



# Influence du Rayonnement Solaire sur l'Écoulement dans les Centrales à Cheminée Solaire

M. Lebbi\*, T. Chergui\*, Abd. H. Boualit\*, L. Boutina\*, S. Laouar\*

\*Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables, URAER, Centre de Développement des Energies  
Renouvelables, CDER, 47133, Ghardaïa, Algeria.

Auteur correspondant, E-mail: [m.lebbi@uraer.dz](mailto:m.lebbi@uraer.dz)

**Résumé**– Ce travail s'inscrit dans une série d'études sur l'influence des conditions météorologiques sur le comportement thermo-hydrodynamique de l'écoulement turbulent dans une centrale à cheminée solaire. Dans ce papier on s'intéresse plus particulièrement à l'effet de l'intensité du rayonnement solaire. À partir de ce travail il nous apparaît clairement que le rayonnement solaire affecte directement sur le champ thermique par l'augmentation de la température moyenne de l'écoulement et indirectement sur le champ hydrodynamique par l'augmentation du débit massique.

**Mots-clefs** —Centrale à Cheminée Solaire, comportement thermo hydrodynamique, rayonnement solaire, modélisation numérique.

## I. INTRODUCTION

La Centrale à Cheminée Solaire (CCS) est une installation solaire de production de l'électricité. Elle utilise le rayonnement solaire pour accroître la température de l'air s'écoulant à travers le système, transformant ainsi l'énergie solaire en énergie cinétique. L'énergie cinétique de l'air en écoulement est ainsi transformée en électricité en utilisant des groupes turbogénérateurs adéquats. La CCS associe trois techniques usuelles : La serre (Collecteur), la cheminée et les turbines éoliennes (voir Fig.1). Plusieurs projets ou idées sur les CCS ont été communiqués à travers le monde. Le premier était incontestablement celui d'un militaire espagnol, le colonel Cabanyes [1] qui, en 1903, proposa un modèle de tour solaire. Ensuite elle a été rendu publique par Günter [2].

Depuis 1975, plusieurs brevets ont été accordés par Lucier en Australie, au Canada, en Israël et aux Etats-Unis [3]. En 1978, le Professeur Jorg Schlaich [4] de l'université de Stuttgart, a confirmé l'idée que l'électricité pourrait être produite par un système hybride solaire – éolien composé de trois parties : Un collecteur, des aérogénérateurs, et une cheminée (Fig. 2). Pastohr & al. [5] ont utilisé le logiciel FLUENT (code commercial de CFD) pour modéliser la centrale CCS semblable géométriquement à celle de Manzanares dans le but d'effectuer une analyse avec plus de détails dans la description du mode de fonctionnement et du rendement de système. Ming & al. [6] ont effectués des

simulations numériques pour analyser les caractéristiques du transfert thermique et de l'écoulement d'air dans une centrale CCS dotée d'un système thermique. Différents modèles mathématiques pour le collecteur, la tour-cheminée et le dispositif de stockage thermique ont été établis, et l'effet du rayonnement solaire sur les caractéristiques de stockage de chaleur a été analysé. Tingzhen et al. [7] ont présenté une méthode de simulation numérique d'une CCS en considérant une turbine éolienne. En se basant sur des résultats obtenus pour le prototype de Manzanares doté d'une éolienne tripale ils ont prouvé que l'augmentation de la vitesse de rotation de la turbine fait chuter la vitesse moyenne à la sortie de la tour et le débit massique, alors que la température moyenne à la sortie de la tour et la chute de pression à la turbine augmentent et que l'énergie maximale disponible, la puissance développée et le rendement atteignent chacun une valeur maximale (pic). Zhou et al. [8] ont présenté une étude numérique sur les performances d'une CCS en se basant sur les équations de Navier-Stokes. Les résultats prouvent que le champ de la température et le champ d'écoulement simulés sont fondamentalement en accord avec les mesures. Maia et al. [9] ont réalisé une étude analytique et numérique de l'écoulement turbulent et transitoire de l'air à travers une CCS en utilisant la méthode des volumes finis pour évaluer l'influence des paramètres géométriques aussi bien que les matériaux utilisés dans les performances d'une CCS. Chergui et al. [10] ont développé un code numérique de CFD pour mener des études de performance reliées aux paramètres géométriques et opérationnelles des CCS. Récemment Lebbi et al. [11,12] a analysé numériquement l'effet du diamètre de la tour et la hauteur du toit du collecteur, sur le comportement d'écoulement dans les cheminées solaires. Les résultats obtus montrent que les dimensions de la cheminée solaire permettent le contrôle du champ hydrodynamique via la vitesse d'écoulement, contrairement aux dimensions du collecteur qui permettent un contrôle directe du champ thermique et indirectement du champ dynamique.

L'objectif de la présente étude porte sur l'influence de la variation de l'intensité du rayonnement sur les caractéristiques thermiques et dynamiques de l'écoulement dans les CCS.

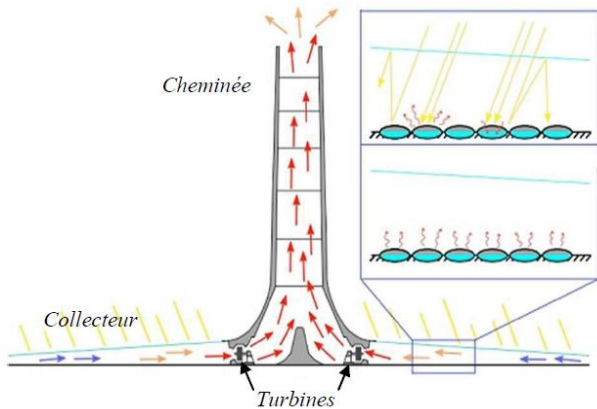


Fig. 1 Principe de fonctionnement d'une Centrale à cheminée solaire [4].

## II. FORMULATION MATHÉMATIQUE

Les équations qui régissent l'écoulement sont: l'équation de continuité, les équations de quantité de mouvement, l'équation d'énergie en plus de deux autres équations de transport nécessaire pour le calcul de viscosité turbulente figurant dans les équations de l'écoulement moyen. Nous avons utilisé le modèle  $k-\epsilon$  standard de Launder et Spalding [13] avec des fonctions de paroi. Dans ce modèle, la viscosité turbulente est évaluée à partir de l'énergie cinétique turbulente ( $k$ ) et la dissipation de l'énergie cinétique turbulente ( $\epsilon$ ) comme suit :

$$\nu_t = c_\mu f_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (1)$$

Toutes ces équations peuvent être générées moyennant une équation génératrice sous la forme conservative suivante [13]:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\rho r u \phi) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\rho r v \phi) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( r \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + S_\phi \quad (2)$$

Les expressions du coefficient de diffusion  $\Gamma_\phi$  et du terme source  $S_\phi$  sont indiquées dans le tableau. 1.

Tableau.1. Expressions du coefficient de diffusion et du terme source [13].

Equation	$\phi$	$\Gamma_\phi$	Terme source $S_\phi$
de continuité	1	0	0
de quantité de mouvement suivant r	u	$\mu + \mu_t$	$-\frac{\partial p}{\partial r} - \frac{2(\mu + \mu_t)\mu}{r^2}$
de quantité de mouvement suivant y	v	$\mu + \mu_t$	$-\frac{\partial p}{\partial y} - \rho_0 \epsilon \beta (T - T_0)$
d'énergie	T	$\frac{\lambda + \lambda_t}{C_p}$	0
d'énergie cinétique turbulente	k	$\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}$	$G_k + P_k - \rho \epsilon$
Taux d'énergie de dissipation	$\epsilon$	$\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon}$	$\frac{\epsilon}{k} (C_{\epsilon 2} G_k + C_{\epsilon 1} P_k) - C_{\epsilon 2} \rho \frac{\epsilon^2}{k}$

## III. SIMULATION NUMERIQUE

Le calcul numérique est basé sur la discrétisation en volumes finis des équations de transport sur un maillage structuré en 2-D. Le stockage des variables se fait en maillage non décalé (Collocated) via l'interpolation de Rhie & Chow [14]. La correction de la pression est réalisée à l'aide de l'algorithme SIMPLE [15].

### A. Génération du maillage

Le maillage en 2-D adopté est structuré, monobloc et curvilignes de type body-fitted. La dépendance de maillage a été étudiée en utilisant différents nombres de mailles avant de se fixer sur un maillage de 34 x 428 mailles (Fig.2).

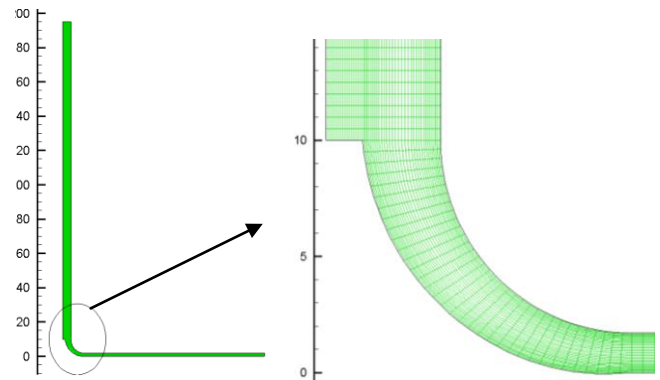


Fig. 2 Maillage de la cavité (32 x 376 mailles)

### B. Condition aux limites

Le domaine de calcul ainsi que les conditions aux limites utilisées, sont donnés dans la Fig.3. A la sortie de la tour-cheminée, l'écoulement est supposé être en régime établi. Le dispositif est supposé axisymétrique. Les parois sont imperméables et la condition de non glissement est adoptée. Ces conditions sont appliquées au collecteur, à la jonction,



aux parois de la tour et à la surface du sol. Dans la direction axiale, la composante,  $v$ , de vitesse est nulle.

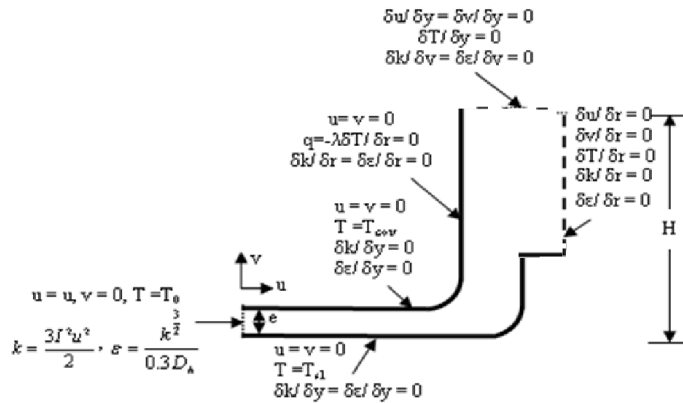


Fig. 3 Domaine de calcul et conditions aux limites.

Compte tenu que l'écoulement est induit par les forces de flottabilité, la composante ( $u$ ) de la vitesse dans la direction radiale est inconnue. Cette dernière est déterminée en utilisant un bilan de masse à chaque itération, jusqu'à la convergence des résultats. L'entrée du collecteur l'air est à la température ambiante considérée comme la température froide ( $T_{amb} = T_f$ ). Les parois de la tour sont supposées adiabatiques. La température de la surface du sol est la température chaude ( $T_{sol} = T_c$ ).

### C. Validations des résultats numériques

La Fig. 4 montre le profil de vitesse le long du collecteur. Les résultats numériques obtenus sont en accord avec ceux de Pastohr et al. [5].

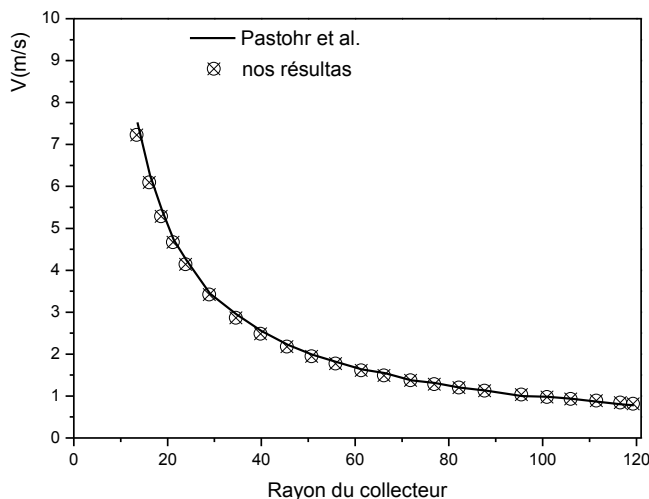


Fig. 4 Profils de vitesse le long du collecteur issus de (a) la présente étude (b) l'étude de Pastohr et al. [5].

## IV. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

### A. Effet de l'intensité du rayonnement sur le débit massique

La Fig.5 montre l'évolution du débit massique de l'air en fonction de l'intensité du rayonnement solaire. Ce graphe montre que le débit massique d'air produit par le système augmente continuellement avec l'augmentation de flux de chaleur créé par les rayonnements solaire. Cela peut s'expliquer par le faite que l'augmentation du flux de chaleur dans le collecteur fait augmenter le gradient de température et par conséquence augmenter les forces de flottabilité.

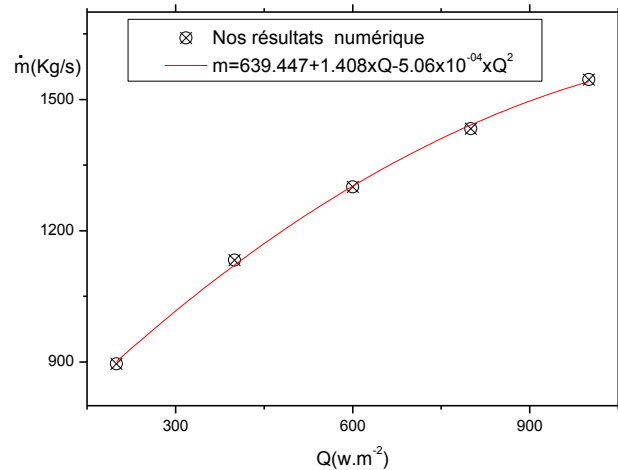


Fig. 5 Evolution du débit massique en fonction de l'intensité du rayonnement

### B. Effet de l'intensité du rayonnement sur le champ de vitesse dans le collecteur

La Fig.6 montre les profils de vitesse le long du collecteur à une hauteur de 0.85 m par rapport au sol pour différentes valeur de l'intensité du rayonnement. On observe que la vitesse de l'air en écoulement augmente avec l'augmentation de l'intensité du rayonnement solaire. Cet accroissement est le résultat de l'accroissement du débit massique.

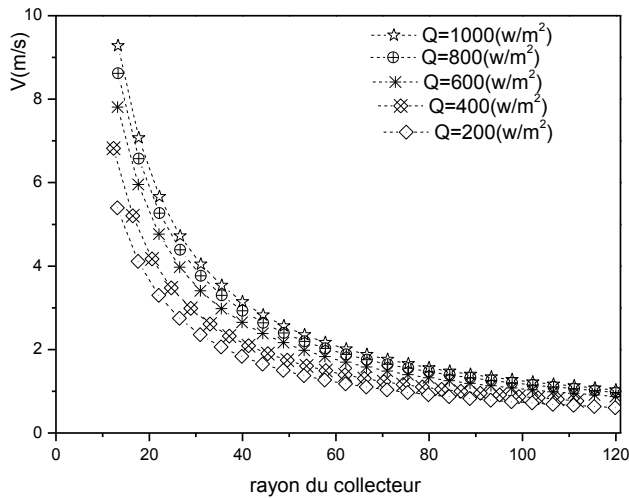


Fig. 6 Evolution de la vitesse dans le collecteur en fonction de l'intensité du rayonnement

C. Effet de l'intensité du rayonnement sur le champ de température dans le collecteur

La Fig. 7 montre l'évolution de la température le long du collecteur à une hauteur de 0.85 m pour différente valeur de l'intensité du rayonnement. On observe que la température dans le collecteur augmente, avec l'augmentation de la l'intensité du rayonnement.

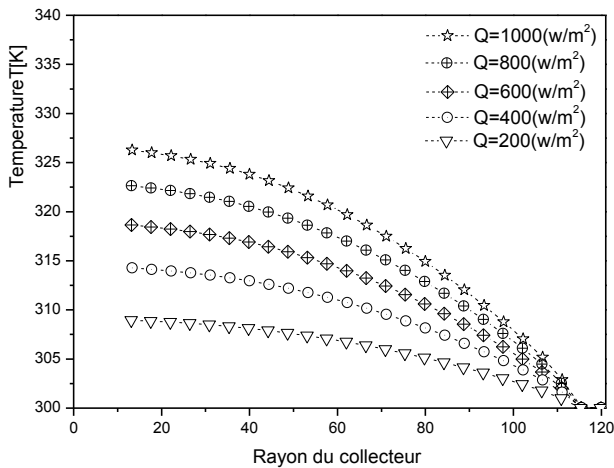


Fig. 7 Evolution de la température dans le collecteur en fonction de l'intensité du rayonnement

D. Effet de l'intensité du rayonnement sur les contours de vitesse dans le collecteur

La Fig. 8 montre les contours de vitesse pour deux valeurs de l'intensité de rayonnement solaire rayonnement  $Q = 200(w/m^2)$  et  $Q = 1000(w/m^2)$ . On note que l'air entre dans le collecteur à des vitesses très basses, de l'ordre de 0.5m/s. ces vitesses augmentent au fur à mesure qu'on avance vers le centre du collecteur. L'air atteint une vitesse moyenne de 5m/s à la sortie du collecteur. On constate que les vitesses atteignent leurs maximums à l'entrée de la tour-cheminée cette vitesse est de l'ordre de 10.5 m/s pour une intensité de  $Q=200 w/m^2$  et de 18 m/s pour une intensité de  $Q=1000 w/m^2$ .

Sur la Fig. 9, on montre la répartition de la température à travers la structure. L'air frais pénètre dans le collecteur à une température ambiante de 300 K. La température de l'air en écoulement vers le centre du collecteur augmente pour atteindre une valeur moyenne de 313 K pour une intensité de rayonnement de 200  $w/m^2$ . Pour une intensité de  $Q = 1000 w/m^2$  la température dans le collecteur augmente jusqu'à 325K. Ce qui entraîne une variation de la densité de l'air et permet à ce dernier de mouvoir pour s'échapper à travers la cheminée. Plus l'intensité du rayonnement augmente plus le gradient de densité est important et par conséquent le débit massique s'accroît.

V. CONCLUSIONS

Nous avons effectué une étude sur l'effet de l'intensité du rayonnement solaire sur le comportement thermo-hydrodynamique de l'écoulement dans les centrales à cheminée solaire. Cette étude nous a permis de conclure que l'augmentation des intensités des rayonnements affecte directement les caractéristiques thermiques de l'écoulement par l'augmentation de la température moyenne et maximale pressentait dans le collecteur et indirectement sur le champ de vitesse par l'augmentation du débit massique et par conséquence nous pouvons contrôler indirectement l'énergie cinétique engendrée par le système.

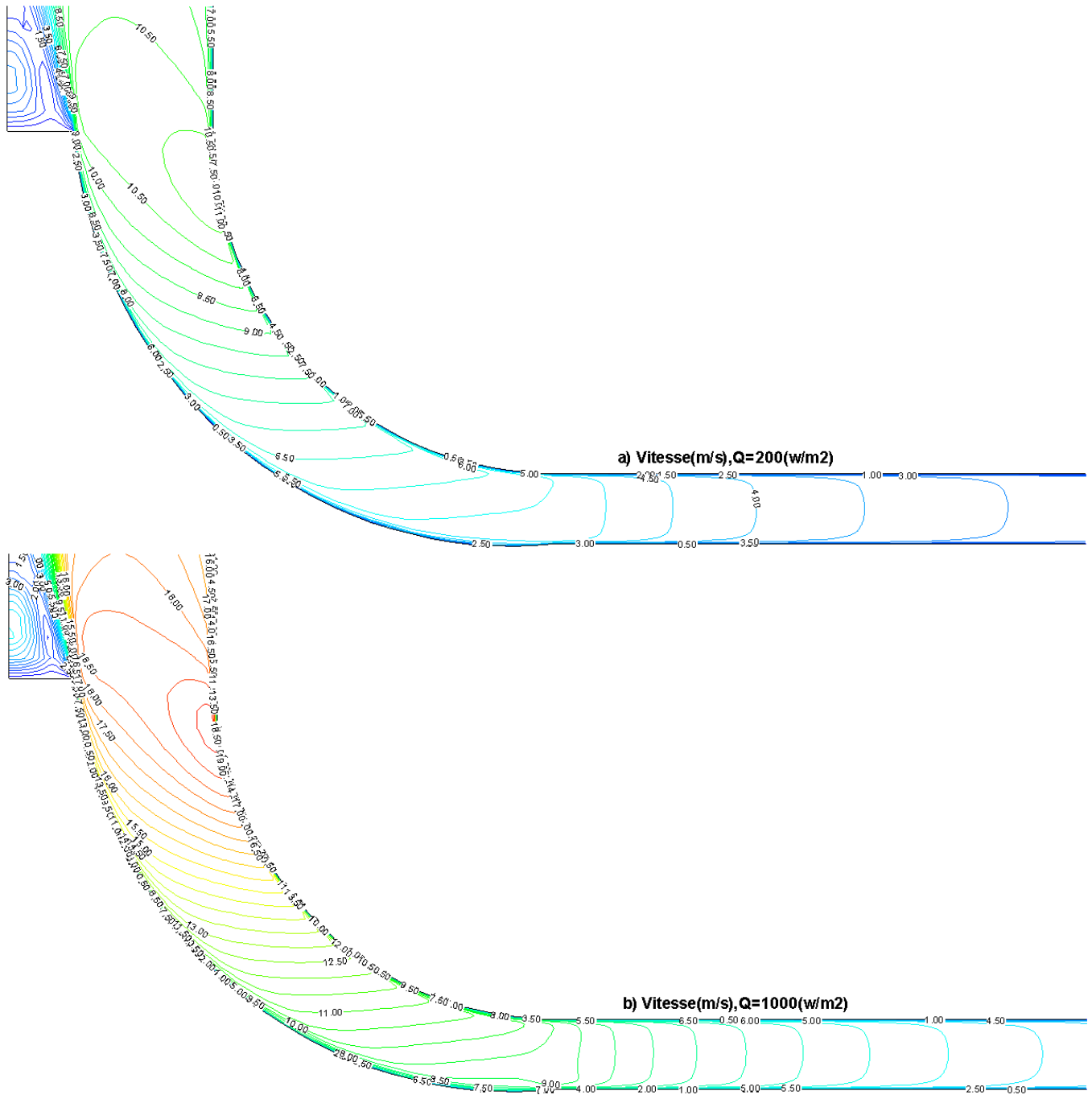


Fig. 8 Isovitesses dans le collecteur pour deux valeurs de l'intensité du rayonnement solaire.



# Le 2<sup>ème</sup> Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables

## The 2<sup>nd</sup> International Seminar on New and Renewable Energies

Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,  
Ghardaïa - Algérie 15, 16 et 17 Octobre 2014

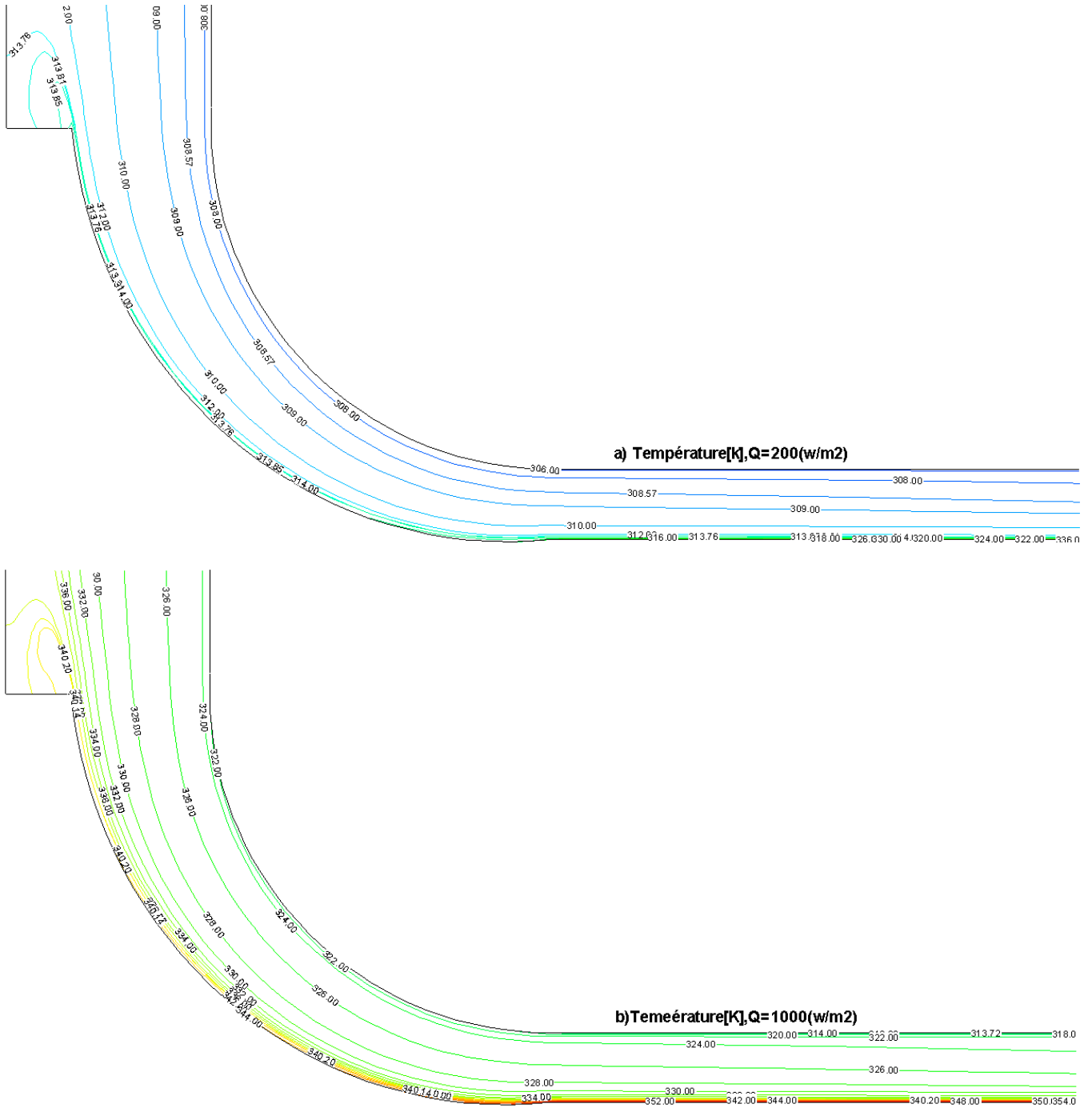


Fig. 9 Isothermes dans le collecteur pour deux valeurs de l'intensité du rayonnement solaire



## Le 2<sup>ème</sup> Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables

### The 2<sup>nd</sup> International Seminar on New and Renewable Energies

Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,  
Ghardaïa – Algérie 15, 16 et 17 Octobre 2014



#### REFERENCES

- [1] I. Cabanyes, "Las chimeneas solares (Solar chimney)", La energia Electrica. Cited due to Wikipedia, 1903.
- [2] Günther H. In hundert Jahren – Die künftige Energieversorgung der Welt (In hundred years – Future energy supply of the world). Kosmos, Franckh'sche Verlagshandlung, Stuttgart; 1931.
- [3] Lucier RE. Apparatus for converting solar to electrical energy. US. Patent; 1979.
- [4] J. Schlaich, Solar thermal electricity generation. Engineering Structures Int., Vol. 4, pp.76-81, 1994.
- [5] Pastohr H., Kornadt, O., Gürlebeck, K., 2004. Numerical and analytical calculations of the temperature and flow field in the upwind power plant Int. J. Energy Res. 28, 495–510.
- [6] Ming, T.Z, Liu, W., Pan, Y. and Xu GL., Numerical analysis of flow and heat transfer characteristics in solar chimney power plants with energy storage layer. Energy Conversion and Management, Vol.49, pp. 2872–2879, 2008.
- [7] Tingzhen, M., Weia, L., Guoling, X., Yanbin, X., Xuhu, G. and Yuan, P., Numerical simulation of the solar chimney power plant systems coupled with turbine. Renew Energy, Vol. 33, pp. 897–905, 2008.
- [8] Zhou, X.P., Yang, J.K., Wang, J.B., Xiao, B., Hou, G.X. and Wu, Y.Y., Numerical investigation of a compressible flow through solar chimney, Heat Transfer Engineering, Vol. 30, pp.670–676, 2009.
- [9] Maia CB, Ferreira AG, Valle RM, Cortez MFB. Theoretical evaluation of the influence of geometric parameters and materials on the behavior of the airflow in a solar chimney. Comput Fluid 2009;38:625–36.
- [10] T. Chergui, S. Larbi and A. Bouhdjar, "Thermo-Hydrodynamic Aspect Analysis of Flows in Solar Chimney Power Plants - A Case Study", (RSER), Vol. 14, N°5, pp. 1410 – 1418, 2010.
- [11] M. Lebbi, T. Chergui, H. Boualit L. Boutina. Influence des Paramètres Géométriques sur le Contrôle Thermo-hydrodynamique d'une Centrale à Cheminée Solaire Conférence. Internationale des Energies Renouvelables (CIER'13), Sousse, Tunisie, 15-17 Décembre 2013.
- [12] M. Lebbi, L. Boutina, T. Chergui, H. Boualit, A. Benkhalifa, et S. Laouar. Simulation numérique de l'évolution d'un écoulement à travers d'une cavité ouverte appliquée à la cheminée solaire Séminaire de Mécanique Université Amar Télidji de Laghouat 22 et 23 Octobre 2013.
- [13] Launder B.E., Spalding D.B. The numerical computation of turbulent flows. Comput Methods Appl Mech 1974; 3:269–89.
- [14] Rhie C. M. and Chow W. L., "Numerical Study of the Turbulent Flow Past an Airfoil with Trailing Edge Separation", AIAA Journal, vol. 21, no 11, pp. 1525-1535, 1983.
- [15] Patankar S. V., Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Hemisphere Publishing Corporation, United States of America (1980).