de la température de sortie d'air après le coucher du soleil. Kumar [5] a étudié l'effet du débit massique d'air sur la performance thermique du capteur solaire à air avec double passe parallèle. Les débits d'air dans le système à co-courant fournissent une performance thermique plus élevée par rapport aux systèmes à contre-courant. La fraction du débit massique totale dans les conduites du capteur solaire est un paramètre dominant dans la détermination de l'efficacité thermique du capteur.

Ho et al. [6] ont présenté une étude thermique d'un chauffe-eau solaire à double passe. Il a montré que l'effet de recirculation peut augmenter le rendement du capteur par rapport à un capteur à simple passe. Après, ils montrent l'amélioration des performances du capteur en utilisant le phénomène de recirculation avec des ailettes attachés [7]. L'effet du taux de recirculation et du nombre d'ailettes attachées sur le rendement du capteur ont été analysés. Ramani et al. [8] ont analysés théoriquement et expérimentalement un capteur solaire à air à double passe avec et sans milieu poreux. Les résultats montrent que le rendement obtenu est de 20-25% plus important que celui d'un capteur sans milieu poreux et de 30-35% que celui à simple passe. Une simulation numérique 3D instationnaire d'un capteur solaire à air à double passe avec et sans milieu poreux a été développée [9]. Le modèle est basé les équations de Navier Stokes résolu par la méthode des volumes finis. Les effets de la porosité, le débit massique, l'intensité solaire et du passage d'air sur les comportements dynamiques et thermiques ont été discutés. L'étude a conclu que la présence du milieu poreux permet d'augmenter la température de sortie.

Le présent travail porte sur l'étude thermique d'un capteur solaire à air à double passe avec présence d'un milieu poreux dans le deuxième canal. La géométrie du capteur étudiée est montrée dans la figure 1. L'air circule dans le canal supérieur et retourne vers l'arrière par le canal inférieur. Le milieu poreux est ajouté dans le canal inférieur. Le but est de mettre en évidence l'influence du milieu poreux sur les performances thermiques du capteur solaire.

## **MATERIELS ET METHODES**

Le capteur solaire étudié est de type plan à air à double passe dont les principaux composants sont : une seule couverture transparente en verre, une plaque absorbante en aluminium peinte en noir et un milieu poreux placé dans le passage inférieur (figure 1). La veine d'air dynamique est comprise entre l'absorbeur et les deux plaques supérieure (vitrage) et inférieure (isolation). Le tableau 1 présente les différents paramètres physiques du capteur utilisés dans le calcul numérique. Le tableau 2 présente les différents paramètres géométriques du capteur solaire.

TABLEAU 1 : PARAMETRES PHYSIQUES DU CAPTEUR UTILISES DANS LE CALCUL NUMERIQUE

Paramètres	Symboles	Valeurs	Unités
Coefficients d'absorption du vitrage	$\alpha_g$	0,05	--
Coefficients de transmission du vitrage	$\tau_g$	0,94	--
Emissivité du vitrage	$\varepsilon_g$	0,94	--
Coefficients d'absorption de l'absorbeur	$A_p$	0,95	--
Emissivité de l'absorbeur	$\varepsilon_p$	0,8	--
Emissivité de l'isolation	$\varepsilon_b$	1	--
coefficient de conduction du milieu poreux	$K_{pm}$	10	$W m^{-1} K^{-1}$
Porosité	$\phi$	80 %	--
Température ambiante	$T_a$	306	K

TABLEAU 2 : PARAMETRES GEOMETRIQUES DU CAPTEUR UTILISES POUR LE CALCUL NUMERIQUE.

Paramètres	Valeurs	Unité
Largeur du capteur	1,2	m
Longueur du capteur	2,2	m
Hauteur du premier passage	0,07	m
Hauteur du deuxième passage	0,07	m
Epaisseur du milieu poreux	0,07	m

La modélisation mathématique des transferts peut être établie à partir des bilans énergétiques traduisant la conservation de l'énergie. Le modèle mathématique est basé sur les hypothèses suivantes :

- la température des différents composants varient seulement dans le sens de l'écoulement d'air (direction  $x$ ) ;
- les pertes thermiques et les fuites d'air du/vers le capteur sont négligeables ;
- le débit d'air est stationnaire ;
- la conductivité thermique du milieu poreux est constante le long du capteur.

Les équations de bilan thermique des divers composants du capteur s'écrivent, par unité de surface du capteur.

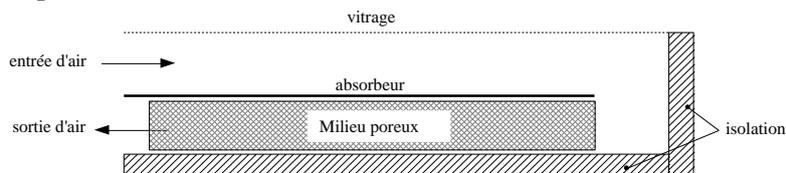


Fig. 1 : Capteur solaire à air à double passe avec milieu poreux

Bilan énergétiques au niveau du vitrage :

$$\alpha_g I = h_{rpg}(T_g - T_p) + h_{cgf1}(T_g - T_{f1}) + h_{rgs}(T_g - T_s) + h_{cga}(T_g - T_a) \quad (1)$$

Bilan énergétique du fluide entre le vitrage et l'absorbeur (premier canal)

$$\frac{G_{f1} C_{f1}}{B} \frac{\partial T_{f1}}{\partial x} = h_{cpf1}(T_p - T_{f1}) + h_{cgf1}(T_g - T_{f1}) \quad (2)$$

Bilan énergétique à travers l'absorbeur :

$$\alpha_p \tau_p I + K_p \delta_p \frac{\partial^2 T_p}{\partial x^2} = h_{rpg}(T_p - T_g) + h_{cpf2}(T_p - T_{f2}) + h_{rpb}(T_p - T_b) + h_{cpf1}(T_p - T_{f1}) \quad (3)$$

Bilan énergétique du fluide entre l'absorbeur et l'isolation (deuxième canal)

$$\frac{G_{f2} C_{f2}}{B} \left( -\frac{\partial T_{f2}}{\partial x} \right) = K_{pm} \delta_{pm} \frac{\partial^2 T_{f2}}{\partial x^2} + h_{cpf2}(T_p - T_{f2}) + h_{cbf2}(T_b - T_{f2}) = 0 \quad (4)$$

Bilan énergétique à traves l'isolation :

$$K_b \delta_b \frac{\partial^2 T_b}{\partial x^2} = h_{rpb}(T_b - T_p) + h_{cbf2}(T_b - T_{f2}) + U_R(T_b - T_a) \quad (5)$$

Dans le premier canal, la température de l'air à l'entrée du capteur solaire est égale à la température ambiante. A l'extrémité droite la température est supposée établie.

$$T_{f1}(x=0) = T_a, \quad \left. \frac{\partial T_{f1}}{\partial x} \right|_{x=L} = 0 \quad (6)$$

Dans le deuxième canal, la température de l'air est supposée établie à la sortie. A l'extrémité droite la température d'air est supposée continue.

$$\left. \frac{\partial T_{f2}}{\partial x} \right|_{x=0} = 0, \quad T_{f2}(x=L) = T_{f1}(x=L) \quad (7)$$

Pour l'absorbeur et l'isolant, une condition d'isolation parfaite est supposée.

$$\left. \frac{\partial T_p}{\partial x} \right|_{x=0} = \left. \frac{\partial T_b}{\partial x} \right|_{x=0} = 0, \quad \left. \frac{\partial T_p}{\partial x} \right|_{x=L} = \left. \frac{\partial T_b}{\partial x} \right|_{x=L} = 0 \quad (8)$$

Les coefficients radiatifs sont en fonction des températures des surfaces des deux côtés [10] :

$$h_r = \frac{\sigma(T_1^2 + T_2^2)(T_1 + T_2)}{\left( \frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)} \quad (9)$$

En ce qui concerne la convection forcée, le coefficient moyen de transfert thermique est calculé comme suit :

$$h_c = \frac{Nu k}{D_h} \quad (10)$$

où  $D_h$  est le diamètre hydraulique de la conduite. Dans le cas des sections transversales non circulaire sans milieu poreux, le  $D_h$  est donnée par :

$$D_h = \frac{4A}{P} = \frac{4(Bd)}{2(B+d)} = \frac{2(Bd)}{(B+d)} \quad (11)$$

Dans le cas avec milieu poreux, il peut s'écrire :

$$D_h = \phi \frac{4A}{P} = \phi \frac{2(Bd)}{(B+d)} \quad (12)$$

Le nombre de Nusselt est calculé par la relation empirique suivante [10] :

$$Nu = Nu_{\infty} + \frac{a \left[ \text{RePr} \left( \frac{D_h}{L} \right) \right]^m}{1 + b \left[ \text{RePr} \left( \frac{D_h}{L} \right) \right]^n} \quad (13)$$

Les constantes :  $a = 0.00398$ ,  $b = 0.0114$ ,  $m = 1.66$ ,  $n = 1.12$ , et  $Nu_{\infty} = 4.4$ .

Le rendement du capteur solaire, défini comme étant le rapport entre la quantité d'énergie utile récupérée et le rayonnement global incident, est donné par :

$$\eta = \frac{GC_f(T_0 - T_i)}{IA} \quad (14)$$

Les propriétés physiques de l'air sont supposées variables en fonction de la température :

La chaleur spécifique :  $C_f = 1007 + 0,004(T_m - 300)$

La masse volumique :  $\rho = 1,1614 - 0,00353(T_m - 300)$

La conductivité thermique :  $K = 0,0263 + 0,000074(T_m - 300)$

La viscosité :  $\mu = [1,846 + 0,00472(T_m - 300)] \times 10^{-5}$

$T_m$  désigne la température moyenne entre le fluide et les différentes parois.

## RESULTATS ET DISCUSSION

Dans la présente étude, un programme numérique écrit en langage Matlab a été développé pour résoudre le système d'équations non linéaire (1) à (5) sur les différents composants du capteur solaire. Un calcul itératif basé sur la méthode de Gauss-Seidel a été adopté. L'intervalle spatial  $[0, L]$  est discrétisé en plusieurs sections à l'aide de la méthode des différences finies, Fig. 2. Le calcul est développé section par section le long du capteur solaire. L'organigramme du calcul numérique est présenté par la Fig. 3.

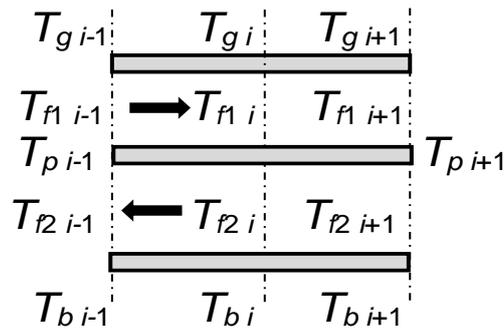
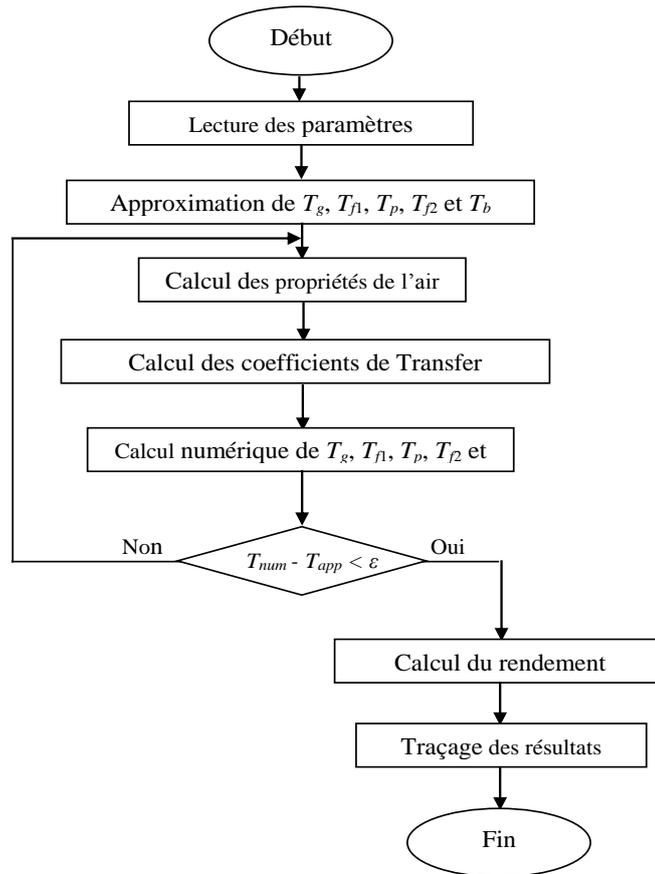
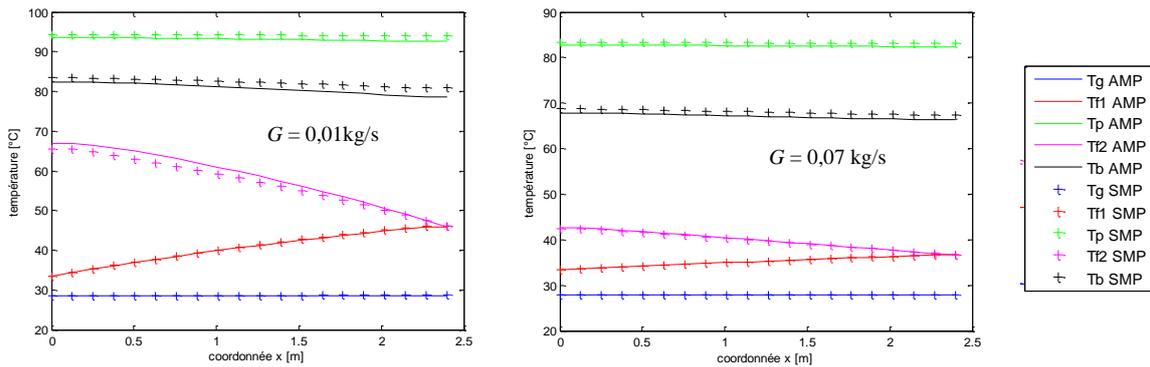


Fig. 2 : Maillage du calcul numérique



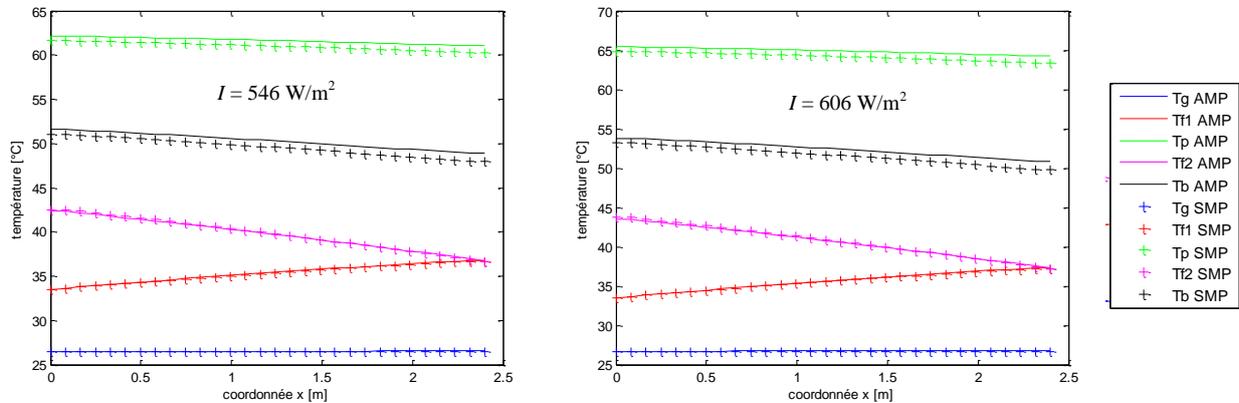
**Fig.3** : Organigramme du calcul numérique

La figure 4 montre la variation de la température des différents composants du capteur solaire (vitrage, absorbeur, isolation et le fluide dans les deux passages) en fonction de la position  $x$  (SMP : sans milieu poreux, AMP avec milieu poreux). On remarque que la température de l'absorbeur est la plus élevée puisqu'il absorbe le maximum du rayonnement solaire pour alimenter le fluide dans les deux conduites avec de la chaleur. La température du fluide augmente dans la première conduite dans le sens des  $x$  et dans la deuxième conduite dans le sens inverse des  $x$  (écoulement à contre courant). La figure montre que le débit massique a une grande influence sur le comportement thermique du capteur. Les températures de l'absorbeur, du fluide dans la deuxième conduite et de l'isolation diminuent considérablement avec l'augmentation du débit. En effet, le temps de séjour du fluide dans les deux conduites diminue avec l'augmentation du débit. Avec un milieu poreux, on remarque qu'il y a diminution de la température de l'absorbeur et de l'isolation. Cette diminution se traduit par l'augmentation de la température du fluide dans le deuxième canal. Pour les grands débits, cela n'est pas évident vu la courte durée de séjour du fluide dans le capteur.



**Fig. 4 :** Effet du débit sur l'évolution des températures des composants du capteur avec et sans milieu poreux

La figure 5 montre la variation de la température des composants du capteur solaire à double passe avec et sans milieu poreux en fonction de la position ( $x$ ) pour un même débit de 0.07Kg/s. Le tableau 3 montre numériquement l'évolution de la température de fluide à la sortie du capteur avec et sans milieu poreux en fonction du rayonnement solaire. On remarque que les températures dans les différents composants augmentent avec l'augmentation de l'irradiation solaire. Cependant, avec la présence du milieu poreux, la diminution du rayonnement solaire provoque la diminution de la température du fluide à la sortie du capteur. C'est-à-dire, que le milieu poreux est mieux adapter à la région de fort rayonnement.

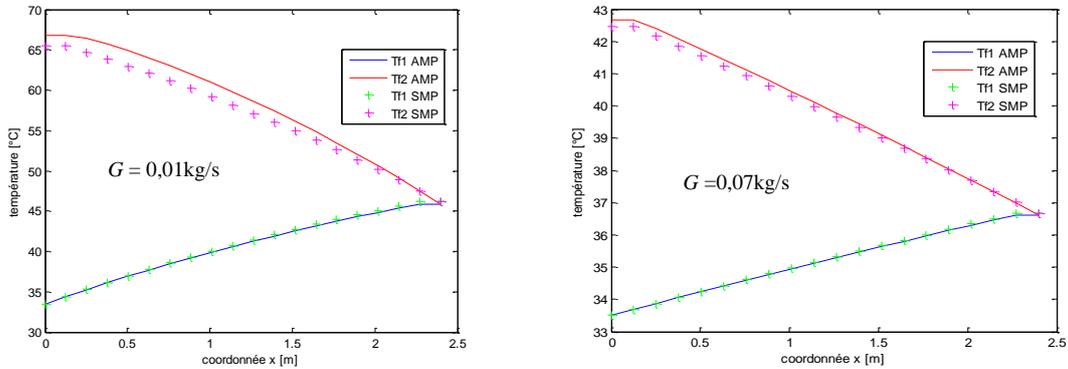


**Fig. 5 :** Effet du rayonnement solaire sur l'évolution des températures des composants du capteur avec et sans milieu poreux

**TABLEAU 3 :** L'EVOLUTION DE LA TEMPERATURE DE FLUIDE A LA SORTIE EN FONCTION RAYONNEMENT SOLAIRE.

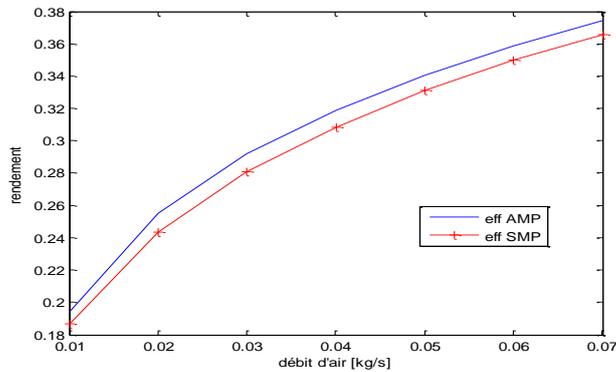
Irradiation ( $W/m^2$ )	$T_{f2}$ (°C) SMP	$T_{f2}$ (°C) AMP
546	42,52	42,31
566	42,91	42,7
586	43,3	43,08
606	43,69	43,46

La figure 6 illustre la variation de la température du fluide dans les deux conduites sans et avec milieu poreux en fonction du débit, résultat confirmé expérimentalement par Naphon [2]. On remarque que le milieu poreux contribue à l'amélioration des températures du fluide de sortie. On remarque que le gain, en élévation de température du fluide à la sortie, en utilisant le milieu poreux change avec le changement du débit.



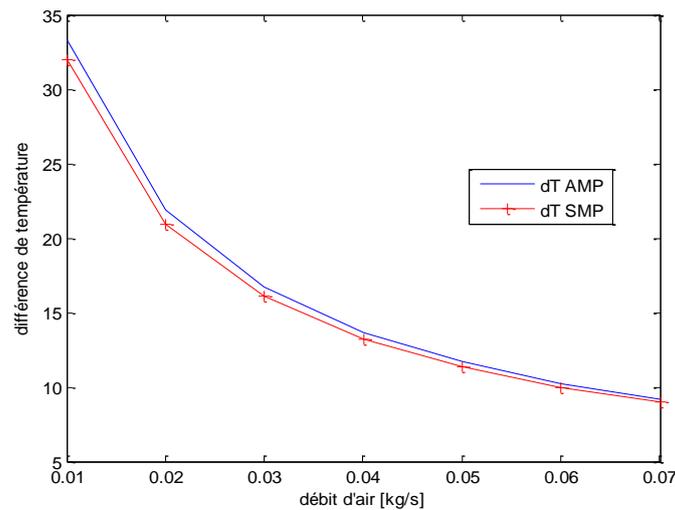
**Fig. 6 :** Comparaison des températures  $T_{f1}$  et  $T_{f2}$  du capteur avec et sans milieu poreux pour  $G = 0,01$  et  $0,07$  kg/s

La figure 7 montre l'effet du débit d'air sur le rendement thermique du capteur solaire à double passe (sans et avec milieu poreux). On remarque que le rendement thermique du capteur augmente avec l'augmentation du débit d'air circulant dans les deux passages [9]. En effet, le flux de chaleur évacué dépend directement du débit massique d'air. En plus, l'augmentation de la surface d'échange avec l'ajout d'un milieu poreux entraîne l'amélioration du rendement thermique par rapport à un capteur sans milieu poreux.



**Fig. 7 :** Effet du débit d'air sur le rendement thermique du capteur

La figure 8 montre l'effet du débit sur l'écart de température du fluide entre l'entrée et la sortie du capteur. On remarque qu'avec l'augmentation du débit d'air, l'élévation de la température d'air dans le capteur décroît puisque le temps de séjour d'air diminue. Nous remarquons aussi que l'élévation de la température avec la présence du milieu poreux est meilleure par rapport à un capteur sans milieu poreux. Cependant, la figure montre cette élévation est plus notable pour les faibles débits. L'ajout d'un milieu poreux est donc conseillé dans une zone d'utilisation réservée aux faibles débits. Ce résultat a été confirmé expérimentalement par Sopian [3]



**Fig. 8 :** Effet du débit sur l'écart de température du fluide entre l'entrée et la sortie du capteur.

## CONCLUSION

L'ajout d'un milieu poreux dans le deuxième passage d'un capteur solaire à air à double passe améliore son rendement thermique en augmentant la surface d'échange. Ce rendement augmente avec l'augmentation du débit d'air circulant dans les deux passages. En effet, le flux de chaleur évacué dépend directement du débit massique d'air. L'élévation de la température du fluide entre l'entrée et la sortie du capteur avec la présence du milieu poreux est meilleure par rapport à un capteur sans milieu poreux. Cette élévation est plus notable pour les faibles débits.

## NOMENCLATURE

$B$  : Largeur du capteur (m)  
 $C$  : capacité calorifique (kJ/kgK)  
 $d$  : Epaisseur de la veine d'air mobile (m)  
 $D_h$  : Diamètre hydraulique (m)  
 $G$  : Débit d'air massique (kg/s)  
 $h_r$  : Coefficient de transfert radiatif ( $W/m^2 K$ )  
 $h_c$  : Coefficient de transfert convectif ( $W/m^2 K$ )  
 $I$  : Flux global reçu par le capteur à air ( $W/m^2$ )  
 $K$  : Conductivité thermique ( $W/mK$ )  
 $T$  : Température (K)  
 Nombres adimensionnels  
 $Re$  : Nombre de Reynolds  
 $Pr$  : Nombre de Prandtl  
 $Nu$  : Nombre de Nusselt  
 Lettres grecques  
 $\delta$  : Epaisseur (m)  
 $\alpha$  : Coefficient d'absorption  
 $\tau$  : Coefficient de transmission

$\varepsilon$  : Emissivité  
Indices  
 $p$  : Absorbeur  
 $g$  : Vitrage  
 $f_1$  : Fluide dans le premier passage  
 $f_2$  : Fluide dans le deuxième passage  
 $b$  : Isolation  
 $pm$  : Milieu poreux

## REFERENCES

- [1] . Alfegi E.M.A., 2009 - Mathematical model of double pass photovoltaic thermal air collector with fins. American Journal of Environmental Sciences 5: 592-598.
- [2] . Naphon P., 2005 - Effect of porous media on the performance of the double-pass flat plate solar air heater. International Communications in Heat and Mass Transfer 32: 140–150.
- [3] . Sopian K., 2009 - Evaluation of thermal efficiency of double-pass solar collector with porous-nonporous media. Renewable Energy 34: 640–645.
- [4] . Ramadan M.R.I., 2007 - Thermal performance of a packed bed double-pass solar air heater, Energy 32: 1524–1535.
- [5] . Kumar P., 2012 - Effect of differential mass flow rate on the thermal performance of double duct packed bed solar air heaters. International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'12), Santiago de Compostela (Spain), 28th to 30th March
- [6] . Ho C.D., Chen T.C. 2006 - The recycle effect on the collector efficiency improvement of double-pass sheet-and-tube solar water heaters with external recycle. Renewable Energy 31: 953–970.
- [7] . Ho C.D., Chen T.C., 2008 - Collector efficiency improvement of recyclic double-pass sheet-and-tube solar water heaters with internal fins attached. Renewable Energy 33: 655–664.
- [8] . Ramani B.M., Gupta A., Kumar R., 2010 - Performance of a double pass solar air collector. Solar Energy 84: 1929–1937
- [9] . Korti A. N., 2015 - Numerical 3D heat flow simulations on double-pass solar collector with and without porous media. Journal of Thermal Engineering 1: 10-23.