

# Etude expérimentale et simulation des phénomènes thermo-aéraulique dans une cheminée solaire

SAIFI Nadia, SETTOU Noureddine, NEGROU Belkhir, AKCHICHE Zineb, DOKAR Boubaker

E-mail : saifi.nadia2009@gmail.com

\*Laboratoire de Valorisation et Promotion des Ressources Sahariennes,

Université Kasdi Merbah Ouargla

**Résumé** - Le présent travail porte sur l'étude et la conception de l'effet de cheminée solaire sur la ventilation naturelle. Plusieurs études expérimentales ont été effectuées sur la cheminée solaire. Leur choix dépend des paramètres de la conception et des performances thermiques pour différentes configurations géométriques. Les essais expérimentaux montrent que le champ de vitesses dans la cheminée est influencé par la largeur de la veine (distance entre l'absorbeur et le vitrage et aussi de l'angle d'inclinaison de la cheminée. On donne l'évolution des températures de l'air et du débit d'air à la sortie pour différentes inclinaisons et épaisseurs de la lame d'air. Nous avons aussi modélisé les différents écoulements produits par le logiciel fluent. Les équations de conservation de masse, de continuité et de l'énergie sont résolues par la méthode des volumes finis. La validation des résultats est présentée pour pouvoir exploiter le code de calcul pour différentes configurations de la cheminée solaire. Un bon accord entre l'expérimentation et les résultats de la simulation est observé.

**Mots clés :** Energie solaire - Transfert de chaleur – ventilation naturelle – cheminée solaire – Volumes finis, Code Fluent.

## I. INTRODUCTION

La ventilation naturelle est une stratégie passive, sans moyen mécanique, son rôle est de maintenir un environnement intérieur confortable. Une cheminée solaire est utilisée pour atteindre la ventilation naturelle dans l'habitat par le mouvement de l'air avec l'utilisation de l'énergie solaire.

Y. Marif, laboratoire de Développement des Energies Nouvelles et Renouvelables dans les Zones Arides et Sahariennes (LENREZA), Université de Kasdi Merbah Ouargla, ALGERIE  
yacine.marif@yahoo.fr

Les cheminées solaires sont importantes dans les applications nécessitant des températures basses et modérées, telles que le séchage et le chauffage des locaux.

Il est bien évident que ce sont les performances de la cheminée solaire qui permettent de juger si l'énergie solaire est adaptée à telle ou telle application. En effet, une compréhension meilleure des mécanismes fondamentaux régissant le bon fonctionnement d'une cheminée permet d'une part, de maîtriser tous les paramètres extrinsèques ou intrinsèques entrant dans le processus de transfert et par la suite connaître sur quelle base, on peut agir pour optimiser la performance d'une cheminée solaire, et d'autre part, adapter ce qu'il faut à l'application pour assurer un bon fonctionnement. C'est dans ce but, que de nombreux travaux de recherche ont eu lieu. Dans ce qui suit, plusieurs études théoriques et expérimentales ont été faites [1,2]. La majeure partie de ces études porte sur la détermination de profile de la vitesse et de la température à l'intérieur de la cheminée en fonctions de l'épaisseur, l'angle d'inclinaison, la température de l'air ambiant et l'intensité de rayonnement solaire. A.G. Li et autres [3] ont étudié les processus de transfert de chaleur et d'efficacité de la ventilation naturelle entraînée par une cheminée solaire attachée à une paroi latérale du bâtiment, Il est constaté que pour la construction de la géométrie, il y a une valeur optimale de la largeur de cavité pour obtenir un taux d'écoulement d'air maximum. J. Marti Herrero et M.R. Heras Celemin [4], ont proposé un modèle mathématique dynamique pour évaluer la performance énergétique d'une cheminée solaire. Ils trouvent que un mur en béton de 24 cm d'épaisseur, atteint une température supérieure à la température ambiante après 2h, et maintien sa température largement supérieure à la température ambiante lorsque le rayonnement solaire n'existe plus. J. Mathur et autres [5] ont étudié l'effet de l'inclinaison sur le débit sortant de la

cheminée. Les résultats ont montré que l'absorption est optimale, si l'angle d'inclinaison varie entre  $40^\circ$  à  $60^\circ$ . On a aussi réalisé des études expérimentales sur une cheminée solaire de petite taille, ils montrent que le taux de la ventilation augmente avec l'augmentation du rapport entre la taille de l'absorbeur et l'écart entre le verre et l'absorbeur. Neuf combinaisons de différentes hauteurs d'amortisseur et de l'air ont été étudiées sur le dispositif expérimental.

## II. PARTIE EXPERIMENTALE

### 1. DESCRIPTION D'UNE CHEMINÉE SOLAIRE :

Le prototype est schématisé par la figure 1. Les principaux composants de la cheminée solaire sont:

- Un boîtier réalisé en tôle de fer, de dimensions  $2 \times 1$  m, ouvert sur le côté exposé au rayonnement solaire, et sur les côtés latéraux, on a réalisé des ouvertures pour l'entrée et la sortie de l'air.
- Une seule couverture transparente de verre d'épaisseur 5 mm.
- Une plaque absorbante mince en acier galvanisé peinte en noir mat avec une épaisseur de 0.4 mm.
- Une plaque arrière mince en acier galvanisé placée sur l'isolant d'une épaisseur de 0.4 mm.
- Les différentes hauteurs entre la couverture transparente et la plaque absorbante sont : 10 mm, 20 mm, 30mm.

- L'isolation arrière est assurée grâce à deux feuilles de polystyrène, une de 40mm et l'autre de 20 mm d'épaisseur  
L'installation expérimentale comprend :

- La mesure du rayonnement solaire
- La mesure de la température de l'air ambiant, de la température de l'air à l'intérieur de la cheminée, ainsi que celle de l'absorbeur et de la vitre.
- La mesure de la vitesse à la sortie de la cheminée.



Figure 1 : Montage expérimental

Dans cette étude expérimentale d'une cheminée solaire, nous avons fait plusieurs essais. Les mesures ont été effectuées au site d'Ouargla (université Kasdi Merbah Ouargla, laboratoire VPRS). Afin de pouvoir estimer l'efficacité de la cheminée solaire, on a programmé le déroulement des tests durant une période de climat claire.

Lors de chaque journée, les tests sont pris entre 9 h jusqu'à 16 h avec un pas de trente minutes (30min).

La cheminée solaire a été construite de sorte que la plupart des variables peuvent être modifiées au cours des expériences tels que l'épaisseur de lame d'air et l'inclinaison de la cheminée

Les mesures ont été effectuées lorsque l'appareil a atteint la stabilité thermique avec l'environnement, en utilisant des thermocouples pour mesurer La température de l'absorbeur et la température de l'air, ainsi que la température ambiante. Les vitesses de l'air ont été mesurées avec un anémomètre à fil chaud à la sortie

Tableau1 : conditions expérimentales

S (cm)		10	20	30
$\alpha(^\circ)$	30	•	•	•
	45	•	•	•

## III.PARTIE SIMULATION

### 1. MODELE PHYSIQUE:

Le modèle physique considéré est schématisé sur la figure 2. Il s'agit d'une cheminée solaire dont l'absorbeur et le vitrage sont maintenues à une température constante.

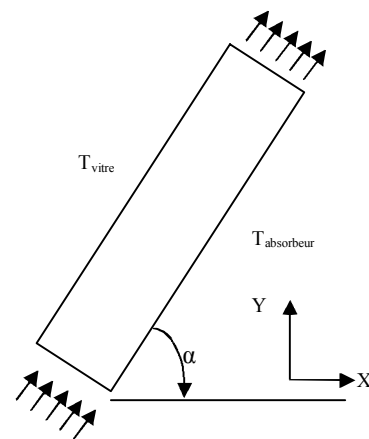


Figure 2 : modèle physique

Il est nécessaire de connaître un très grand nombre des paramètres tels que la géométrie de la cheminée solaire, les caractéristiques des matériaux utilisés et les paramètres physiques de l'écoulement.

La description physique devient très compliquée. Il convient donc de faire un certain nombre d'hypothèses, permettant d'arriver à un temps de calcul correct sans perdre trop d'informations. Le choix s'est donc porté sur un domaine bidimensionnel, et les hypothèses utilisées dans ce travail sont:

- L'écoulement instationnaire.
- L'écoulement de l'air est turbulent.
- Le fluide est newtonien et incompressible.

- Absorbeur et le vitre sont toujours parallèles.
- La Température de l'air à l'entrée du canal d'écoulement est égale à la température ambiante.

Nous considérons les hypothèses ci-dessus, le modèle de calcul de l'effet de la cheminée solaire est représenté mathématiquement les phénomènes thermo-aéraulique.

Une étude numérique de l'écoulement axée par le transfert de chaleur dans un canal incliné a été étudiée. Les simulations ont été réalisées, en utilisant le logiciel commercial Fluent. Les équations de la conservation à deux dimensions [6,7] ont été résolus, en utilisant l'approximation de Boussinesq [8]. Celui-ci impose des valeurs constantes pour toutes les propriétés thermo physiques et les variations de masse volumique du fluide sont. Il est également supposé que la dissipation visqueuse est négligée.

Pour flux constant, les équations de continuité, de quantité de mouvement et de l'énergie prendre la forme suivante [6,7]:

L'équation continuité :

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

L'équation de quantité de mouvement selon x :

$$\frac{\partial(\rho uu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) + S_u \quad (2)$$

Et selon y :

$$\frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vv)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) + S_v \quad (3)$$

L'équation d'énergie :

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \Gamma_{eff} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \Gamma_{eff} \frac{\partial T}{\partial y} \right) + S_T \quad (4)$$

Où  $x, y$  sont les coordonnées cartésiennes dans le système indiqué dans la figure. 2,  $\rho$  est la densité de l'air ( $\text{kg/m}^3$ ),  $S_u$  et  $S_v$ , sont des termes source dynamique selon les axes  $x$  et  $y$ ,  $\mu$  est la viscosité de l'air,  $\Gamma_{eff}$  est le diffusivité thermique du fluide. Pour  $Ra$  ci-dessus  $10^9$ , un modèle de turbulence à deux équations doit être utilisé. Dans cette étude.

## 2. LES CONDITIONS AUX LIMITES

Les conditions aux limites sont les conditions imposées à la frontière externe du domaine étudié. Elles sont nécessaires pour que le problème mathématique soit correctement traité.

À l'entrée et à la sortie de la cheminée des états de frontière de pression sont indiqués. La valeur de la pression doit être fixée par l'intermédiaire d'une condition de Dirichlet. Alors la pression à l'entrée et à la sortie de la cheminée est égale la pression atmosphérique.

Sur les parois solides, les conditions sont exprimées par le type de condition de Dirichlet. La valeur de la température sur la vitre et l'absorbeur doit être fixée.

Le travail commence, tout d'abord sous Gambit où l'on doit modéliser notre géométrie, créer un maillage et définir certaines conditions aux limites.

Le maillage utilisé est un maillage irrégulier  $300 \times 50$  et le nombre de mailles est de 15000.

Les deux équations du modèle  $k-\epsilon$  standard impliquent la solution des deux équations aux dérivées partielles supplémentaires pour l'énergie cinétique turbulente ( $k$ ) et son taux de dissipation  $\epsilon$  [9].

Les valeurs des constantes  $C_1, C_2, C_\mu, \sigma$ , appliqués sont de 0,09, 1,44, 1,92, 1,0 et 1,3, respectivement [9].

## IV. RESULTATS ET DISCUSSIONS

### 1. RESULTATS EXPERIMENTAUX

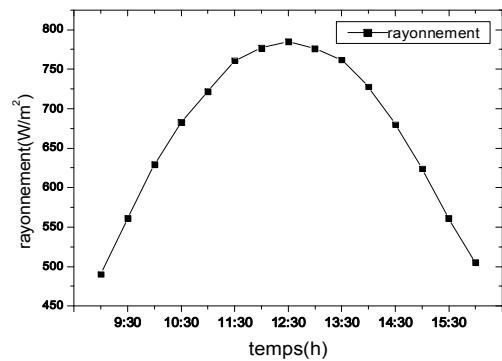


Figure3 : Variation de rayonnement en fonction du temps, journée du 25/05/2010

La figure 3 permet d'étudier la variation du rayonnement global en fonction du temps pour la journée du 25 Mai 2010, elle présente une forme gaussienne dont la valeur maximale du rayonnement est d'environ  $778 \text{ W/m}^2$  à 12h30.

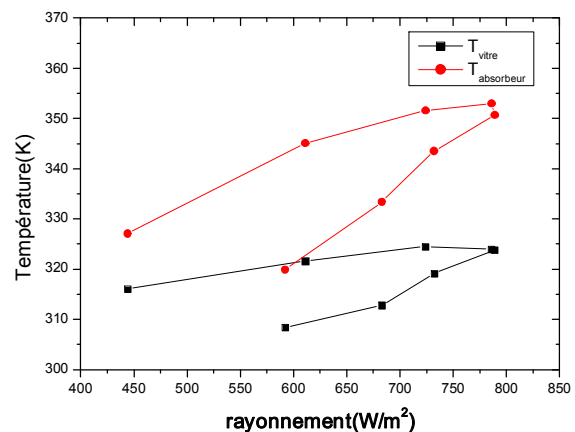


Figure 4 : Variation de température de la vitre et de l'absorbeur en fonction de l'intensité de rayonnement pour un angle d'inclinaison  $\alpha=45^\circ$  et une épaisseur de lame d'air  $e=20$  cm.

La transmission du rayonnement solaire dans la cheminée crée un gradient de température entre la vitre et l'absorbeur. Cette différence est la force motrice du système de la cheminée. La figure 4 indique la différence de température significative correspondant à l'intensité solaire.

On a une augmentation linéaire de l'ensemble des températures, la température maximale absorbeur varie comme  $T_{abs}=134,381^{0.1376}$  pendant que la température moyenne qui correspondre la température maximum du vitre varie comme  $T_{vitr}=184^{0.1811}$ .

En raison de la nature de l'absorbeur qui absorber et stocker l'énergie thermique, Cette absorption d'énergie augmente la température de l'absorbeur, la majeure partie de cette énergie est consommée par l'accélération de l'air dans la cheminée.

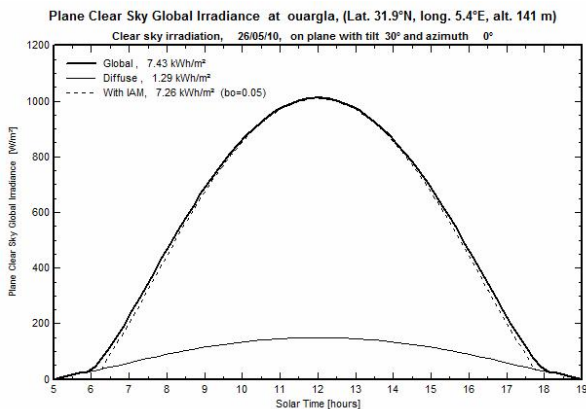


Figure 5 : Variation du rayonnement solaire avec le temps (tracé par le logiciel PVSYST4\_37).

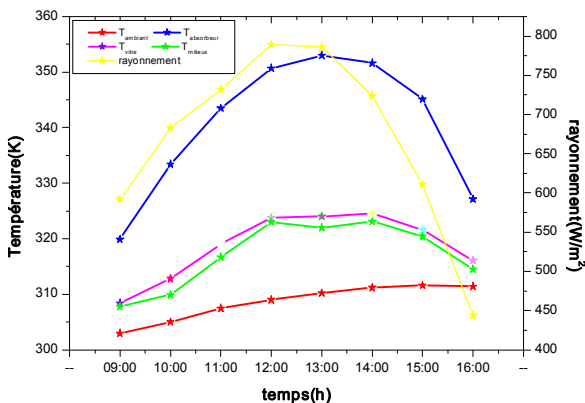


Figure 6 : Variation des différentes températures ( $T_{ambiant}$ ,  $T_{abs}$ ,  $T_{vitre}$ ,  $T_{mili}$ ) et l'intensité de radiation solaire en fonction de temps pour une journée claire.

Dans cette figure, On observe une augmentation de la température pour la matinée c'est-à-dire jusqu'à 13h00 Ceci peut s'expliquer par le fait qu'en raison de l'augmentation de la densité du flux solaire incident dans la matinée. Par contre dans l'après midi, la diminution progressive de la température d'absorbeur et de l'intensité de rayonnement. on remarque aussi que la température de vitre et de l'air dans le cheminée ( $T_{mili}$ ) reste presque constante entre 12h00 et 14h00 et diminue plus lentement après 14h00 malgré l'intensité de rayonnement solaire diminue aussi et cela apparait car l'absorbeur dégagée votre chaleur.

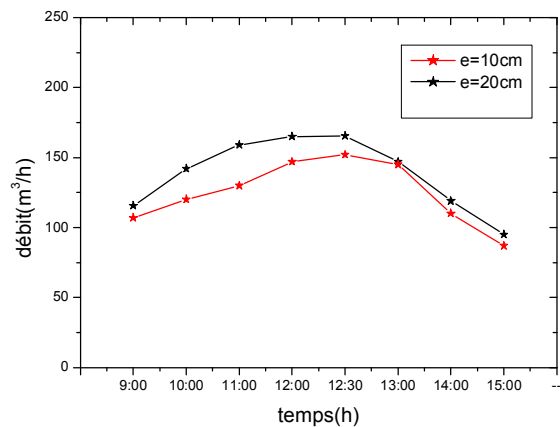


Figure 7 : Variation du débit volumique avec le temps pour un angle d'inclinaison  $\alpha=45^\circ$  et épaisseur de lame d'air  $e=20$  cm et  $e=10$  cm.

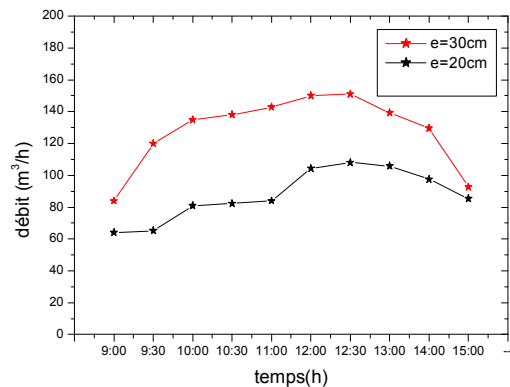


Figure 8 : Variation du débit volumique avec le temps pour un angle d'inclinaison  $\alpha=30^\circ$  et épaisseur de lame d'air  $e=20$  cm et  $e=10$  cm.

Ces graphiques montrent également la variation du débit volumique avec changement de l'inclinaison de l'absorbeur. On peut constater que plus l'épaisseur augmente plus le débit volumique de l'air dans la cheminée solaire augmente. On remarque que les débits correspond à l'angle 45° sont plus élevés que ceux pour l'angle 30°. Pour une efficacité optimale, les rayons du soleil doivent être perpendiculaires aux cheminées solaires. Lors de la saison de grande chaleur, le soleil ne monte pas très haut dans le ciel, les cheminées doivent être inclinées. La pente optimale est de 45°. L'inclinaison des cheminée solaire est plus grande pour une valeur maximale de débit et alors une ventilation naturelle plus efficace.

La première étape consiste à valider notre simulation numérique en comparant nos résultats avec ceux obtenus par l'expérimentation. La figure 9 représente la variation du débit volumique en fonction du rayonnement solaire. On observe un bon accord entre les deux courbes.

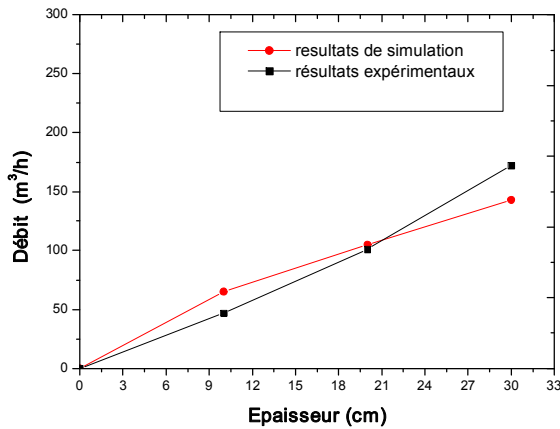


Figure 9 : Comparaison entre les résultats expérimentaux et de simulation de débit volumique en fonction de l'intensité solaire pour un angle d'inclinaison  $\alpha=30^\circ$  et épaisseur de lame d'air  $e=20\text{ cm}$

Ce champ est représenté dans les figures (10, 11 et 12) principalement engendrées conservée par les forces de flottabilité. On observe que la vitesse est plus élevée le long des parois chaudes (l'absorbeur), Chaque fois éloigné de la paroi les vitesses diminuent. On peut également constater à partir de ces figures que la vitesse maximale (en rouge) est de plus en plus proche des parois verticales lorsqu'on fait croître le nombre de Rayleigh, et plus le largeur de cheminée augmente plus les champs de vitesse diminuent.

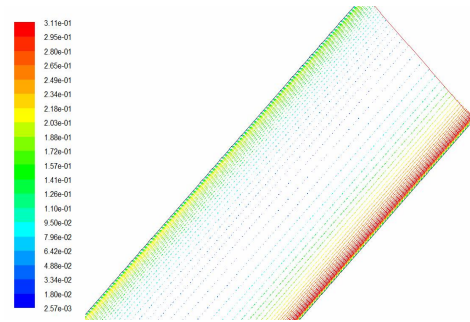


Figure 10 : champs de vitesse pour un angle d'inclinaison  $\alpha=45^\circ$  et épaisseur de l'âme d'air  $e=30\text{ cm}$

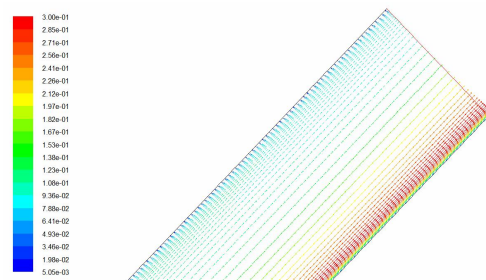


Figure 11. Champs de vitesse pour un angle d'inclinaison  $\alpha=45^\circ$  et épaisseur de l'âme d'air  $e=20\text{ cm}$

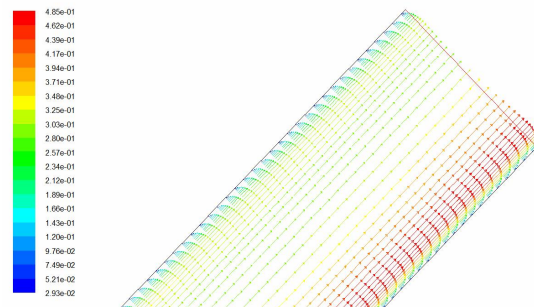


Figure 12 : champs de vitesse pour un angle d'inclinaison  $\alpha=30^\circ$  et épaisseur de l'âme d'air  $e=10\text{ cm}$

La distribution de la température dans la cheminée avec différent angle et épaisseur de lame d'aire est représenté dans les figure (13, 14,15). la chaleur produit par le rayonnement solaire et situe dans la cheminée est transportée par convection vers le haut au milieu de la cheminée. C'est ce qui explique les températures relativement élevées dans la partie le plus proche de l'absorbeur,

Nous constatons que les valeurs de la température comprises entre une valeur maximale correspondent à la température de l'absorbeur et une faible valeur correspond la température de vitre.

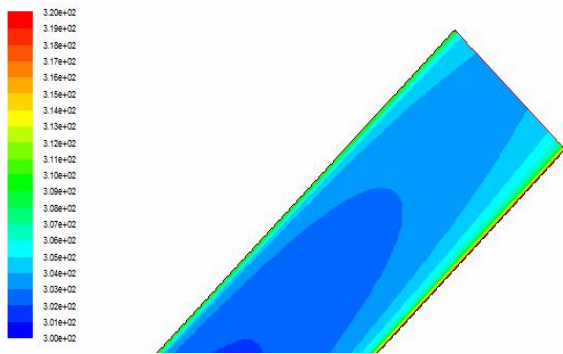


Figure 13 : champs thermique pour un angle d'inclinaison  $\alpha=45^\circ$  et épaisseur de l'âme d'air  $e=30\text{cm}$

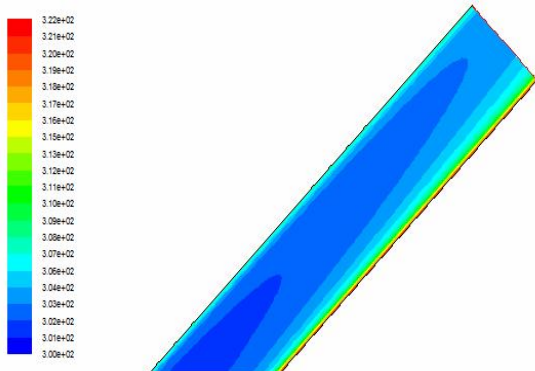


Figure 14 : champs thermique pour un angle d'inclinaison  $\alpha=45^\circ$  et épaisseur de l'âme d'air  $e=20\text{cm}$

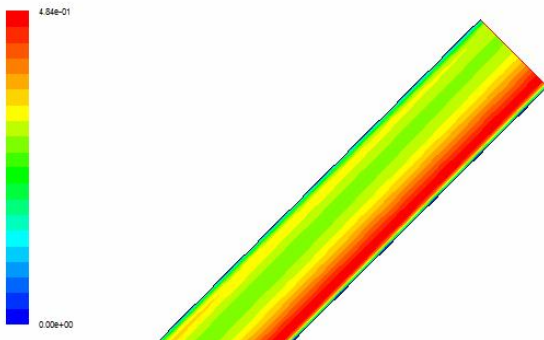


FIGURE 15 : champs thermique pour un angle d'inclinaison  $\alpha=45^\circ$  et épaisseur de l'âme d'air  $e=10\text{cm}$

#### V. CONCLUSION

Une étude expérimentale et numérique a été menée pour une cheminée solaire inclinée. A l'issue de cette étude expérimentale pour différentes inclinaisons de la cheminée ( $30^\circ$  et  $45^\circ$ ) et aussi l'épaisseur de la lame d'air située entre l'absorbeur et la vitre ( $e=10\text{cm}$ ,  $20\text{cm}$  et  $30\text{cm}$ ), nous amènent aux conclusions suivantes :

- Le gradient de température entre l'absorbeur et la vitre varie en fonction du flux solaire incident.
- La conception adoptée a permis d'obtenir des débits d'air assez élevées à la sortie, favorable pour les exploiter dans la ventilation naturelle

La simulation numérique a permis de déterminer les profils de température et de vitesse à l'intérieur de la cheminée solaire. Les simulations numériques sont effectuées pour les nombres de Rayleigh  $Ra=10^9$  et pour différentes positions de la cheminée. En se basant sur les approximations de Boussinesq. Les résultats principaux se résument dans :

- la variation de l'épaisseur de la lame d'air (largeur de la cheminée) joue un rôle très important et augmente significativement, le débit volumique de l'air.
- Pour que le tirage thermique soit optimal, il faut que la valeur de l'angle d'inclinaison soit de  $45^\circ$ .

#### REFERENCES

- [1] Z. Adam, T. Yamanaka, H. Kotani, "Mathematical model and experimental study of airflow in solar chimneys", Proc. 8th International Conference on Air Distribution in Rooms (ROOMVENT 2002), p.621-624, 2002
- [2] Jyotirmay Mathur, Sanjay Mathur, "Anupma Summer-performance of inclined roof solar chimney for natural ventilation"
- [3] A.G. Li, Ph.D., P. Jones, Ph.D., P.G. Zhao, L.P. Wang, "Modelling Of Ventilation Airflow Rates Of Solar Chimneys For Building Integration Of Renewable Energy Devices", Journal of Indoor and Built Environment, (2002).
- [4] M. GERMANO, "Qualitative Modeling of The natural Ventilation Potential In Urban Context ", Thesis of Doctorate, federal polytechnic school of Lausanne, (2006).
- [5] D. J. Marti-Herrero, M.R. Heras-Celemin, "Dynamic physical model for a solar chimney", Journal of Solar Energy Engineering, Vol. 81, p. 614-622, (2007).
- [6] S.V. Patankar, Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, McGrawHill, New York, 1980.
- [7] N.C. Markatos, K.A. Pericleous, Laminar and turbulent natural convection in an enclosed cavity, Int. J. Heat Mass Transfer 27 (5) (1984) p.755-772.
- [8] D.D. Gray, A. Giorgini, The validity of the Boussinesq approximation for liquids and gases, Int. J. Heat Mass Transfer 19 (1976) p.545-551.
- [9] Launder B.E, and Spalding D.B., "The Numerical Computation of Turbulent Flow", Comput. Methods Appl. Mech. Eng, Vol. 3, pp. 269-289, (1974).