

Modélisation d'un système de chauffage passif dans la région de Béchar

Khelifa Hami*, Belkacem Draoui et Omar Hami

Faculté des Science et Technologie,
Université de Béchar, B.P. 417, 08000 Béchar

(reçu le 21 Janvier 2010 – accepté le 20 Juin 2010)

Résumé - Dans le présent travail nous avons modélisé la convection naturelle en régime laminaire dans un local chauffé par la technique d'un mur Trombe ventilé adapté au site de la ville de Béchar (sud ouest de l'Algérie), d'une journée type d'hiver. Les équations régissant le mouvement d'air et le transfert de chaleur à l'intérieur du local sont résolues numériquement à l'aide de l'un des codes CFD 'Fluent'. L'influence de la variation de la profondeur de la cheminée solaire sur le rendement thermique du système a été étudiée. Le principe de fonctionnement du système est visualisé, les températures obtenues au niveau de la zone d'occupation sont adaptables à l'intervalle du confort thermique. Les résultats de simulation sont en bon accord avec ceux de la littérature.

Abstract - In this work we modelled the natural convection in laminar mode in a room heated by the technique of a ventilated wall Trombe adapted to the site of Bechar (southern oust of Algeria), of a typical winter day. The equations governing the movement of air and the transfer of heat inside the room are solved numerically using one of CFD codes 'Fluent'. The influence of the solar chimney depth variation of the on the thermal efficiency of the system has been studied. The principle of the system functioning is visualized. The temperatures obtained on the level of the occupation zone are adaptable to the interval of the thermal comfort. The results of simulation are in concord with those of the literature.

Mots clés: Convection naturelle - Chauffage passif - Energie solaire – Modélisation numérique - Mur Trombe.

1. INTRODUCTION

Compte tenu de l'épuisement et le coût des énergies utilisées actuellement, telles que les énergies fossiles, et du constat établi par les experts concernant les exigences écologiques, il est nécessaire de trouver des nouvelles sources d'énergies propres et gratuites, c'est-à-dire des énergies renouvelables, afin de préserver les ressources planétaires pour les générations futures.

Dans le contexte actuel, l'énergie solaire est une alternative la plus intéressante et la plus avantageuse. Notre objectif est de l'utiliser dans l'habitat. Notre travail consiste à l'utilisation d'un mur capteur-stockeur (mur Trombe) qui reste l'un des systèmes les plus efficaces pour le chauffage passif des locaux. Les performances de ce mur dépendent de plusieurs paramètres, à savoir: sa nature, son épaisseur, présence ou non de thermocirculation. Dans ce travail, nous prévoyons une simulation numérique de la convection naturelle en régime laminaire dans un local muni d'un mur Trombe ventilé pendant une journée type d'hiver à l'aide de l'un des codes CFD 'Fluent'.

* hamikhelifa@yahoo.fr

2. POSITIONNEMENT DU PROBLEME

Dans ce travail, nous prévoyons une simulation numérique de la convection naturelle en régime laminaire d'un écoulement d'air chauffé par un mur **Trombe** ventilé en utilisant l'un des codes CFD 'Fluent' (Version: 6.3.26) d'une journée type d'hiver du site de la ville de Béchar, avec toutefois du soleil de 8 h 00 à 18 h 00 (Fig. 1).

2.1 Géophysique de la ville de Béchar

-Latitude 31°37' N, - Longitude 2°14' W, - Altitude 813 m.

2.1 Approximation

Nous pouvons considérer que le flux solaire ϕ (en W/m^2) arrivant sur la face extérieure du mur Trombe entre 8 h 00 et 18 h 00 est de valeur maximale 550 (W/m^2) à 13 h 00:

- Local est inoccupé ou seulement chauffé par le rayonnement solaire direct à travers le vitrage, de 8 h 00 à 18 h 00;
- Comment va évoluer pendant les 24 heures de fonctionnement du système, la température;
- $T(t)$ de l'air à l'intérieur du local si cette température est initialement de 10 °C ?

$$\phi(t) = 550 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{36000}t\right) = \text{Flux solaire (W/m}^2\text{)} \quad (1)$$

Le temps t est exprimé en seconde. Le flux solaire incident sur la vitre ϕ (W/m^2)

36000 s = 10 h: c'est le temps d'ensoleillement, correspondant à la durée du jour en hiver, soit $\phi_{\max} = 555$ (W/m^2), c'est le flux solaire maximum à 13 h 00.

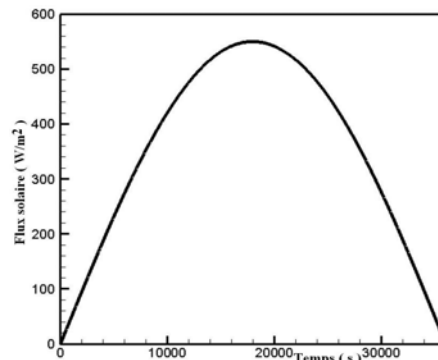


Fig. 1: Flux solaire hivernal (mois de janvier) de la ville de Béchar

3. MODELISATION

Notre modèle sert à décrire:

- Le phénomène physique de 'la convection naturelle en régime laminaire dans un local chauffé par un mur Trombe ventilé'.
- Le fonctionnement d'un système de 'chauffage passif par la technique d'un mur Trombe ventilé'.

- Le comportement d'un système naturel de 'chauffage passif par la technique d'un mur Trombe ventilé'.
- Développer et optimiser un système physique de 'chauffage passif par la technique d'un mur Trombe ventilé'.

3.1 Conditions théoriques

- Orientation du local plein sud et en plein solaire (orientation optimale).
- Masse suffisante pour les murs et les dalles (inertie thermique).
- Isolation thermique des parois (pour éviter les pertes thermique).
- Disponibilités des protections solaires naturelles ou artificielles (pour éviter la surchauffe).

3.2 Principe de fonctionnement

L'air au contact de ce mur s'échauffe (Fig. 2), s'élève, et pénètre dans le local à travers des orifices en partie haut du mur. L'air intérieur, plus froid, est dégagé naturellement par les orifices inférieurs. Ce parcours est appelé '**thermocirculation**'. Le chauffage du local est obtenu principalement par convection sur la face interne du mur qui restitue la chaleur stockée avec un certain déphasage, alors qu'un chauffage instantané est possible grâce à la '**thermocirculation**'. Des clapets sont placés devant les orifices inférieurs pour éviter une circulation inverse la nuit [2].

3.3 Modèle géométrique

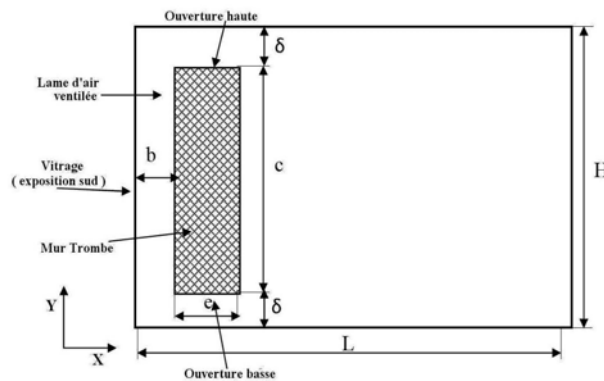


Fig. 2: Modèle géométrique du local étudié

Tableau 1: Description des configurations étudiées

Cas étudiés	H (m)	L (m)	c (m)	e (m)	δ (m)	b (m)
Cas-1	3	5	2.80	0.60	0.20	0.30
Cas-2	3	5	2.80	0.60	0.20	0.30

Tableau 2: Propriétés physiques des matériaux choisis pour la simulation

Cas étudiés	ρ (kg/m ³)	λ (W/m.K)	C_p (J/kg.K)	β (1/K)
Fluide (air)	3	5	2.80	0.60
Solide (béton)	3	5	2.80	0.60

3.4 Modèle mathématique

Pour la formulation mathématique des équations régissant le mouvement d'air et le transfert de chaleur à l'intérieur du local, on adopte les hypothèses suivantes:

- L'écoulement et le transfert de chaleur sont bidirectionnels (2D) et instationnaire,
- L'écoulement est laminaire compte tenu des dimensions et des faibles gradients de température rencontré généralement en thermique des bâtiments,
- L'air est incompressible et newtonien,
- Les propriétés thermophysiques de l'air sont indépendantes de la température, sauf pour la masse volumique de l'air dans le terme de poussée, où celle-ci varie linéairement en fonction de la température et est donnée par la relation suivante:

$$\rho = \rho_0 [1 - \beta(T - T_0)] \quad (2)$$

Compte tenu de ces hypothèses, les équations traduisant la conservation de masse (3), de la quantité de mouvement (4) et de l'énergie (5) peuvent s'écrire:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3)$$

$$\rho \cdot \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) = - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) + F_i \quad (4)$$

$$\rho \cdot C_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} + \rho \cdot C_p \cdot u_i \frac{\partial T}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) \quad (5)$$

3.5 Conditions initiales et aux limites

Initialement, on ne considère que la température de l'air à l'intérieur du local (Fig. 3) et constante:

- $T(x, y, 0) = 10^\circ\text{C}$
- L'air est en repos (sans mouvement): $U = V = 0$
- Sur les parois internes du local (condition de non glissement): $U = V = 0$
- Au niveau de la surface gauche du mur Trombe, $x = b$, $\delta \leq y \leq (H - \delta)$

$$\varphi_{x=b} = 550 \times \sin\left(\frac{\pi}{36000} \times t\right), \quad \text{avec: } 0 < t < 36000$$

- Verticale gauche (vitrage), $x = 0$, $\frac{\partial T}{\partial x} = 0$
- Verticale droite (mur latéral à droite du local), $x = L$, $T = T_f$
- Verticale droite (surface à droite du mur Trombe), $x = (b + e)$ et $\delta \leq y \leq (H - \delta)$, $\frac{\partial T}{\partial x} = 0$

- Horizontale haute (plafond), $y = H$, $\frac{\partial T}{\partial y} = 0$
- Horizontale basse (sol), $y = 0$, $T = T_f$

- Horizontale haute du mur Trombe, $x = b$ et $y = (H - \delta)$, $\frac{\partial T}{\partial y} = 0$
- Horizontale basse du mur Trombe, $x = b$ et $y = \delta$, $\frac{\partial T}{\partial y} = 0$

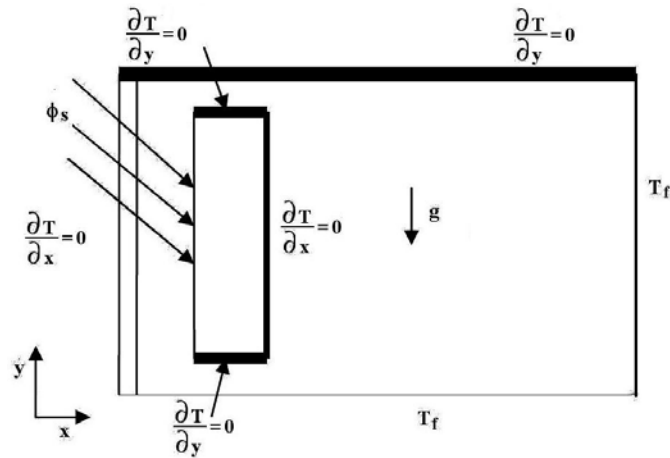


Fig. 3: Modèle physique étudié

4. RESOLUTION NUMERIQUE

Le tableau suivant résume le choix des méthodes et les algorithmes pour la résolution numérique.

Tableau 3: Choix des méthodes et des algorithmes pour la résolution numérique

Méthodes ou algorithmes de résolution	
Discretisation	Volumes finis
Couplage pression – vitesse	Algorithme SIMPLE
Schéma d'interpolation	• Pression: Body force weighted • Quantité de mouvement: Power law • Energie: Power law
Facteur de sous-relaxation	• Equation de quantité de mouvement = 0.5 • Equation de l'énergie = 0.7 • Equation de continuité = 0.3
Résolution du système d'équations discrétisées	Méthode itérative de Gauss – Seidel pour un système linéaire
Contrôle de la Convergence (résidus)	Résidus normalisés : • Continuité = 10^{-4} • Quantité de mouvement = 10^{-4} • Energie = 10^{-8}

5. RESULTATS ET DISCUSSIONS

Les résultats obtenus sont présentés sous forme de figures pour différentes valeurs de la profondeur de la cheminée solaire afin de voir son influence sur le rendement thermique du système.

5.1 Influence de l'ensoleillement sur la température de la surface extérieure du mur Trombe

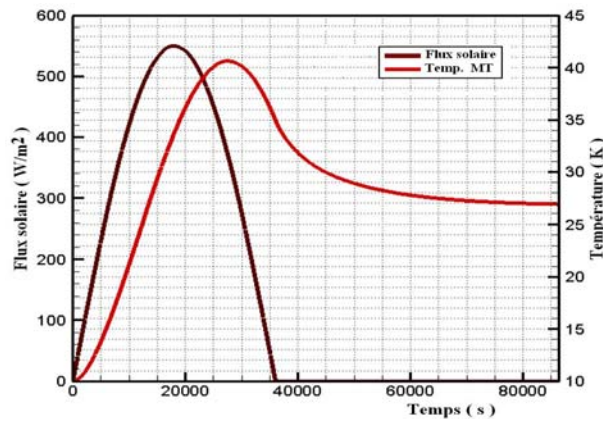


Fig. 5: Evolution de la température au niveau de la surface extérieure du mur Trombe

La figure 5 montre l'influence de l'ensoleillement sur la température de la surface gauche de mur Trombe ventilé, remarquons que l'évolution de la température au niveau de cette surface augmente lorsque le flux solaire augmente et elle diminue lorsque le flux solaire diminue. Ce résultat obtenu montre qu'il y a un gain thermique au niveau de cette surface de 17°C après les 24 heures de fonctionnement du système. Donc l'influence de l'ensoleillement sur la surface extérieure du mur Trombe ventilé qui est orienté en plein sud et en plein solaire est visualisée par ce travail de simulation.

5.2 Effet thermique du système

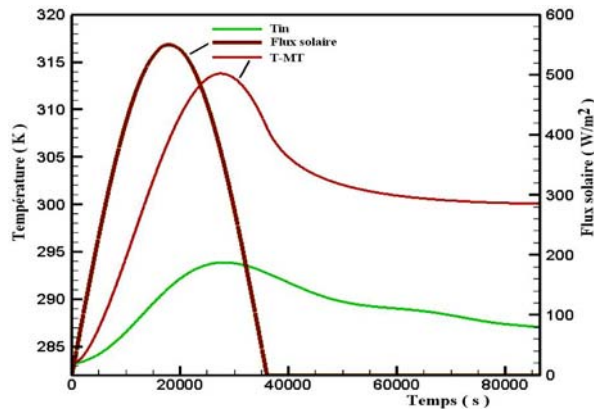


Fig. 6: Evolution de la température au niveau de la surface extérieure du mur Trombe et au niveau de la zone d'occupation

Les résultats représentés dans la figure 6 montrent l'importance du chauffage passif au cours du temps, au niveau de la zone d'occupation. La température de la zone d'occupation augmente par l'effet de la thermocirculation. L'effet de l'inertie thermique joue le rôle de stockage pour chauffer le local après les heures de l'ensoleillement.

Les figures 7 et 8 représentent l'amélioration du transfert thermique par conduction au cours du temps au niveau de l'épaisseur du mur Trombe. Il est clair que le mur Trombe commence à capter de la chaleur provenant de l'ensoleillement pendant la journée, puis il restitue cette énergie en période nocturne.

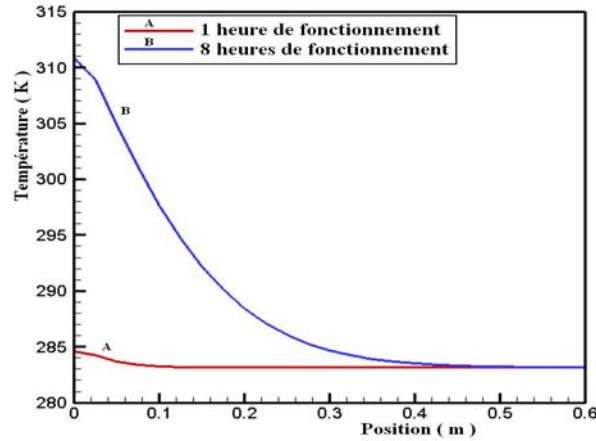


Fig. 7: Evolution de la température au niveau de l'épaisseur du mur Trombe à 1 heure et à 8 heures de fonctionnement

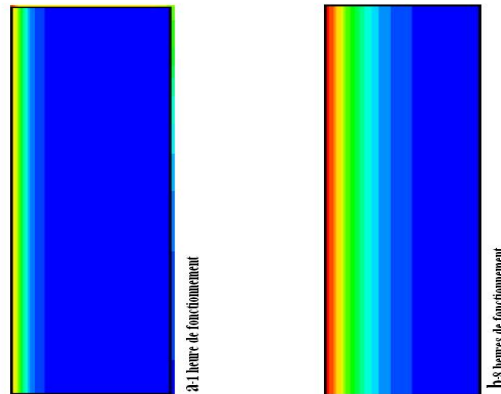


Fig. 8: Echange thermique par conduction au niveau de mur Trombe à 1 heure et 8 heures de fonctionnement

Les figures 9, 10 et 11 représentent les échanges thermiques pendant les 24 heures de fonctionnement du système, mur Trombe ventilé, le chauffage passif par le principe thermo circulation à l'intérieur du local durant le jour et par l'effet thermique de la paroi mur Trombe ventilé le soir est visualisé par ce travail de simulation.

Les résultats obtenus montrent qu'en plein hiver, les températures au niveau de la zone d'occupation sont adaptables au cours du temps, à l'intervalle du confort thermique qui est compris entre 18 °C et 24 °C.

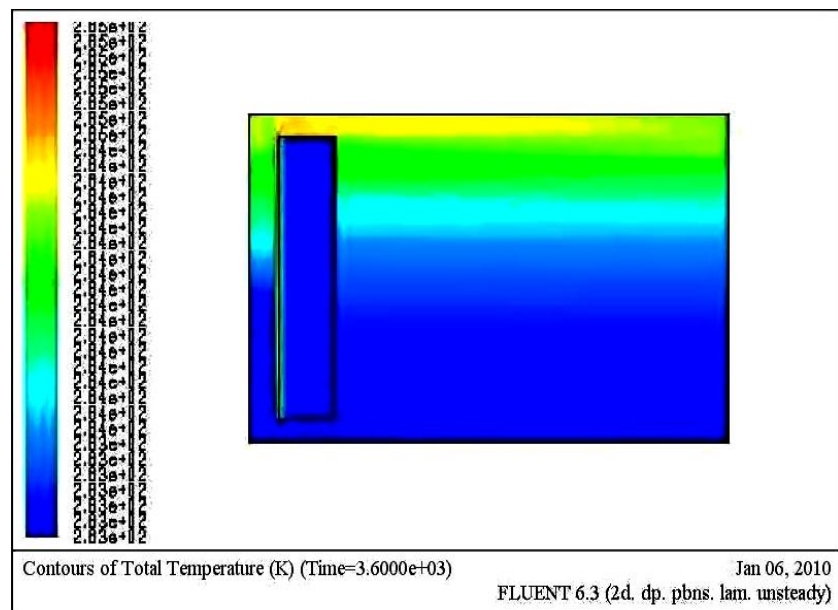


Fig. 9: Echange thermique du système à 1 heure de fonctionnement

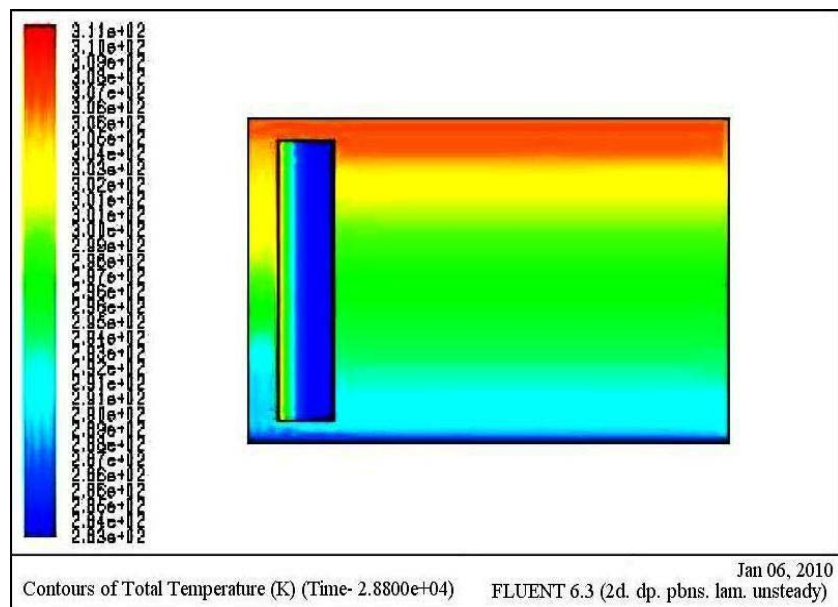


Fig. 10: Echange thermique du système à 8 heures de fonctionnement

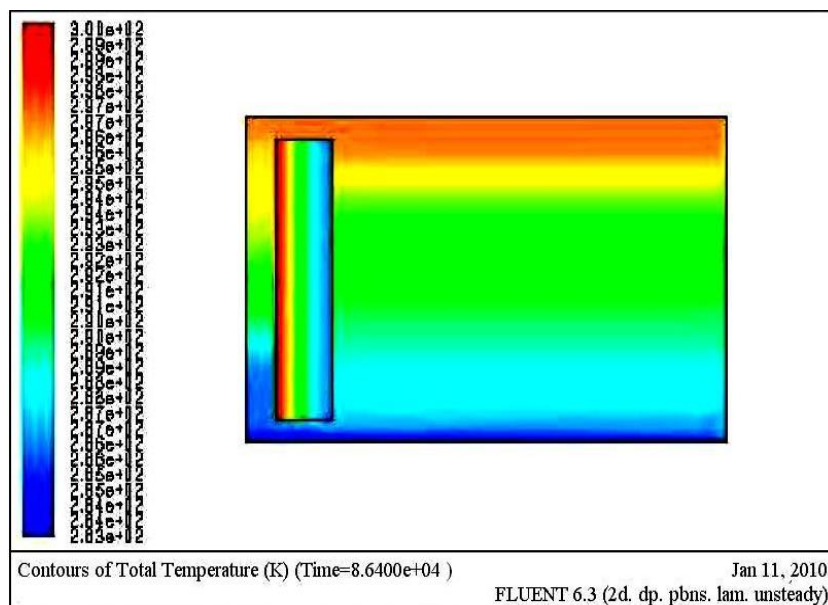


Fig. 11: Echange thermique du système à 24 heures de fonctionnement

5.3 Influence des ouvertures de circulation de l'air sur le rendement thermique du système

Les figures 12 et 13 présentent les isothermes et les lignes de courant obtenues au cours du temps. On note que le fluide circule dans la direction des aiguilles d'une montre et est monocellulaire à cause de la position des parois isothermes chaude et froide.

En effet, le fluide monte le long de la paroi chaude et descend le long de la paroi froide.

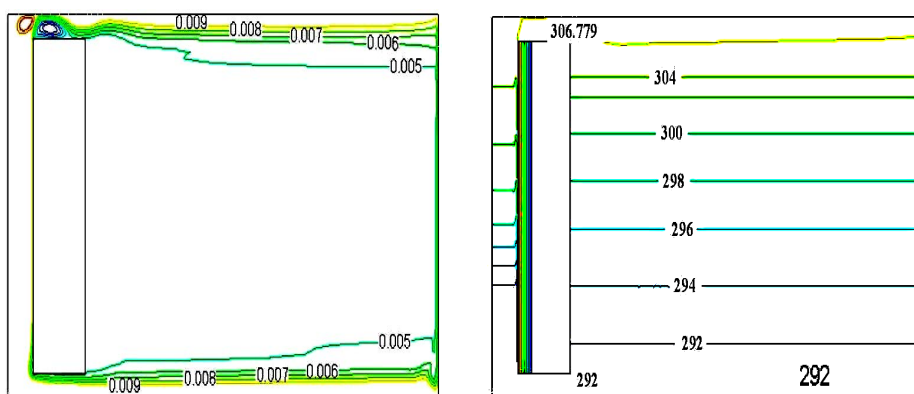


Fig. 12: Les lignes de courant et les isothermes à 8 heures de fonctionnement pour le cas – 1, $\delta = 20$ cm

Au milieu du local, on assiste à une stratification thermique de la température sous l'effet des forces volumiques. Aussi, les isothermes sont denses au voisinage de la paroi chaude, ainsi que celles de la paroi froide de la face droite du local.

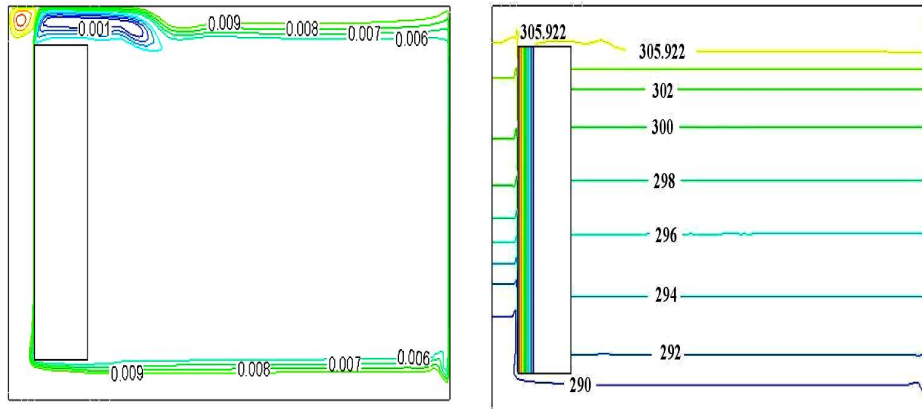


Fig. 13: Les lignes de courant et les isothermes à 8 heures de fonctionnement pour le cas – 2, $\delta = 30$ cm

Les résultats représentés dans les figures 14 et 15 montrent que:

- Le rendement thermique du système est fonction de l'apport de chaleur et ne dépend pas de la profondeur de la cheminée solaire.
- Le débit massique à travers la cheminée solaire au cours du temps est aussi fonction à la fois de l'apport de chaleur et de la profondeur de la cheminée solaire.

Notons ici que c'est la même conclusion que nous avons rencontré dans le travail [5].

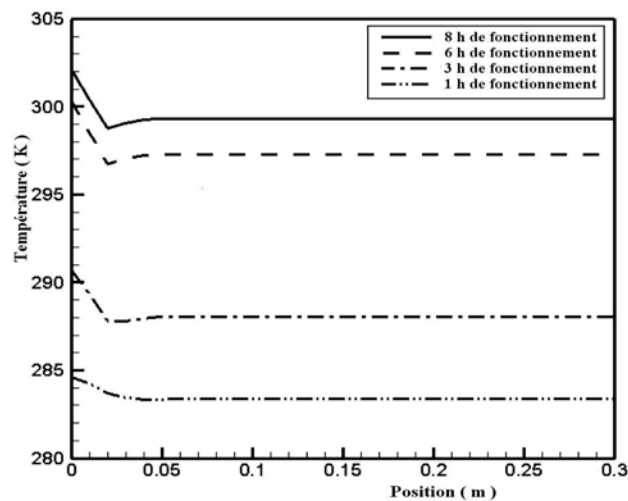


Fig. 14: Evolution de la température au niveau de la cheminée solaire à 1 h, 3 h, 6 h et 8 h de fonctionnement

5.4 Effet dynamique du système

La figure 16 représente le champ de vitesse. Il est clair que l'air à l'intérieur du local circule par un refoulement de l'ouverture situé en haut (Fig. 17a-). Ce dernier est aspiré par l'ouverture située en bas (Fig. 17b-), puis il traverse la cheminée solaire.

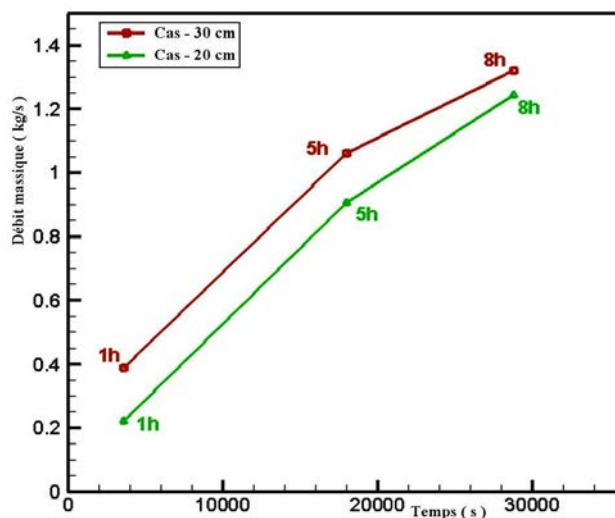


Fig. 15: Débit massique à travers la cheminée solaire à 1 h, 5 h et 8 h de fonctionnement pour $\delta = 20$ cm et 30 cm

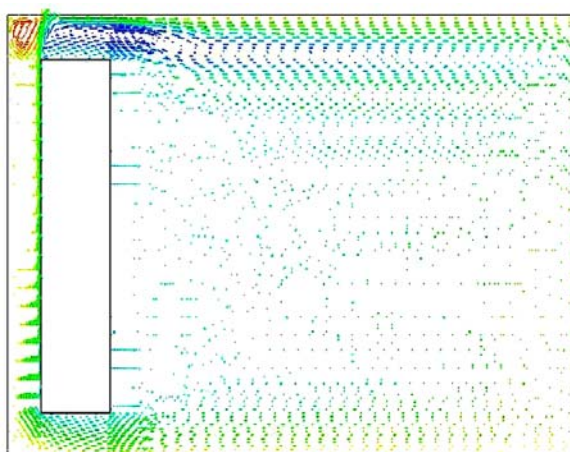


Fig. 16: Champ de vitesse (cas - 2), $\delta = 30$ cm

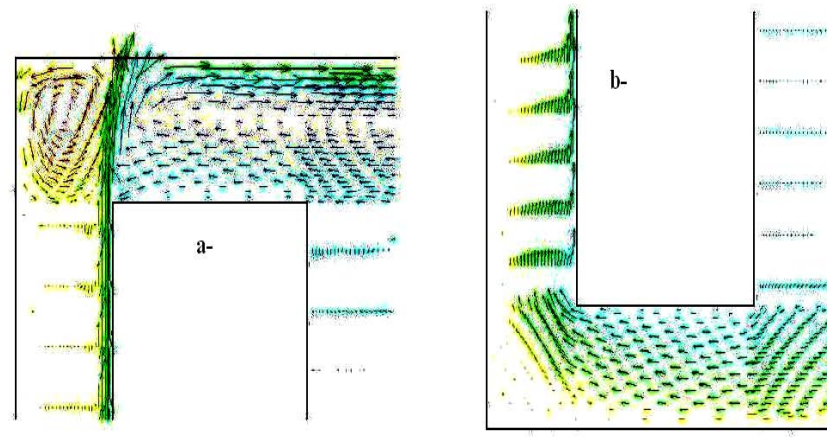


Fig. 17: Agrandissement de champ de vitesse au niveau des ouvertures

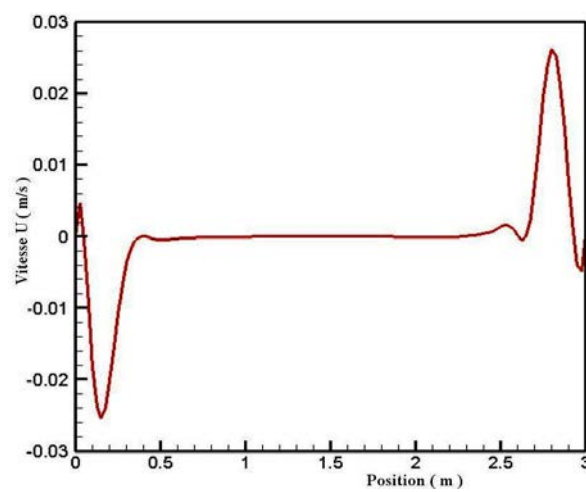


Fig. 18: Profil de vitesse U à 8 heures de fonctionnement au niveau de la surface verticale au milieu du local

La figure 18 représente l'évolution de la vitesse U suivant la hauteur au milieu du local. On remarque qu'il existe trois régions: la première est située en haut (zone de soufflage de l'air chaud), la deuxième est située en bas (zone d'aspiration de l'air froid), la troisième, une zone de stratification thermique sous l'effet des forces volumiques. Notons ici que dans cette région, les vitesses sont très faibles.

6. CONCLUSION

Les résultats présentés dans ce travail nous permettent de tirer les conclusions suivantes:

- La température de sortie du fluide (air chaud) varie en fonction du flux solaire.

- Ces travaux de simulation ont permis d'obtenir des températures du fluide assez élevées à la sortie, favorable pour les exploiter dans le séchage des produits agro-alimentaires.
- L'utilisation de l'énergie solaire consiste à bénéficier de l'apport direct du rayonnement solaire, c'est-à-dire l'énergie solaire passive.
- Pour qu'un bâtiment bénéficie au mieux des rayons du soleil, on doit tenir compte de l'énergie solaire lors de la conception architecturale (façades doubles, orientation vers le sud, surfaces vitrées, etc...).
- Les résultats obtenus pour la région de Béchar en utilisant un chauffage passif par la technique d'un mur Trombe ventilé, semblent intéressants d'appliquer un tel système.

NOMENCLATURE

a : Diffusivité thermique, (m^2/s)	P : Pression de l'air dans le local, (Pa)
b : Distance de la cheminé solaire, (m)	C_p : Chaleur spécifique matériau, (J/kg.K)
c : Hauteur du mur Trombe, (m)	$\dot{m}$: Débit massique, (kg/s)
e : Epaisseur du mur Trombe, (m)	T_{con} : Température de consigne, ($^{\circ}C$)
H : Hauteur du local, (m)	T_0 : Température de référence, ($^{\circ}C$)
L : Longueur du local, (m)	T_{in} : Température-zone d'occupation, ($^{\circ}C$)
T_{ob} : Température au niveau d'ouverture de circulation d'air basse, ($^{\circ}C$)	T_{oh} : Température au niveau d'ouverture de circulation d'air haute, ($^{\circ}C$)
u_i, U, V : Vitesse de l'air selon x, y, (m/s)	δ : Dimension de l'ouverture de circulation d'air, (m)
λ : Conductivité thermique du Matériau, (W/m.K)	β : Coefficient d'expansion volumique, (1/K)
ν : Viscosité cinématique fluide, (m^2/s)	ρ : Masse volumique du fluide, (kg/m^3)
φ : Flux solaire, (W/m ²)	

REFERENCES

- [1] A. Chel, J.K. Nayak and G. Kaushik, 'Energy Conservation in Honey Storage Building Using Trombe Wall', Energy and Buildings, Vol. 40, N°9, pp. 1643 – 1650, 2008.
- [2] S.A.M. Burek and A. Habeb, 'Air Flow and Thermal Efficiency Characteristics in Solar Chimneys and Trombe Walls', Energy and Buildings, Vol. 39, N°2, pp. 128-135, 2007.
- [3] Y. Harnane et M. Afrid, 'Convection Naturelle à Grand Nombre de Rayleigh dans une Couche Horizontale de Fluide, Approche Expérimentale', Thèse de Doctorat, Ecole d'Ingénieurs, Albi, France, 2007.

- [4] C. Theodosiu, '*Modélisation des Systèmes Techniques dans le Domaine des Equipements des Bâtiments à l'aide des Codes de type CFD*', Thèse de Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées, 355 p., Lyon, France, 2001.
- [5] S. Lepers, '*Modélisation des Ecoulements de l'Air dans les Bâtiments à l'Aide des Codes CFD: Contribution à l'Elaboration d'un Protocole de Validation*', Thèse de Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées, 247 p., Lyon, France, 2000.