

Etude thermique d'un capteur solaire innovant à circulation d'air

Thermal study of a innovative solar colector with air circulation

Cristiana Croitoru¹, Amina Meslem², Ramy Atta²

CAMBI Research Center, Technical University of Civil Engineering in Bucharest, Building Services Faculty.

Avenue Pache Protopescu 66, Bucharest, Romania

E-mail: cristianaveronacroitoru@gmail.com

² LaSIE, University of La Rochelle, Pôle Sciences et Technologie,
Avenue Michel Crépeau, 17042 La Rochelle, France

Rezumat. *L'utilisation des énergies renouvelables est une solution attractive pour satisfaire deux exigences: la qualité à l'intérieur et l'efficacité énergétique. Les systèmes solaires passifs sont faciles à mettre en œuvre et efficace dans les zones à fort potentiel solaire. Le mur solaire transpiré non vitré (UTSW) est en bardage métallique avec perforations, installé à plusieurs centimètres du mur du bâtiment, créant ainsi une cavité. Cette étude est une approche d'analyse préliminaire sur l'importance de la forme de l'orifice du panneau perforé pour le transfert de chaleur. L'article présente des données extraites de recherche expérimentale du transfert de chaleur entre la plaque perforée et la circulation de l'air. La comparaison entre deux géométries de perforations en termes de transfert de chaleur a montré de différence significative. La forme innovante de l'orifice lobes a été trouvée plus efficace en ce qui concerne le transfert thermique entre la plaque chauffée et l'air, grâce aux structures tourbillonnaires longitudinales caractéristiques.*

Cuvinte cheie: énergie solaire; mur solaire transpiré non vitré; transfert de chaleur;

Abstract. *The use of renewable energy is an attractive solution to fulfill two requirements: quality indoor and energy efficiency. Passive solar systems are easy to implement and effective in areas with high solar potential. The unglazed transpired solar wall (UTSW) is perforated with metal siding, installed several inches from the building wall, creating a cavity. This study is a preliminary analysis approach to the importance of the shape of the orifice of the perforated panel to the heat transfer. The article presents data from experimental research of heat transfer between the perforated plate and the flow of air. The evaluation between two geometries of perforations in terms of heat transfer showed significant difference. The innovative shape of the lobes orifice has been found more efficient as regards heat transfer between the heated plate and the air, thanks to the longitudinal vortex structures characteristics.*

Key words: solar energy; unglazed transpired solar wall; heat transfer;

1. Introduction

Les demandes des occupants sont de plus en plus exigeantes et atteindre le confort intérieur est l'un des défis les plus importants pour les ingénieurs civils. En général, le secteur du bâtiment consomme 35,3% de la demande totale d'énergie [1, 2]. Cette demande d'énergie est due aux systèmes CVC (Chauffage, Ventilation et Climatisation). Les conditions locales climatiques influent directement sur la consommation d'énergie des bâtiments par des systèmes CVC, s'il y a une demande un chauffage ou de refroidissement. Pendant la saison froide dans les pays froids, la demande de chaleur du bâtiment représente le plus fort pourcentage du montant total de la demande d'énergie, alors que pendant l'été, la ventilation ou le traitement d'air est un grand consommateur d'énergie électrique. Par exemple, au Royaume-Uni, l'énergie utilisée pour la demande de chaleur intérieure était d'environ 50% de la consommation totale d'énergie en 2004. D'autre part, les systèmes de refroidissement à air utilisent plus de 40% de la charge de pointe en été chaud à Shanghai. Tous ces consommations d'énergie, qu'il s'agisse de chauffage ou de refroidissement, peuvent être traduits en termes d'émissions de CO₂ [1, 3, 4].

Dans ce contexte, l'utilisation des énergies renouvelables est une solution attractive pour satisfaire deux exigences: La qualité intérieure et l'efficacité énergétique. Parmi ces énergies renouvelables, les systèmes solaires passifs sont faciles à mettre en œuvre et efficace du point de vue de l'accessibilité dans les zones à fort potentiel solaire [5]. Ces systèmes ont une contribution significative pour atteindre de l'haute performance des enveloppes et dans le même temps économiser de l'énergie pour que ce soit pour le chauffage en hiver ou de climatisation en été. La multitude de solutions pour l'utilisation de l'énergie thermique du soleil présente des avantages importants mais aussi des inconvénients qui maintiennent la recherche dans ce domaine. Parmi eux, les murs thermiques peuvent être divisées en quelques catégories (ex. murs Trombe, les murs solaires eutectiques, autres systèmes qui stockent l'énergie)[6]. Une des solutions les plus intéressantes est, de notre point de vue, les murs capteurs solaires ou Unglazed Transpired Solar Walls (UTSW).

Un UTSW est fait d'une feuille en métal avec des perforations, installée à plusieurs centimètres de la paroi du bâtiment, créant ainsi une cavité. Le dessin schématique de ce type de capteur solaire est tel qu'illustré à la Figure 1. La plaque métallique est chauffée par le rayonnement solaire, et à l'aide d'un ventilateur, on crée une pression négative dans la cavité, l'air étant aspiré et chauffé à travers le panneau perforé. L'air est généralement prise sur le haut du mur (en raison des gradients de température dans la cavité) pour assurer que toute la chaleur solaire produite est recueillie, et en ensuite, distribuée dans le bâtiment par le système de ventilation.

D'autre part, les techniques de mélange passif appliquées aux unités de diffusion pour HVAC ont été fortement développés au cours des dernières années, depuis que des équipes de recherche en collaboration l'Université de La Rochelle et UTCB ont effectué nombreuses études consacrées à ces dispositifs [7-16]. Une nouvelle direction de recherche a été lancée l'année dernière à l'Université de La Rochelle (ULR) en ce qui concerne la possibilité d'utiliser le contrôle passif pour

améliorer le transfert de chaleur pour des jets impactants [17]. Toutes ces études utilisent une géométrie spéciale, qui est appelé "géométrie lobée». Un exemple d'une telle géométrie est l'orifice lobé. La Figure 1 b présenté un panneau percé d'orifices lobes (ou orifices en forme de croix à 4 lobes). Pour la même aire (même diamètre équivalent) le périmètre du jet lobé est beaucoup plus grand que celui de l'orifice circulaire, en augmentant la limite de contact entre le flux d'air passant à travers l'orifice et l'épaisseur de l'orifice. Sous nombres de Reynolds faibles ou modérés, comme celle qui caractérise les écoulements dans le UTSW, l'analyse de la buse lobée élémentaire et orifice jets montre que la forme lobée présente de cisaillement transversal sur les creux du lobe [12, 18-20].

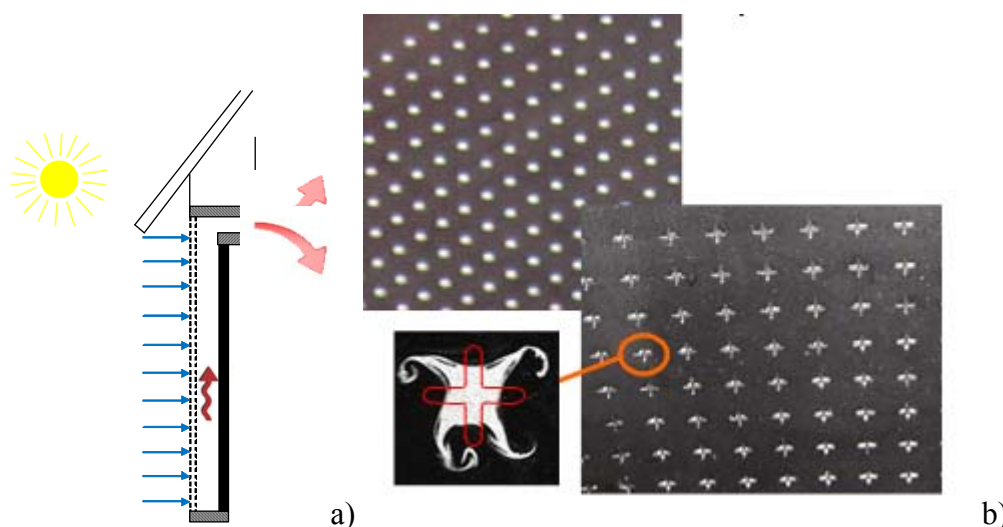


Fig. 1 a) Schéma de UTSW (unglazed transpired solar wall), b) Panneau perforé innovant développé au ULR [21]

Notre idée consiste à introduire orifices lobées innovantes en panneaux perforés utilisés pour UTSW afin d'améliorer dans ces dispositifs passifs de récupération de chaleur solaires. En quelques études récentes [56, 57] certaines caractéristiques intéressantes de l'écoulement en amont de l'orifice lobes ont été mises en évidence: la contrainte de cisaillement à la paroi et les distributions de tourbillons sur le plan amont d'orifice générés dans un jet lobé, à partir de simulations LES, suggèrent la possibilité d'utiliser la géométrie lobée aux UTSW pour un transfert de chaleur élevé.

Cette étude est une première approche des tests expérimentaux pour essayer d'évaluer si les panneaux perforés sont appropriées pour être intégrés dans UTSW.

2. Méthode expérimentale

L'enquête expérimentale a été réalisée dans des conditions contrôlées en laboratoire où la température et l'humidité relative ont été surveillées en permanence. Deux types de panneaux perforés ont été testés. Le panneau de base est de forme ronde et les perforations du panneau innovantes a lobé perforations en forme de croix. Le De diamètre équivalent de deux géométries d'orifices était 5mm. Deux porosités

différentes ont été testées pour chaque type de panneau, en faisant varier la distance entre les deux orifices adjacents de 3 et 4 De.

L'ensemble est composé d'une plaque perforée en acier galvanisé appelée absorbeur.

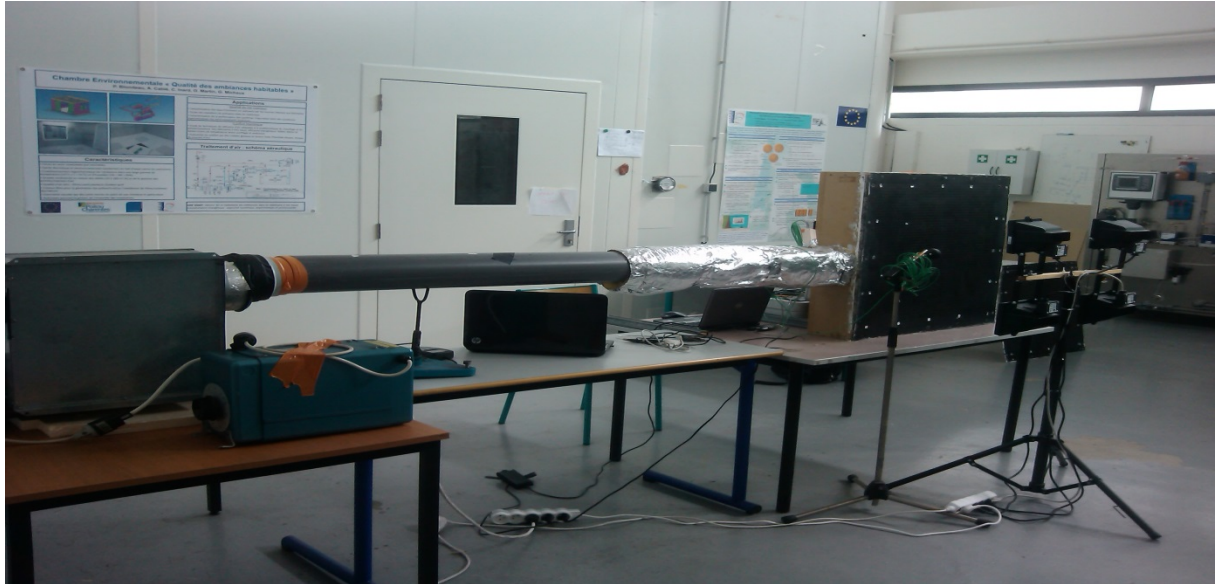


Fig. 2 Photo de la manipulation: le panneau perforé et les lampes de radiation

L'air extérieur est préchauffé dès lors qu'il passe au travers de l'absorbeur, lui-même chauffé par le rayonnement solaire incident, d'une cavité d'air, fermée à toutes ses extrémités, créée par le volume entre l'absorbeur et sa structure support : l'air préchauffé y circule et est canalisé jusqu'au système de traitement de l'air. Un banc expérimental à échelle réduite a été conçu et est présenté. Il s'agit d'une boîte en panneaux bois de 150mm de profondeur et environ 700mm de côté, fermée sur une de ses faces par la plaque perforée à tester.

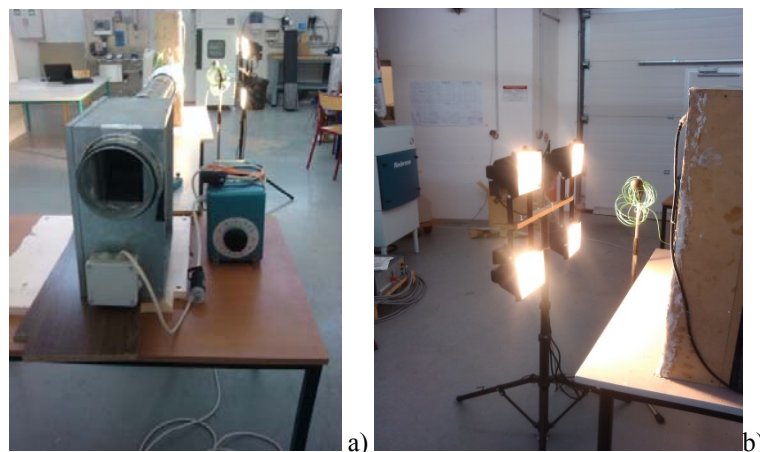


Fig. 3 a) Le ventilateur fonctionnant en aspiration de marque EAB VARIAC et à débit variable; b) L'éclairage solaire simulé par 4 lampes halogène de 400W situées à 50 cm de la plaque

La boîte est reliée à un ventilateur fonctionnant en aspiration. L'éclairement solaire est simulé par quatre lampes halogène de 400W chacune, placées à une distance de 50 cm. Plusieurs couples de plaques perforées circulaire/lobée existent et seront à comparer. Le banc expérimental est instrumenté (capteurs de température, capteur de vitesse), ce qui permet de mesurer la puissance extraite pour chaque plaque perforée. Le débit d'air extrait sera à faire varier et les courbes $Y = \text{Puissance extraite}$ en fonction de $X = \text{débit d'air extrait}$, seront à comparer pour chaque couple de panneaux. Le panneau reçoit presque 800 W/m^2 du flux de chaleur émis par la source ([22]).

Trois sondes de température (thermocouples de type K) ont été utilisés pour mesurer la température de l'air ambiant (T_{amb}), la température de l'air à l'intérieur de la boîte (T_{box}) et la température de l'air à l'entrée de la conduite d'aspiration (T_{pipe}).

Le débit volumétrique extrait a varié entre 10 et 150 m^3 / h . Le débit a été évalué en utilisant des sondes de vitesse omnidirectionnelles de TSI qui a été placé à l'intérieur du tuyau.

3. Résultats et Discussion

Les études réalisées sur les systèmes de murs solaires montrent de bons résultats en termes d'efficacité énergétique. Dans ce contexte, l'utilisation de systèmes solaires passifs est encouragée par les réglementations nationales, car ils peuvent avoir une contribution significative à atteindre des performances élevées et des économies d'énergie pour le chauffage en hiver et en été pour refroidir. Le tableau 1 résume certaines des études de cas disponibles dans la littérature.

Tableau 1

Etudes de cas sur UTSW

Référence	Type	Débit air [$\text{m}^3/\text{h}/\text{m}^2$]	Delta t	Efficienne	Economie d'énergie
[23]	1877 m^2 ; mur vertical; 2% porosité; 1% canopée;	125	12.5 °C	57%	917 $\text{kWh}/\text{m}^2/\text{an}$
[23], [24]	420 m^2 aire; 2%porosité; 1% canopée	72	13 °C	52%	754 $\text{kWh}/\text{m}^2/\text{an}$
[23]	27.9 m^2 ; 2% porosité	N/A	N/A	63-68%	N/A
[25]	335 m^2 ; aluminium ondulé	N/A	N/A	N/A	195 700 kWh/m^2
[25]	Solarwall panneau aire=1.1664 m^2 ; PV cellules couvertes 24% de la surface totale	100	N/A	Efficienne thermique 48% Efficienne combinée 51%	500-1000 $\text{kWh}/\text{m}^2/\text{an}$ En total
[26]	2 m^2 ; mur solaire perforé	117	13.2°C		
Cet étude	0.47 m^2 ; mur solaire perforé; 0.6 % - 10% porosité; panneau noir en aluminium	10-150 [$\text{m}^3/\text{h}/\text{m}^2$]	9°C- 30°C	60-70% pour débits d'air plus grands que 50 [$\text{m}^3/\text{h}/\text{m}^2$]	N/A

Un rapide sondage nous permet d'être au courant des possibilités énormes de tels dispositifs de récupération d'énergie. Par exemple, l'étude CFD de Arulanadam et al. [27] conclut que non seulement les panneaux métalliques pourraient être utilisés pour l'absorbeur perforé mais même les matériaux à faible conductivité peuvent conduire à une efficacité thermique acceptable du système, ou de faible porosité des absorbeurs de plaques transpiré ou pour faibles débits etc. Mais des études comme celles de Van Decker et al. [28], Gunnewieck et al. [29, 30] sont très intéressantes de notre point de vue, compte tenu de l'information connexe sur les possibilités directes d'amélioration de ces dispositifs. L'étude numérique de début de Gunnewieck et al. [29] souligne l'importance d'un écoulement non uniforme et d'une faible vitesse sur l'efficacité des dispositifs de chauffage solaire de l'air transpiré non vitrés de grande surface. Van Decker et al. [28] montre que en conditions sans vent, environ 62% de la hausse de la température finale de l'air est prévu pour le devant de plat, 28% dans le trou et 10% à l'arrière de la plaque.

Cordeau and Barrington [31] dans leur étude sur UTSW utilisé pour amener de l'air frais dans une grange de poulets, révèlent que l'efficacité de l'air en pré-chauffe solaires a atteint 65% pour des vitesses de vent de 2 m/s, mais a chuté sous 25% pour des vitesses de vent supérieures à 7 m / s, avec un retour sur investissement annuel de l'an de 4,7%. Différentes autres études de cas de UTSW [22, 29-39] soulignent l'efficacité énergétique du système de 52% à 68%, soit un bénéfice important en termes de consommation d'énergie fossile.

Dans la présente étude, la chaleur transférée de la plaque à l'air (P) a été quantifiée par l'augmentation de la température de l'air, en utilisant:

$$P = m_{air} * c_p * (T_{pipe} - T_{amb}) \quad (1)$$

m_{air} : débit massique de l'air ;

$c_{p,air}$: chaleur massique de l'air à pression atmosphérique et à température ambiante ;

Quatre cas ont été étudiés par rapport à la configuration standard d'un panneau perforé pour les systèmes commerciaux UTSW. Les cas étudiés sont: 3R - orifices ronds avec $S = 3DE$, 4R - orifices ronds avec $S = 4DE$, 3C - orifices en forme de croix avec $S = 3DE$ et 4C orifices en forme croix avec $S = 4DE$.

Le rendement du panneau a été défini comme:

$$\varepsilon = \frac{P}{I_T A_{pl}} \quad (2)$$

Où P est la chaleur transférée de la plaque à l'air, I c'est l'irradiation fournie par les lampes au niveau de la plaque et A est la surface de la plaque de 0.47 m^2 .

In Fig. 4 nous avons représenté l'évolution du rendement thermique pour les quatre cas étudiés, en comparaison avec le résultat obtenu en utilisant un UTSW commercial et les deux modèles proposés par Belusko et al. et Shukla et al. pour UTSW sans vent et avec des perforations circulaires de même diamètre que dans notre cas [37, 40].

Etude thermique d'un capteur solaire innovant à circulation d'air

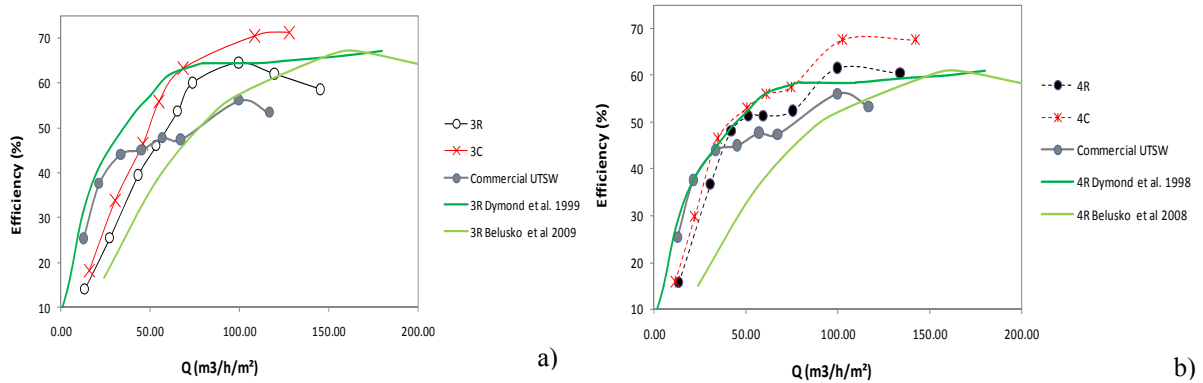


Fig. 4 Efficacité de l'UTSW pour différents débits: a) S=3De, b) S=4De

Pour les deux taux de perforation étudiés dans la présente campagne expérimentale, nous pouvons voir l'avantage de la plaque perforée innovante avec orifices lobés par rapport aux panneaux avec orifices ronds de base. En outre, ils présentent un avantage évident pour des débits élevés par rapport aux modèles analytiques de Belusko et al. et Shukla et al. pour des panneaux ayant des perforations circulaires.

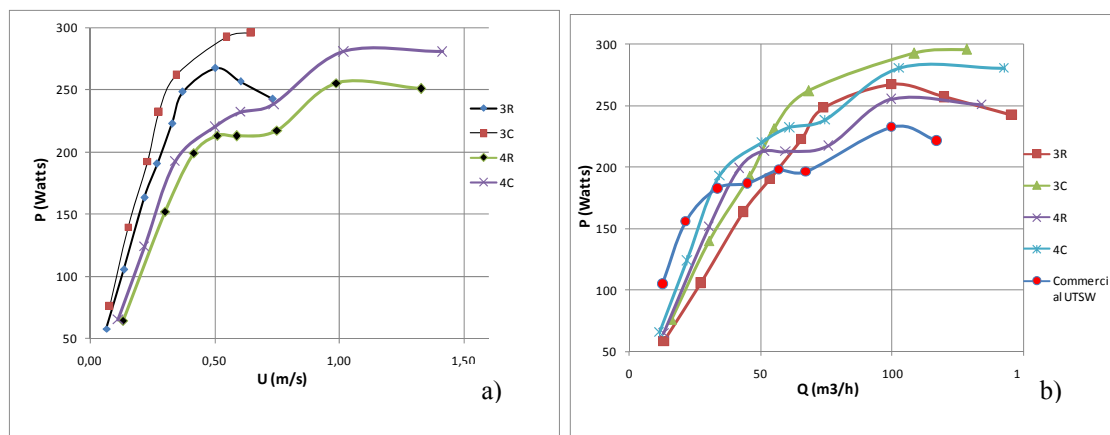


Fig. 5 a) Evolution de transfert de chaleur en fonction de la vitesse dans la conduite, b) l'évolution de transfert de chaleur en fonction du débit de l'air

La même conclusion peut être extraite de la variation de la chaleur transférée par la vitesse sur le trou. Les trous en forme de croix ont un rendement supérieur par rapport aux orifices ronds, jusqu'à 30 W pour chaque type de porosité. Plus la vitesse est élevée, plus la chaleur transférée de la plaque à l'air est grande.

D'autre part, la différence entre la température ambiante et la température du flux d'air qui a traversé la plaque perforée diminue avec l'augmentation de la vitesse ou de débit d'air. Pour le cas 3C et 3R nous avons fait plusieurs mesures pour évaluer plus correctement le transfert de chaleur de ces deux cas.

Tableau 2

Range de debits pour le cas 3C et 3R

Qtube	P_3C	P_3R	Efficacité
m^3/h	W	W	%
20	144,96	120,71	20,08%
40	218,42	183,90	18,77%
60	261,40	220,87	18,35%
80	291,89	247,09	18,13%
100	315,54	267,44	17,99%
120	334,87	284,06	17,89%
140	351,20	298,11	17,81%
160	365,36	310,28	17,75%
180	377,84	321,02	17,70%
200	389,01	330,63	17,66%
220	399,11	339,31	17,62%
240	408,33	347,25	17,59%
260	416,82	354,54	17,56%
280	424,67	361,30	17,54%
300	431,98	367,59	17,52%

Pour évaluer l'efficacité de la plaque 3C, on la compare avec les puissances obtenues sur la plaque 3R (Tableau 2).

En considérant ces valeurs, on voit sur le graphique l'évolution de la puissance en fonction de la gamme des débits. On peut voir que l'efficacité du panneau avec perforations lobées se préserve tout au long de la courbe de variation (Fig. 6).

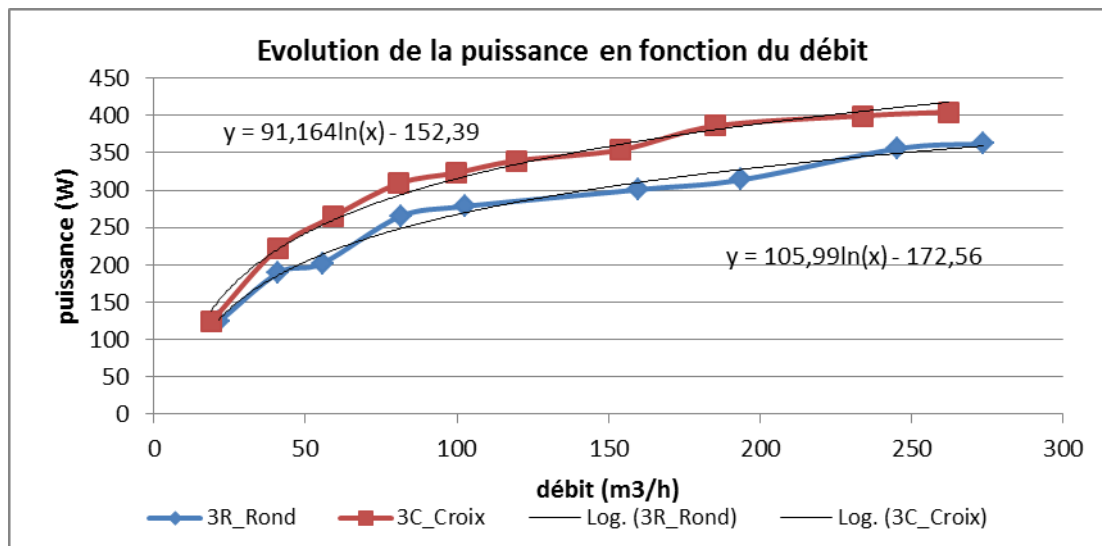


Fig. 6 Evolution de la puissance en fonction du débit

4. Conclusions

L'étude a été un premier test sur un capteur solaire non vitré transpiré (UTSW) qui est équipé de perforations de forme de croix. Le modèle physique utilisé montre de bons résultats en accord avec la littérature. Plus de cela, la comparaison d'un UTSW classique avec un nouveau avec des géométries de perforation innovantes conduit à des résultats intéressants. La géométrie lobée est plus efficace et le cas 3C est le meilleur. Nous pouvons voir que le gain de puissance en choisissant la plaque 3C varie entre 17,5% et 20% ce qui est un rendement assez élevé. Ce gain est seulement testé sur une petite surface de plaque (0,47 m²). A l'échelle d'un bâtiment, cela génère une source d'économie très intéressante.

Les résultats nous laissent supposer que plus la température surfacique de la plaque est basse, plus le rendement de la puissance est meilleur.

Remerciements (Acknowledgements)

CNCS – UEFISCDI, Project numéro PN-II-RU-PD-2012-3-0144.

Références

1. IEA, *Renewables for heating and cooling: untapped potential*. France: OECD/IEA; 2007.
2. Chan, H.-Y., S.B. Riffat, and J. Zhu, *Review of passive solar heating and cooling technologies*. Renewable and Sustainable Energy REviews, 2010. **14**(2): p. 781-789.
3. IEA, *World energy outlook 2007: China and India insights*. France: OECD/IEA; 2007.
4. IEA, *Worldwide trends in energy use and efficiency: key insights from IEA indicator analysis*. France: OECD/IEA. 2008.
5. IEA. *Solar's Untapped Potential*. 2005; Available from: <http://www.iea-shc.org/solarenergy/potential.htm>.
6. Hami, K., B. Draoui, and O. Hami, *The thermal performances of a solar wall*. Energy, 2012. **39**(1): p. 11-16.
7. Meslem, A., I. Nastase, and F. Allard, *Passive mixing control for innovative air diffusion terminal devices for buildings*. Building and Environment, 2010. **45** (2679-2688).
8. Meslem, A., I. Nastase, and K. Abed-Meraim, *Experimental investigation of a lobed jet flow mixing performance*. Journal of Engineering Physics and Thermophysics, 2007. **81**(1).
9. Meslem, A., M. El-Hassan, and I. Nastase, *Analysis of jet entrainment mechanism in the transitional regime by time-resolved PIV*. Journal of Visualization, 2010. **online first**: p. 1-12.

10. Meslem, A., et al., *A comparison of three turbulence models for the prediction of parallel lobed jets in perforated panel optimization*. Building and Environment, 2011. **46**(11): p. 2203-2219.
11. Nastase, I., et al., *Lobed grilles for high mixing ventilation - An experimental analysis in a full scale model room*. Building and Environment, 2011. **46**(3): p. 547-555.
12. Nastase, I., A. Meslem, and P. Gervais, *Primary and secondary vortical structures contribution in the entrainment of low Reynolds number jet flows*. Experiments in Fluids, 2008. **44**(6): p. 1027-1033.
13. Nastase, I., A. Meslem, and M. El Hassan, *Image processing analysis of vortex dynamics of lobed jets from three-dimensional diffusers*. Fluid Dynamics Research, 2011. **43**(6).
14. Nastase, I. and A. Meslem, *Vortex Dynamics and mass entrainment in turbulent lobed jets with and without lobe deflection angles*. Experiments in Fluids, 2010. **48**(4): p. 693-714.
15. Nastase, I. and A. Meslem, *Vortex dynamics and entrainment mechanisms in low Reynolds orifice jets*. Journal of Visualization, 2008. **11**(4).
16. Nastase, I. and A. Meslem. *Lobed jets for improving air diffusion performance in buildings*. in *The 29th AIVC Conference*. 2008. Kyoto, Japon.
17. Kristiawan, M., et al., *Wall shear rates and mass transfer in impinging jets: Comparison of circular convergent and cross-shaped orifice nozzles*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2012. **55**(1–3): p. 282-293.
18. Nastase, I. and A. Meslem, *Vortex Dynamics and Entrainment Mechanisms in Low Reynolds Orifice Jets*. Journal of Visualisation, 2008. **11**(4): p. 309-318.
19. Nastase, I. and A. Meslem, *Vortex dynamics and mass entrainment in turbulent lobed jets with and without lobe deflection angles*. Experiments in Fluids, 2010. **48**(4): p. 693-714.
20. El-Hassan, M. and A. Meslem, *Time-resolved stereoscopic PIV investigation of the entrainment in the near-field of circular and daisy-shaped orifice jets*. Physics of Fluids, 2010. **22**.
21. Meslem, A., I. Nastase, and F. Allard, *Passive mixing control for innovative air diffusion terminal devices for buildings*. Building and Environment, 2010. **45**: p. 2679-2688.
22. Leon, M.A. and S. Kumar, *Mathematical modeling and thermal performance analysis of unglazed transpired solar collectors*. Solar Energy, 2007. **81**(1): p. 62-75.
23. Cali, A., Kutscher, C.F., Dymond, C.S., Pfluger, R., Hollick, J., Kokko, J., et al. , *A report of Task 14 Air Systems Working Group: low cost high performance solar airheating systems using perforated absorbers*, in 1999, International Energy Agency (IEA): Washington.
24. Hollick, J.C., *Unglazed solar wall air heaters*. Renewable Energy, 1994. **5**: p. 415-21.
25. Hollick, J.C., *World's largest and tallest solar recladding*. Renewable Energy, 1996. **9**: p. 703-7.

26. Chan, H.Y., S. Riffat, and J. Zhu, *Experimental performance of unglazed transpired solar collector for air heating*, in *World Renewable Energy Congress*. 2011: Sweden.
27. Arulanandam, S.J., K.G.T. Hollands, and E. Brundrett, *A CFD heat transfer analysis of the transpired solar collector under no-wind conditions*. *Solar Energy*, 1999. **67**(1–3): p. 93-100.
28. Van Decker, G.W.E., K.G.T. Hollands, and A.P. Brunger, *Heat-exchange relations for unglazed transpired solar collectors with circular holes on a square or triangular pitch*. *Solar Energy*, 2001. **71**(1): p. 33-45.
29. Gunnewiek, L.H., E. Brundrett, and K.G.T. Hollands, *Flow distribution in unglazed transpired plate solar air heaters of large area*. *Solar Energy*, 1996. **58**(4–6): p. 227-237.
30. Gunnewiek, L.H., K.G.T. Hollands, and E. Brundrett, *Effect of wind on flow distribution in unglazed transpired-plate collectors*. *Solar Energy*, 2002. **72**(4): p. 317-325.
31. Cordeau, S. and S. Barrington, *Performance of unglazed solar ventilation air pre-heaters for broiler barns*. *Solar Energy*, 2011. **85**(7): p. 1418-1429.
32. Hollick, J.C., *Unglazed solar wall air heaters*. *Renewable Energy*, 1994. **5**(1–4): p. 415-421.
33. Hollick, J.C., *Solar cogeneration panels*. *Renewable Energy*, 1998. **15**(1–4): p. 195-200.
34. Konttinen, P., T. Salo, and P.D. Lund, *Degradation of unglazed rough graphite-aluminium solar absorber surfaces in simulated acid and neutral rain*. *Solar Energy*, 2005. **78**(1): p. 41-48.
35. Sopian, K., et al., *Performance of a non-metallic unglazed solar water heater with integrated storage system*. *Renewable Energy*, 2004. **29**(9): p. 1421-1430.
36. Nábilek, B., et al., *Performance of an unglazed textile-plastic solar absorber*. *Renewable Energy*, 1999. **16**(1–4): p. 635-638.
37. Belusko, M., W. Saman, and F. Bruno, *Performance of jet impingement in unglazed air collectors*. *Solar Energy*, 2008. **82**(5): p. 389-398.
38. Molineaux, B., B. Lachal, and O. Guisan, *Thermal analysis of five unglazed solar collector systems for the heating of outdoor swimming pools*. *Solar Energy*, 1994. **53**(1): p. 27-32.
39. Kumar, S. and S.C. Mullick, *Wind heat transfer coefficient in solar collectors in outdoor conditions*. *Solar Energy*, 2010. **84**(6): p. 956-963.
40. Shukla, A., et al., *A state of art review on the performance of transpired solar collector*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012. **16**(6): p. 3975-3985.