

CARACTÉRISATION EXPÉRIMENTALE D'UN MUR SOLAIRE DOTÉ D'UN REVÊTEMENT TRANSPARENT PERFORÉ

Messaoud **BADACHE**^{a,*}, Stéphane **HALLÉ**^b, Daniel R. **ROUSSE**^c

^a Étudiant gradué, École de technologie supérieure, Montréal, Canada

^b Professeur, École de technologie supérieure, Montréal, Canada

^c Professeur, École de technologie supérieure, Titulaire de la Chaire Industrielle T3E, Montréal, Canada

RÉSUMÉ

Le présent travail porte sur l'évaluation expérimentale des performances thermiques d'un prototype bidimensionnel conçu pour simuler les caractéristiques essentielles d'un nouveau type de collecteur solaire à air avec vitrage perforé (ci-après appelé *Transparent transpired Collector* ou TTC). L'objectif principal consiste à analyser les effets des paramètres clés comme l'épaisseur du plénum, le pas entre les fentes, la largeur des fentes, l'irradiation et le débit massique d'air sur le rendement du collecteur. Les résultats obtenus montrent un effet prépondérant du débit d'aspiration sur le rendement du TTC par rapport aux autres paramètres. Une augmentation du débit provoque une augmentation du rendement. L'augmentation de l'irradiation, de la largeur du plénum, de l'espace entre les fentes, et de la largeur des fentes semblent tous avoir comme effet de diminuer ce rendement.

Mots Clés : rendement, collecteur solaire à vitrage perforé (TTC), étude expérimentale

NOMENCLATURE

Symboles :

A_{coll} surface du collecteur, m²
 b largeur de la fente, mm
 c_p chaleur spécifique de l'air à pression constante, kJ/(kg·°C)
 G_T intensité du rayonnement, W/m²
 H hauteur du collecteur, cm
 k conductivité thermique, W/(m·°C)
 \dot{m} débit massique de l'air par unité de surface, kg/s/m²
 P espace entre les fentes, mm
 T_{coll} température de l'absorbeur, °C
 T_{amb} température ambiante, °C
 T_{out} température de sortie de l'air, °C
 T_{sky} température du ciel, °C
 w épaisseur du plénum, cm

Lettres grecques :

α absorptivité
 λ longueur d'onde, nm
 ε émissivité thermique
 η_{coll} rendement du TTC
 ρ réflectance spectrale
 ρ_{air} masse volumique de l'air, kg/m³
 σ porosité
 τ transmittance spectrale

Indices / Exposants :

abs absorbeur
g vitrage perforé

1. INTRODUCTION

L'intérêt pour le chauffage solaire de l'air s'est traduit depuis quelques années par l'apparition sur le marché d'un bon nombre d'appareils parmi lesquels on trouve les collecteurs solaires à vitrage perforés appelés parfois «*transparent transpired collectors*» (TTCs). Ces collecteurs solaires transforment l'énergie du soleil en énergie thermique qui est ensuite transmise à l'écoulement d'air dans le collecteur. Cette énergie est

utilisée dans différentes applications, comme par exemple, le chauffage des locaux industriels ou à usage d'habitation. Un TTC comprend tous les composants habituels d'un collecteur solaire perforé non vitré «*unglazed transpired collector*» (UTC). La différence principale est qu'au lieu d'un absorbeur en métal perforé, un vitrage en polymère perforé est utilisé. Ce système fonctionne selon un principe semblable à celui de l'UTC. Un système de ventilation est donc nécessaire. Placé en haut du collecteur, ce système permet de forcer

* auteur correspondant

Adresse électronique : messaoud.badache.1@etsmtl.ca

l'air vers l'intérieur du bâtiment, et l'air aspiré ne peut circuler qu'à travers les perforations du vitrage perforé. Contrairement au collecteur opaque, dans ce cas, une large portion du rayonnement solaire est transmise à travers le vitrage perforé (ci-après capteur) et absorbée par la surface généralement noire du mur (en brique ou béton) du bâtiment (ci-après absorbeur). La chaleur recueillie du mur absorbeur est transférée par convection à l'air qui circule à proximité dans le collecteur tandis que les pertes thermiques vers l'extérieur sont limitées par les caractéristiques thermiques du vitrage perforé dont la température de surface est inférieure à celle de sa contrepartie opaque. En effet, l'absorbeur réémet la chaleur dans une gamme de longueurs d'ondes auxquelles le vitrage est quasi opaque. Dans la plupart des applications, le vitrage perforé est constitué de polycarbonate, ce dernier a fait l'objet de plusieurs applications en tant que matériau de vitrage pour les collecteurs solaires [1].

Ce type de collecteurs solaires peut être installé dans les façades des nouveaux bâtiments ou de ceux existants. Il compte plusieurs avantages, à savoir ; un faible poids, une simplicité de fabrication, une résistance à la corrosion, ainsi que de meilleures possibilités d'intégration esthétique par rapport aux collecteurs perforés à absorbeur opaque. Outre ces avantages, les TTCs peuvent être également utilisés en conjonction avec des fenêtres, des façades double peau et d'autres éléments de façades des bâtiments. Un schéma de TTC monté sur un mur de briques est illustré à la figure 1.

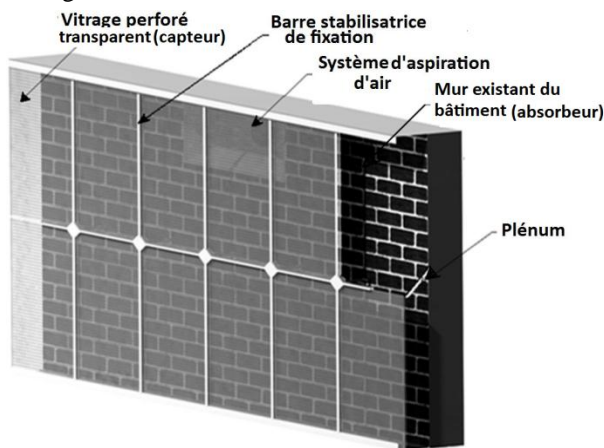


Figure 1 : Schéma d'un TTC installé sur un mur de briques

Conçu pour convertir l'énergie solaire en énergie thermique, les performances de ces systèmes dépendent de plusieurs paramètres à savoir : le rayonnement solaire (irradiation), la géométrie de l'ensemble (épaisseur, superficie, localisation de la prise d'air, assemblage des sous-composantes, etc...), le spectre de transmissivité solaire du capteur, des propriétés thermo-physiques des matériaux, des conditions opératoires et

de fonctionnement l'ensemble du système, de l'environnement et du bâtiment lui-même. Un examen des travaux antérieurs effectués sur des systèmes similaires [2], [3], [4] (façade double peau, façade active transparente, UTC) nous a permis de déterminer les plus importants paramètres susceptibles d'affecter les performances des TTCs (Tableau 1).

Au meilleur de notre connaissance, aucune étude n'a été publiée sur l'évaluation des performances thermiques des TTCs. Ainsi, à un stade précoce de développement de ces dispositifs, il est nécessaire de déterminer leurs performances thermiques en fonction des paramètres d'opération et de conception. Ceci permettra d'évaluer l'importance relative de ces paramètres sur le rendement du TTC.

Cet article présente l'évaluation expérimentale du rendement d'un prototype bidimensionnel de TTC pour plusieurs conditions d'opération et de conception. Les essais sont réalisés en laboratoire sous une irradiation comprise entre 300 et 600 W/m² et un débit massique unitaire d'aspiration de 0,014 kg/s/m², 0,027 kg/s/m² et 0,041 kg/s/m². Pour chaque essai, la température de l'air à l'entrée et à la sortie du collecteur, la température moyenne de la plaque d'absorption (absorbeur) et du vitrage perforé (capteur), sont mesurées une fois l'équilibre thermique atteint dans le TTC. Les paramètres de conception tel que la largeur du plénum (w), la distance entre deux fentes adjacentes (P) et la largeur des fentes (b) ont été variées et leurs influences sur le rendement du TTC ont été déterminées.

Tableau 1: Les paramètres affectant les performances du TTC

Géométriques	diamètre des perforations, pas entre les perforations, épaisseur du plénum, épaisseur du vitrage, hauteur du collecteur, arrangement des perforations, porosité.
Thermo-physiques	conductivité thermique (k_g, k_{abs}), chaleur spécifique ($c_{p,g}, c_{p,abs}$).
Optiques	$\epsilon_{abs}, \alpha_{abs}, \tau_g, \alpha_g, \epsilon_g$, indice de réfraction, coefficient d'extinction du vitrage perforé.
Conditions opératoires	\dot{m} , rayonnement solaire incident, angles d'incidence, T_{amb} , V_{vent} , direction du vent, et T_{sky} .

2. MATÉRIEL ET MÉTHODE

2.1. Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental présenté à la figure 2 comprend essentiellement trois parties : le collecteur perforé, le système d'aspiration d'air et le simulateur solaire.

Le collecteur perforé : Il comprend un vitrage polymère en polycarbonate (PC) avec des fentes et un boîtier construit en bois de dimension 0,32 m de profondeur et 0,60 m de hauteur et une largeur de plenum (w) variable. Le boîtier comporte une paroi arrière et des côtés de 1,9 cm d'épaisseur en contreplaqué. Sur sa face arrière, le collecteur est muni d'une ouverture rectangulaire dans la partie centrale supérieure, qui sert à aspirer l'air dans le conduit horizontal dans lequel le débit massique de l'air est mesuré. La face intérieure du boîtier (absorbeur) a été couverte par une tôle en aluminium, peinte en noir mat ($\epsilon_{abs} = 0,52$, $\alpha_{abs} = 0,96$, $k_{abs} = 216 \text{ W/(m}^2 \text{ } ^\circ\text{C)}$), tandis que la face extérieure et les côtés sont isolés avec 10 cm de polystyrène, puis renforcés par une feuille de 0,5 cm d'épaisseur de thermoplastique «thermo-foil». La résistance thermique de l'ensemble est estimée à $1 \text{ (m}^2 \text{ } ^\circ\text{C)/W}$. L'ensemble est fixé sur un socle en bois conçu pour positionner et déplacer le collecteur. La largeur du plenum a été variée, en augmentant l'épaisseur (w) de 5 cm à 15 cm. Plus d'information sur la manière dont le niveau de l'épaisseur du plenum (w) a été modifié est fournie dans [5].

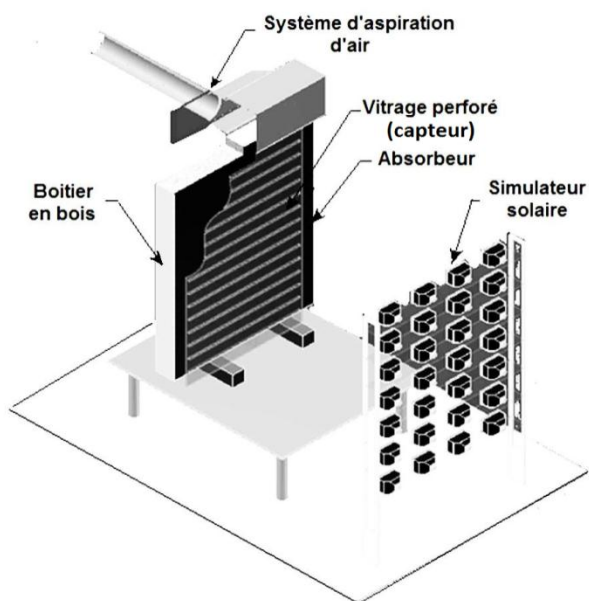


Figure 2 : Montage expérimental du TTC

Quatre plaques de polycarbonate rectangulaires ont été testées (3 mm d'épaisseur par 0,36 m de largeur par 0,48 m de hauteur). Chaque plaque d'essai comprend une série de fentes équidistantes. Elles sont caractérisées par la largeur des fentes (b) et l'espacement entre les fentes (P). Au total, le vitrage perforé comprend 21 fentes pour $P = 20 \text{ mm}$ et 15 fentes pour le cas $P = 30 \text{ mm}$.

Le système d'aspiration d'air : Il comprend les trois parties suivantes: un ventilateur d'aspiration d'air; un variateur de vitesse; et un conduit d'échappement d'air.

L'air est aspiré à partir du plenum par un ventilateur de type axial modèle DB206, (75,5 L/s) installé dans la conduite d'échappement circulaire (15 cm de diamètre extérieur et 1,5 m de longueur). Le contrôle de la vitesse du ventilateur est rendu possible grâce à un variateur de vitesse (modèle 3PN116B) et qui permet le réglage du débit d'air nécessaire dans les expériences (0,014, 0,027 et 0,041 kg/s/m²). La température et le débit massique de l'air à la sortie sont mesurés en amont du ventilateur.

Le simulateur solaire : Il comprend 28 projecteurs (globe®-6550) chacun comprenant une ampoule T3/J-TYPE /78mm de 150 Watts. Les ampoules fournissent collectivement une intensité radiative totale de 4,2 kW. Des lampes halogènes classiques produisant une irradiation entre 300 et 700 W/m² ont été sélectionnées car elles fournissent un spectre proche de celle d'un corps noir à 3500 K ce qui était la source de rayonnement disponible s'approchant le plus du spectre solaire qui culmine dans le visible.

2.2. Mesures expérimentales

L'instrumentation doit permettre de mesurer les paramètres nécessaires à la réalisation des expériences. Les mesures effectuées concernent les données suivantes :

- l'irradiation (G_T) qui intercepte le plan du capteur ;
- les températures de l'air ambiant (T_{amb}) et de sortie (T_{out}) ;
- les températures de l'absorbeur (T_{abs}) et du vitrage perforé (T_g) ;
- le débit massique de l'air à la sortie (\dot{m}) ;
- les propriétés optiques spectrales du polycarbonate ;
- la vitesse de l'air du laboratoire (V_{vent}).

Les propriétés thermo-physiques de l'air (c_p , ρ_{air}) utilisées dans le calcul du débit massique ont été prélevées des tables disponibles dans [6] correspondant à la température moyenne de la sortie de l'air T_{out} . L'effet de l'humidité sur les propriétés thermo-physiques a été supposé négligeable puisque la variation d'humidité relative dans le laboratoire pendant les tests était faible. Les tests ont été réalisés essentiellement dans l'air calme. La vitesse de l'air mesurée en laboratoire (V_{vent}) se situait entre 0,1 et 0,15 m/s.

2.2.1. Mesure de l'irradiation

Le rayonnement des lampes est mesuré par un pyranomètre Kipp & Zonen. Il s'agit du modèle CMP 11, avec une incertitude sur la mesure de $\pm 7 \text{ W/m}^2$. L'instrument est classifié selon la classe 1 du WMO (ISO 9060). L'irradiation globale reçue sur la surface plane du capteur (G_T) en W/m² peut être calculée en divisant le signal de la tension de sortie (U_{emp}) par la sensibilité nominale propre de l'appareil S qui est égale

à $9,17 \mu\text{V}/(\text{W}/\text{m}^2)$, comme indiqué dans la relation $G_T = U_{enf} / S$.

2.2.2 Mesure du débit

Le débit massique est mesuré par un anémomètre à fil chaud (TSI, modèle VELOCICALC 9545). Ce modèle est équipé d'une sonde thermique et d'une sonde de mesure de vitesse. Cet appareil permet la mesure de la vitesse sur une plage comprise entre $0,13 \text{ m/s}$ à $10,16 \text{ m/s}$ avec une incertitude de lecture de 3% ou $\pm 0,015 \text{ m/s}$ (sur la lecture la plus élevée). Les calculs du débit massique de l'air (\dot{m}) ont été effectués conformément à l'équation $\dot{m} = \rho_{air} \bar{V} A_p$, où \bar{V} est la vitesse moyenne de sortie de l'air, qui a été mesurée à cinq positions à l'intérieur de la conduite d'échappement d'air.

2.2.3. Mesure de température

Pour mesurer la température, dix-sept thermocouples ($0,2 \text{ mm}$ de diamètre) de type K ont été disposés à différentes positions. Quatre thermocouples ont été insérés verticalement le long de la ligne centrale de l'absorbeur, et quatre autres furent insérés dans des positions similaires sur le vitrage perforé. Deux thermocouples ont été installés pour mesurer les températures de la partie arrière du collecteur (partie isolée et non exposée à l'irradiation des lampes) pour estimer les pertes de chaleur à travers la paroi arrière et les côtés. Quatre thermocouples furent employés pour mesurer T_{amb} , l'un entre eux fut placé en face du collecteur (dans un abri revêtu d'une couche de peinture blanche et suffisamment aéré, qui vise à réduire les effets du rayonnement des lampes) tandis que les autres furent placés derrière le collecteur. Trois autres thermocouples ont été employés pour mesurer la température de sortie d'air (T_{out}) au niveau du conduit d'échappement avant le ventilateur. Les thermocouples ont été étalonnés entre 0 et $50 \text{ }^\circ\text{C}$. Afin de déterminer la température réelle de surface du PC (T_g) les mesures ont été corrigées par la méthode décrite dans [7].

2.2.4. Mesure des propriétés solaires et radiatives du capteur en polycarbonate

La détermination des propriétés optiques du polycarbonate; la transmissivité, (τ_g), le coefficient d'absorption (α_g), et la réflectivité, (ρ_g) est requise. Pour des températures de fonctionnement entre 300 et 350 K , plus de 90% de la puissance émise par le TTC est contenue dans la région de 900 à 8000 nm du spectre. Par conséquent, ces propriétés ont été déterminées au moyen de deux appareils. Entre 175 à 2500 nm , la transmittance et réflectance spectrale ont été mesurées avec un spectrophotomètre CARRY 5000 ayant une incertitude de $0,1\%$ pour les UV-Vis et à $0,4\%$ pour le proche infrarouge (NIR). Les propriétés dans ces longueurs d'ondes sont utiles pour le rayonnement incident. Les mesures entre 2500 et 15000 nm ont été

obtenues avec un spectromètre à transformée de Fourier infrarouge (Nicolet 6700) possédant une résolution spectrale de $0,125 \text{ cm}^{-1}$. La transmittance et réflectance spectrales sont présentées (figure 3) pour une plaque de polycarbonate de 3 mm d'épaisseur.

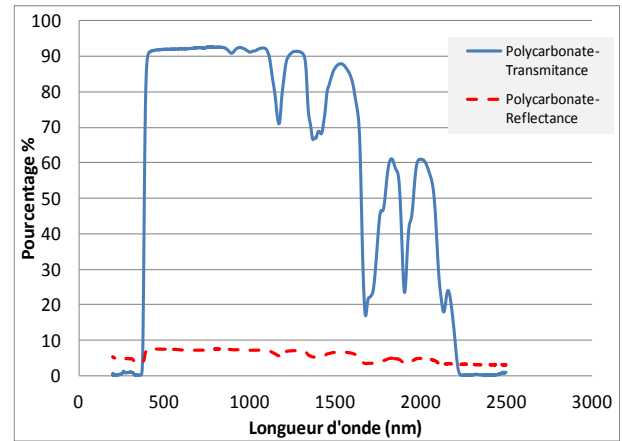


Figure 3 : Propriétés spectrales du polycarbonate

La figure 3 indique que le polycarbonate transmet 90% du rayonnement visible et qu'ensuite cette transmissivité chute dans le proche infrarouge pour éventuellement atteindre environ zéro vers 2200 nm . La réflectance oscille autour de 5% partant de 8% dans le visible pour atteindre environ 3% vers 2500 nm . Le rayonnement qui n'est ni transmis ni réfléchi est absorbé par le capteur ce qui induit une augmentation de sa température par rapport à la température ambiante.

2.3 Procédure d'essai et observations initiales

Un essai typique est effectué de la manière suivante. Le vitrage perforé est monté sur la face avant du boîtier en bois, l'épaisseur du plénum est fixée à la valeur correspondante de 5 cm ou 15 cm . Le débit massique est ajusté à la valeur désirée. Le simulateur solaire est mis en marche, et l'irradiation est ajustée (à l'aide du pyranomètre) à une valeur constante au cours de la période d'essai (entre 300 et $600 \text{ W}/\text{m}^2$). Les mesures prennent généralement de 3 à 4 heures pour atteindre l'équilibre thermique, au cours duquel T_{amb} ne varie pas de plus de $2 \text{ }^\circ\text{C}$. L'enregistrement est effectué en utilisant un module d'acquisition de données classique (National Instrument-Unis, SCXI-1000). Le rendement du TTC est déterminé selon l'équation (1).

$$\eta_{coll} = \frac{\dot{m} c_p (T_{out} - T_{amb})}{A_{coll} G_T} \quad (1)$$

Les observations initiales suivantes ont été faites:

- Les températures ambiantes enregistrées à la face avant du TTC étaient plus élevées ($1 - 1,5 \text{ }^\circ\text{C}$) que celles enregistrées à des positions plus éloignées. La température de l'air entrant dans le TTC est prise comme la température de l'air ambiant au collecteur avant.

- La température du vitrage perforé (T_g) est supérieure à T_{amb} , mais inférieure à T_{abs} . Ceci indique que le vitrage perforé absorbe une partie du rayonnement émis par l'absorbeur. Des observations similaires ont été faites par [8, 9], mais sur des collecteurs plats non perforés. [10] a rapporté que 40% de la chaleur absorbée dans un collecteur solaire peut être transférée par rayonnement à partir de la plaque absorbante au vitrage. Dans cette étude, cette tendance peut être également attribuée à la source de lumière utilisée dans les expériences, car sa distribution spectrale est décalée vers l'infrarouge par rapport à l'irradiation solaire, comme son maximum d'émission se produit à $\lambda = 970$ nm tandis que celle du soleil est à $\lambda = 500$ nm.
- Les températures T_{abs} et T_g sont considérées comme étant la moyenne des températures mesurées à quatre emplacements différents sur l'absorbeur et sur le vitrage perforé, respectivement.

3. RESULTATS ET DISCUSSIONS

Les résultats présentés dans cette section indiquent le rendement du TTC en fonction du débit massique. Deux épaisseurs de plénum (5 cm et 15 cm), deux pas entre les fentes (2 cm et 3 cm), deux largeurs de fentes (1 mm et 2 mm) et deux niveaux d'irradiation (350 et 600 W/m^2) ont été testés.

La figure 4 illustre la variation du rendement fonction du débit massique pour deux largeurs de fentes (1 mm et 2 mm) et deux niveaux d'irradiation $G_T = 300$ et 600 W/m^2 , avec w et P fixés à 5 cm et 2 cm, respectivement.

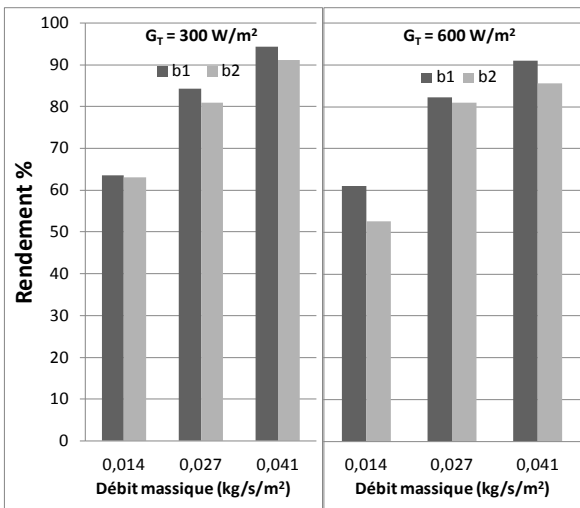


Figure 4 : Rendement vs débit massique pour $b=1$ et 2 mm, $G_T = 300$ et 600 W/m^2 , $w = 5$ cm et $P = 2$ cm

La figure 5 montre la variation du rendement fonction du débit massique pour deux épaisseurs de plénum (5 cm et 15 cm) et deux niveaux d'irradiation $G_T = 300$ et 600 W/m^2 , avec P et b fixés à 2 cm et 1 mm, respectivement.

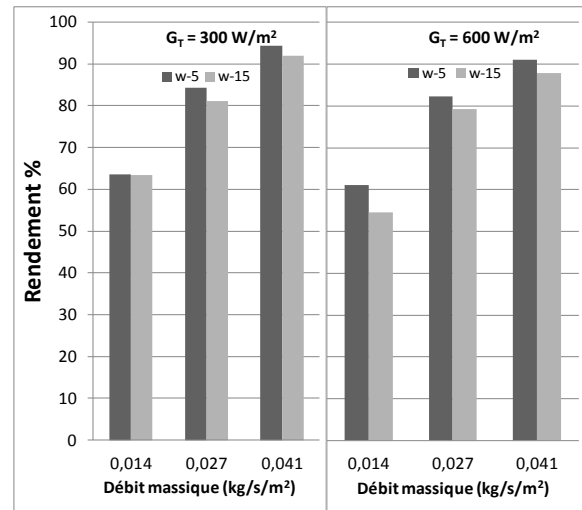


Figure 5 : Rendement vs débit massique pour $w=5$ et 15 cm, $G_T = 300$ et 600 W/m^2 , $P = 2$ cm et $b = 1$ mm

Enfin, la figure 6 explore la variation du rendement en fonction du débit massique pour deux pas entre les fentes (2 cm et 3 cm) et deux largeurs de fentes (1 et 2 mm), avec G_T et w fixés à 300 W/m^2 et 5 cm, respectivement.

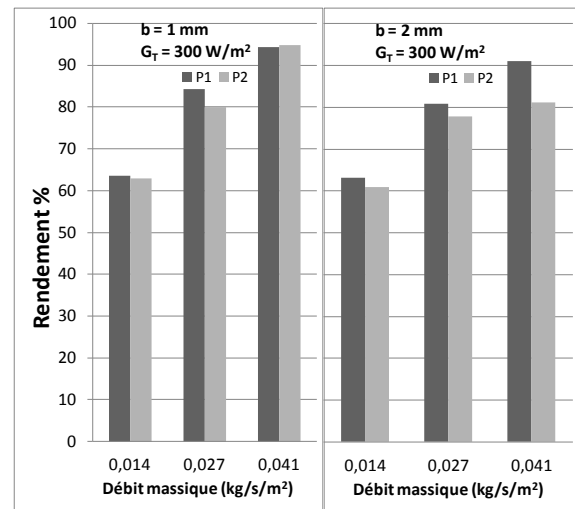


Figure 6 : Rendement vs le débit massique pour $P = 2$ et 3 cm, $b = 1$ et 2 mm, $G_T = 300$ W/m^2 et $w = 5$ cm.

3.1. Effet du débit massique

Les figures 4, 5, et 6 indiquent que l'augmentation du débit massique entraîne une augmentation du rendement du collecteur. Ceci s'explique d'abord par le fait que lorsque le débit d'air augmente, les vitesses d'écoulement dans le collecteur sont plus élevées, ce qui induit des échanges thermiques convectifs plus importants tant à la paroi de l'absorbeur que sur la face interne du capteur. Un débit élevé aspire aussi plus d'air sur la surface externe du capteur ce qui en diminue la température de surface et limite ainsi les pertes à l'environnement. En raison de la relation non linéaire entre le rendement et le débit, le rendement augmente,

rapidement, à faible débit (environ 22,4%), (entre 0,014 et 0,027 kg/s/m²), mais seulement de 7,6% à des débits supérieurs à 0,027 kg/s/m². Une tendance similaire a été observée par [5, 11] sur des UTCs.

3.2. Effet du rayonnement

Les figures 4 et 5, montrent que l'augmentation du niveau de l'irradiation de 300 à 600 W/m² entraîne une faible diminution du rendement du collecteur pour les trois niveaux du débit d'air. Ce fait n'est pas surprenant puisqu'une augmentation de l'irradiation, induira une augmentation de la température de surface du collecteur (absorbeur et capteur) qui induit une augmentation des pertes de chaleur radiative vers l'environnement.

3.3. Effet de l'épaisseur du plénum

L'influence de la distance capteur-absorbeur est présentée sur la figure 5. On observe que le rendement décroît peu lorsque l'on augmente la distance entre absorbeur et le vitrage perforé. Cet effet peut être attribué au fait que pour un débit massique d'air maintenu constant, un étroit plénum induit des vitesses d'écoulement plus élevées qu'un large plénum, ce qui induit un coefficient de transfert de chaleur plus important.

3.4. Effet de la largeur des fentes et du pas entre les fentes

On remarque sur la figure 4 que pour un rayonnement et un pas entre les fentes fixés à 300 W/m² et 2 cm respectivement, une augmentation de la largeur des fentes de 1 mm à 2 mm se traduit par une diminution du rendement. Les mêmes observations s'appliquent pour un rayonnement de 600 W/m². De même, une augmentation du pas entre les fentes de 2 cm à 3 cm pour un rayonnement et une largeur de fentes fixés à 300 W/m² et 1 mm respectivement, se traduit par une baisse du rendement (figure 6). Les mêmes observations s'appliquent pour la largeur de fentes de 2 mm. Ces faibles effets dus à la largeur de fente et le pas entre les fentes sur le rendement indiquent que la majorité du transfert de chaleur se produit au niveau de l'absorbeur.

Les augmentations de la largeur des fentes (de 1 mm à 2 mm) et du pas entre les fentes (de 2 cm à 3 cm) entraînent une diminution de la surface du vitrage de 5% et 4,16%, respectivement. Cette diminution de la surface du vitrage entraîne une baisse du rendement du TTC.

CONCLUSION

Les effets de la variation du débit massique d'air, de l'irradiation, de l'épaisseur du plénum, de la largeur des fentes et du pas entre les fentes ont été étudiés expérimentalement pour en déterminer l'effet sur le rendement du TTC. Trois remarques importantes

peuvent être formulées à partir des résultats de cette étude.

Tout d'abord, le rendement du TTC augmente avec l'augmentation du débit massique de l'air. Ce paramètre a un effet prépondérant sur le rendement par rapport aux autres paramètres.

En second lieu, l'augmentation de l'irradiation, de la largeur du plénum, de l'espace entre les fentes, et de la largeur des fentes ont tous comme effet de diminuer le rendement.

Troisièmement, la présente étude fournit une base de données pour un modèle 2D à partir de laquelle une étude numérique peut être effectuée dans l'avenir. Il s'agit notamment de l'extension du présent travail à l'écoulement et au transfert de chaleur à travers le TTC.

REMERCIEMENTS

Les auteurs désirent remercier les partenaires de la Chaire de recherche t3e : Ville de Lévis, Ecosystem, Ultramar, CRE-CA, SDE-Lévis et Roche. Ils remercient aussi le CRSNG pour son support financier.

RÉFÉRENCES

- [1] TJANDRAATMADJA, G.F., L.S. BURN, and M.C. JOLLANDS, Evaluation of commercial polycarbonate optical properties after QUV-A radiation—the role of humidity in photodegradation. *Polymer Degradation and Stability*, **78**(3): p. 435-448, (2002).
- [2] GUARDO, A., et al., A CFD approach to evaluate the influence of construction and operation parameters on the performance of Active Transparent Façades in Mediterranean climates. *Energy and Buildings*, **41**(5): p. 534-542, (2009).
- [3] MARTINOPOULOS, G., et al., CFD modeling of a polymer solar collector. *Renewable Energy*, **35**(7): p. 1499-1508, (2010).
- [4] PAPPAS, A. and Z. ZHAI, Numerical investigation on thermal performance and correlations of double skin façade with buoyancy-driven airflow. *Energy and Buildings*, **40**(4): p. 466-475, (2008).
- [5] BADACHE, M., S. HALLÉ, and D. ROUSSE, Experimental and numerical simulation of a two-dimensional unglazed transpired solar air collector. *Solar Energy*, *Accepté pour publication*, 29 décembre (2012).
- [6] INCROPERA, F.P., et al., *Fundamentals of heat and mass transfer*: Wiley, (2011).
- [7] TROMBE, A. and J.A. MOREAU, Surface temperature measurement of semi-transparent material by thermocouple in real site experimental approach and simulation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **38**(15): p. 2797-2807, (1995).
- [8] CHEN, Z., et al., An experimental investigation of a solar chimney model with uniform wall heat flux. *Building and Environment*, **38**(7): p. 893-906, (2003).
- [9] BUREK, S. and A. HABEB, Air flow and thermal efficiency characteristics in solar chimneys and Trombe Walls. *Energy and Buildings*, **39**(2): p. 128-135, (2007).
- [10] SANDBERG, M. and B. MOSHFEGH, Investigation of fluid flow and heat transfer in a vertical channel heated from one side by PV elements, part II-Experimental study. *Renewable Energy*, **8**(1): p. 254-258, (1996).
- [11] LEON, M.A. and S. KUMAR, Mathematical modeling and thermal performance analysis of unglazed transpired solar collectors. *Solar Energy*, **81**(1): p. 62-75, (2007).