

Influence des paramètres géométriques sur le contrôle thermo-hydrodynamique d'une centrale à cheminée solaire

Mohamed Lebbi *, Toufik Chergui, Abdelhamid Boualit et Lyes Boutina

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

(reçu le 10 Janvier 2014 – accepté le 29 Septembre 2014)

Résumé - La centrale cheminée solaire (CCS) est un dispositif économique pour la production de l'électricité solaire. L'objectif principal est d'étudier numériquement l'effet de quelques paramètres géométriques, comme le diamètre de la tour et la hauteur du toit du collecteur, sur le comportement d'écoulement dans les cheminées solaires. Un premier travail de validation a été réalisé en comparant nos résultats avec ceux de d'autres auteurs. Après cette étude, il nous apparaît clairement 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 direct du champ thermique et indirectement du champ dynamique.

Abstract – A numerical study was conducted to determine the central solar chimney (CCS) is an economical device for the production of solar electricity. The main objective of this work is to study numerically the effect of the geometrical parameters, such as the tower diameter and the collector roof height on the airflow behavior inside the solar chimneys. An initial validation was performed by comparing our results with those of other authors. According to this study it is clear to us that the dimensions of the solar chimney can control the hydrodynamic field via the flow velocity, unlike the manifold dimensions that allow direct control of the thermal field and indirectly the dynamic field.

Mots clés: Cavité Ouverte - Cheminée Solaire – Convection Naturelle - Modélisation Numérique.

1. INTRODUCTION

La cheminée solaire (CS) est une installation solaire de production de puissance qui utilise le rayonnement solaire pour accroître l'énergie interne de l'air s'écoulant à travers le système, transformant ainsi l'énergie solaire en énergie cinétique. L'énergie cinétique de l'air est ainsi transformée en électricité en utilisant des groupes turbogénérateurs adéquats (Fig. 1).

La CCS a été proposé pour la première fois par Cabanyes [1], et ensuite décrite dans une publication par Günter [2]. Depuis 1975, plusieurs brevets ont été accordés à Lucier en Australie, au Canada, en Israël et aux Etats-Unis [3].

Schlaich a également présenté cette technologie dans un congrès en 1978 [4], pour concevoir et construire, par la suite, avec ses coéquipiers le premier prototype d'une CCS à Manzanares en Espagne entre 1981 et 1982 [5].

Bernardes *et al.* [6] ont présenté une analyse théorique d'une CCS, opérant en convection naturelle et en régime laminaire et permanent. Afin de prévoir le comportement thermo-hydrodynamique de l'air, des conditions aux limites thermiques

* lebbi.med@gmail.com

ont été imposées de façon à garantir un écoulement laminaire régulier le long du dispositif.

Pastohr *et al.* [7] 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.

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.

Tingzhen *et al.* [9] ont présenté une méthode de simulation numérique d'une CCS là où la turbine éolienne a été incluse. 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, contrairement, la température moyenne à la sortie de la tour et la chute de pression à la turbine augmentent, alors que l'énergie maximale disponible, la puissance développée et le rendement chacun a une valeur pic.

Maia *et al.* [10] 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.

Larbi *et al.* [11] ont présenté une analyse des performances énergétiques d'une centrale CCS prévue pour fournir de l'énergie électrique aux villages isolés situés dans la région du sud-ouest algérienne. L'énergie solaire et l'état psychrométrique de l'air dans le sud de l'Algérie sont importants pour encourager pleinement le développement des cheminées solaires soit pour la production de l'énergie thermique ou électrique pour de divers usages.

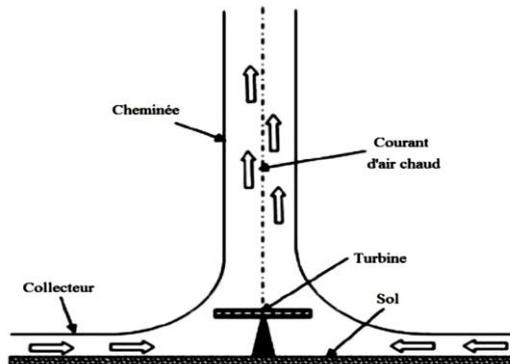


Fig. 1: Schéma d'une centrale cheminée solaire

Chergui *et al.* [12] ont développé un code numérique en Volumes Finis pour la convection naturelle. Des études de performance reliées aux paramètres géométriques et opérationnelles ont été réalisées. Chergui *et al.* [13] se sont intéressés par la configuration (forme) géométrique de la jonction collecteur-tour et son influence sur les caractéristiques thermo-hydrodynamique du système en utilisant la Méthode des Eléments Finis (FEM).

Les équations de bilan sont résolues numériquement par la Méthode des Volumes Finis (MFV) en cordonnées généralisées pour la création de la forme complexe de la géométrie en question et son maillage. L'arrangement des variables dépendante sur la grille de calcul est type non-décalé (Collocated Variable Arrangement).

2. FORMULATIONS DU PROBLEME

2.1 Equations régissant l'écoulement

Afin d'identifier l'influence de quelques paramètres géométriques sur les caractéristiques thermiques et hydrodynamiques de notre écoulement, nous montrons les grandeurs adimensionnelles adoptées dans notre simulation sur la figure 1. Soit alors, (Hc2) la hauteur du toit du collecteur à l'entrée variant de 0.025 à 0.1; (Hc1) la hauteur du toit du collecteur variant de 0.25 à 1; (Rc=12.5) rayon du collecteur; (Rt) rayon de la tour-cheminée variant de 0.25 à 1 et (Ht=12.3) la hauteur de la tour-cheminée.

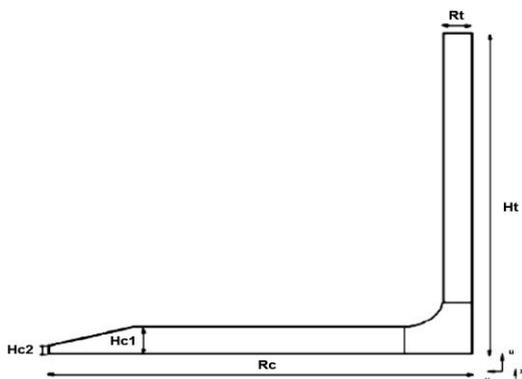


Fig. 2: Différents paramètres géométriques

Le modèle mathématique adopté est établi moyennant les hypothèses simplificatrices suivantes, l'écoulement est bidimensionnel et le système admet un axe de symétrie, l'écoulement est turbulent, le fluide considéré est supposé visqueux et newtonien et obéit à approximation de Boussinesq.

Les équations traduisant l'écoulement sont donc: l'équation de densité, les équations de Navier-Stokes, 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. Donc nous avons utilisé le modèle $k-\epsilon$ standard de Launder et Spalding [14] 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 ϵ comme suit:

$$\nu_t = C_\mu \times f_\mu \times k^2 / \epsilon$$

Toutes ces équations peuvent être générées moyennant une équation génératrice sous la forme conservatrice suivante:

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

Les expressions du coefficient de diffusion Γ_ϕ et du terme source S_ϕ sont indiquées dans le **Tableau 1**.

Tableau 1: Expressions du coefficient de diffusion et du terme source

Equation	ϕ	Γ_ϕ	S_ϕ
Continuité	1	0	0
Quantité de mouvement suivant r	u	$\mu + \mu_t$	$-\frac{\partial p}{\partial r} - \frac{2(\mu + \mu_t)u}{r^2}$
Quantité de mouvement suivant y	v	$\mu + \mu_t$	$-\frac{\partial p}{\partial y} - \rho_0 g \beta (T - T_0)$
Energie	T	$\lambda + \lambda_t / C_p$	0
Energie cinétique turbulente	k	$\mu + \mu_t / \sigma_k$	$G_k + P_k - \rho \varepsilon$
Taux d'énergie de dissipation	ε	$\mu + \mu_t / \sigma_\varepsilon$	$\frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 2} G_k + C_{\varepsilon 1} G_k) - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}$

2.2 Condition aux limites et demain calcul

A la sortie de la tour- cheminée, l'écoulement est supposé être en régime établi. Au niveau des parois, la condition de non glissement et de parois imperméables. Dans la direction axiale, la composante, v , de vitesse est nulle. 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'air est à la température ambiante ($T_0 = 27^\circ\text{C}$) à l'entrée du collecteur. Les parois de la tour sont supposées adiabatiques, ainsi que la région de la jonction. La température du sol est fixée ($T_{\text{sol}} = 37^\circ\text{C}$) pour donner un écart de température $\Delta T = 10^\circ\text{C}$.

3. PROCEDURE 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 *et al.* [15]. La correction de la pression est réalisée à l'aide de l'algorithme Simple [16].

3.1 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 d'environ 32×376 mailles (Fig. 3).

3.2 Validation des résultats numériques

La figure 4 présente le profil de température dans le collecteur, pour un rayon adimensionnel $r/R_c = 0.15$. Les résultats numériques obtenus montrent un bon accord avec celle présentée par Maia *et al.* [10].

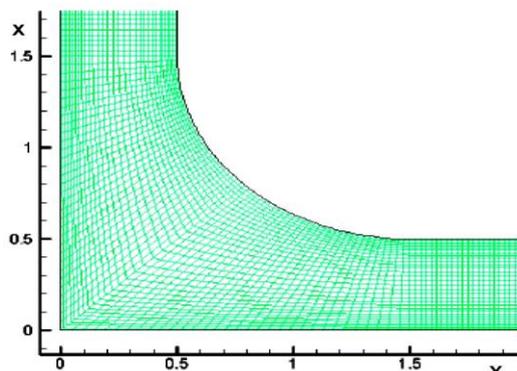


Fig. 3: Maillage de la cavité (32 × 376 mailles)

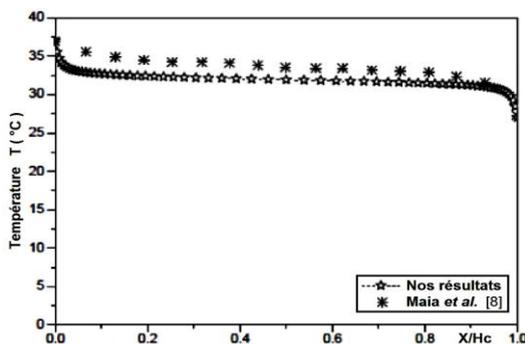


Fig. 4: Validation de nos résultats avec les résultats théoriques de Maia *et al.* [10]

4. RESULTATS ET DISCUSSIONS

4.1 Influence de la hauteur du toit sur le champ de vitesse

La figure 5 montre l'évolution de la vitesse dans le collecteur pour différents hauteurs du toit. On observe qu'au fur et à mesure qu'on diminue la hauteur du toit du collecteur, la vitesse maximale augmente proche de la jonction où atteint son maximum à la sortie du collecteur en raison des échanges thermiques entre le sol (l'absorbeur) et le flux d'air.

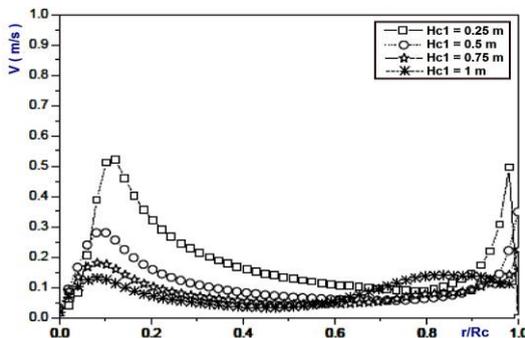


Fig. 5: Influence de la hauteur du toit sur le profil de vitesse le long du collecteur pour un $\Delta T = 10^\circ\text{C}$ à $X = 0.025\text{ m}$

4.2 Influence de la hauteur du toit sur le champ de la température

La figure 6 présente l'évolution de la température le long du collecteur pour différents valeurs de la hauteur du toit de collecteur. On note qu'une augmentation de la température dans le collecteur, lorsque la hauteur est augmentée.

En raison du l'augmentation du débit d'air qui doit être encombré à la sortie du collecteur et l'entrée de la tour, plus la hauteur du collecteur est diminuée, plus la température de l'écoulement augmente dans la tour de cheminée.

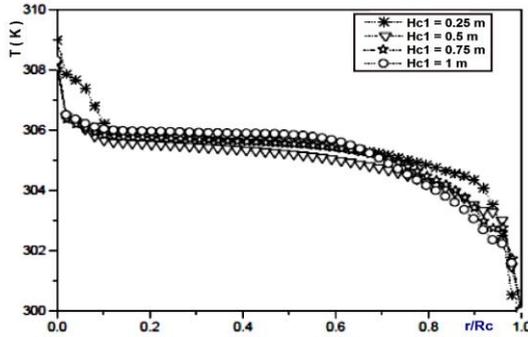
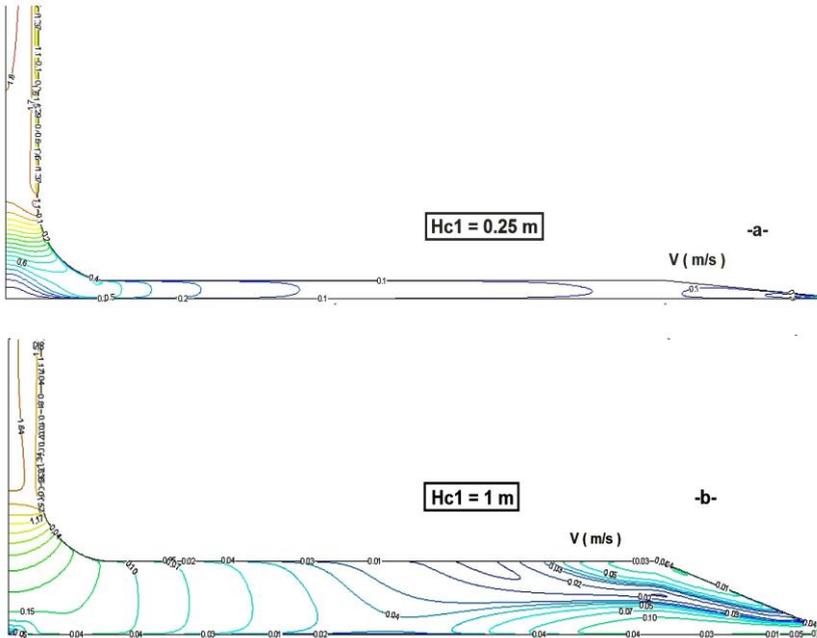


Fig. 6: Influence du diamètre de la tour sur le profil de température le long du collecteur à $X = 0.025m$

4.3 Influence de la hauteur du toit sur le champ de la température

La figure 7a-b- présente les contours de la vitesse pour deux valeurs de la hauteur du toit. On peut noter que la distribution du champ de vitesse prend son maximum à partir de l'entrée de la tour en raison de les particules d'air chaud monte par l'effet de la force d'Archimède.



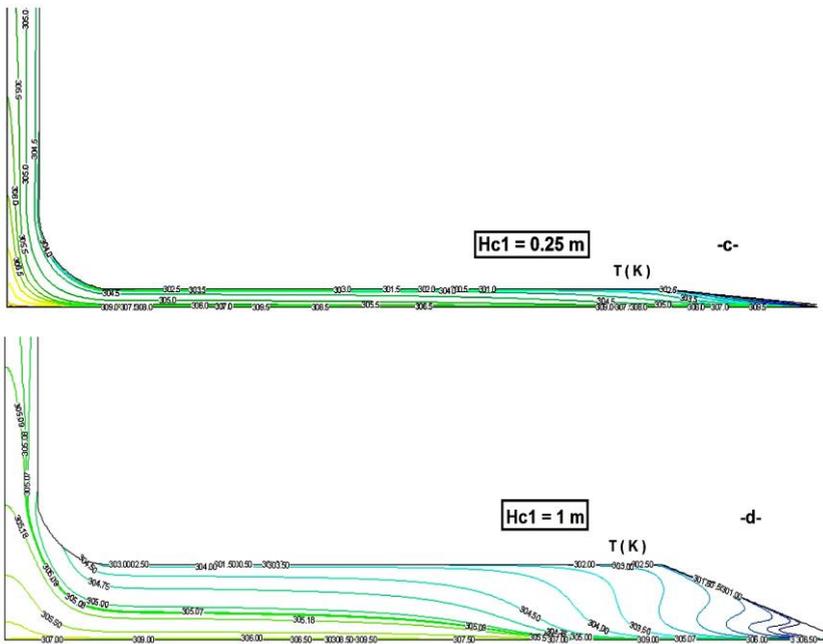
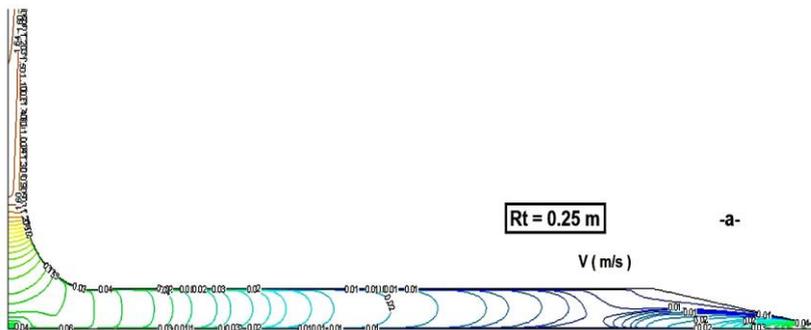


Fig. 7a-d: Iso-vitesses et isothermes pour différentes valeurs de la hauteur du toit du collecteur à $X = 0.025\text{ m}$

4.4 Influence du diamètre de la tour sur les iso-vitesse et les isothermes

Les contours des isothermes sont illustrés dans la figure 8. On peut remarquer que la variation dont le diamètre de la tour peut changer la distribution du champ de vitesse et de température dans le collecteur et la tour de la cheminée.

La figure 9 schématise l'évolution de la vitesse dans le collecteur pour différents diamètres s'étale de $R_t = 0.25\text{ m}$ à $R_t = 1\text{ m}$. On note qu'au fur et à mesure qu'on augmente le diamètre de la tour, la vitesse augmente à la sortie du collecteur où elle atteint son maximum en raison des échanges thermiques entre le sol (l'absorbeur) et le flux d'air.



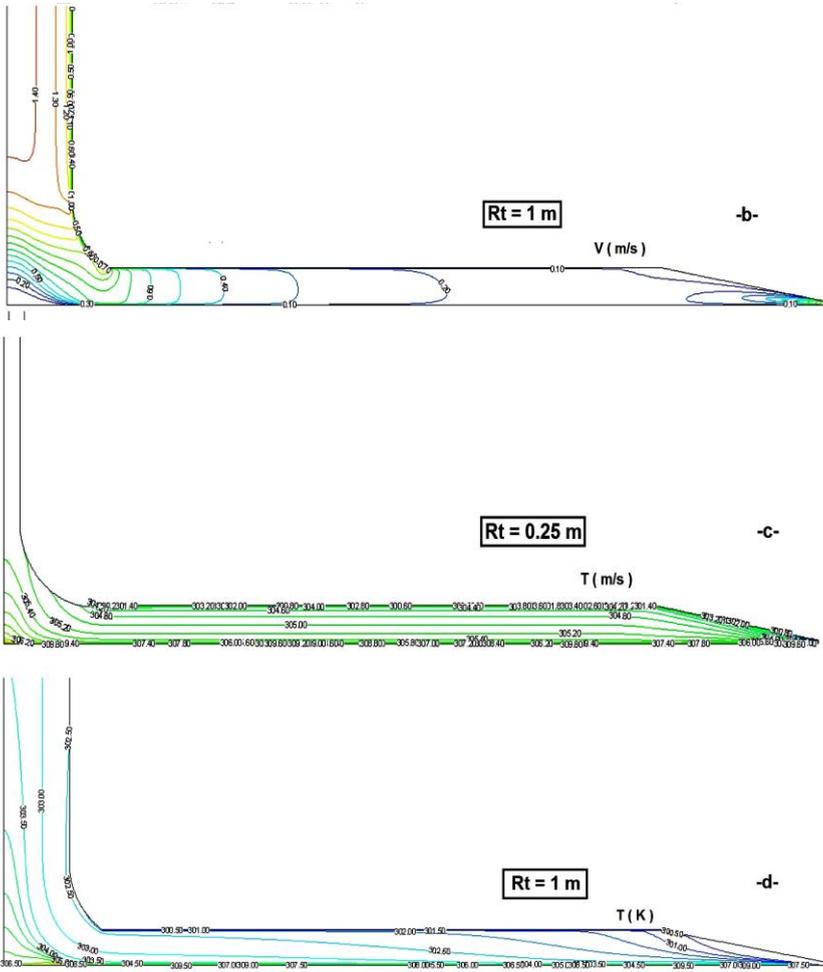


Fig. 8a-d-: Iso-vitesses et isothermes pour différentes valeurs du diamètre de la tour à $\Delta T = 10^\circ\text{C}$

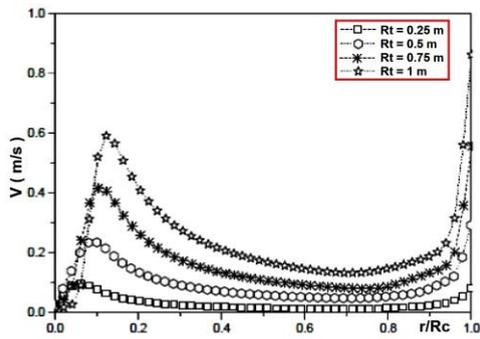


Fig. 9: Influence du diamètre de la tour sur le profil de vitesse le long du collecteur pour $\Delta T = 10^\circ\text{C}$ à $X = 0.025\text{ m}$

4.5 Influence du diamètre de la tour sur le champ de température

La figure 10 est schématisée l'évolution de la température le long du collecteur pour différentes valeurs du diamètre de la tour de la cheminée.

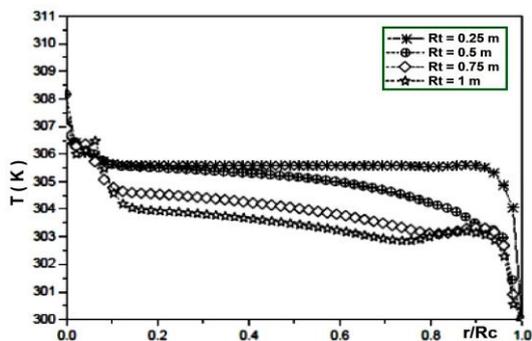


Fig. 10: Influence du diamètre de la tour sur le profil de température le long du collecteur à $X = 0.025$ m

On note qu'une diminution du diamètre de la tour sert à augmenter de la température dans le collecteur. En raison de l'augmentation du débit d'air qui doit être encombré à la sortie du collecteur et l'entrée de la tour, plus la hauteur du collecteur est diminuée, plus la température de l'écoulement augmente dans la tour de cheminée.

5. CONCLUSIONS

Dans cette étude, notre objectif principal est de faire une analyse numérique sur le comportement d'écoulement de la cheminée solaire par l'effet de la variation des paramètres géométriques comme le diamètre de la tour et la hauteur du toit de collecteur.

Un premier travail de validation a été réalisé en comparant nos résultats avec ceux d'autres auteurs. Ce qui nous a permis de valider notre simulation numérique. Les résultats obtenus montrent que l'augmentation du diamètre de la tour sert à augmenter la vitesse maximale dans le collecteur et par contre la diminution de la température dans le collecteur.

Egalement on peut conclure que la diminution de la hauteur de toit de collecteur à tendance d'augmenter la vitesse maximale dans le collecteur par contre une diminution de la température dans le collecteur.

REFERENCES

- [1] I. Cabanyes, 'Las Chimeneas Solares (Solar Chimney)', La Energia Eléctrica. Cited due to Wikipedia, 1903.
- [2] H. Günther, 'In Hundert Jahren – Die künftige Energieversorgung der Welt (In hundred years – Future Energy Supply of the World)', Kosmos, Franckh'sche Verlagshandlung, Stuttgart, 1931.
- [3] R.E. Lucier, 'Apparatus for Converting Solar to Electrical Energy', US. Patent, 1979.

- [4] N. Pasumarthi and S.A. Sherif, 'Experimental and Theoretical Performance of a Demonstration Solar Chimney Model. Part I: Mathematical Model Development', International Journal of Energy Research, Vol. 22, N°3, pp. 277 – 288, 1998.
- [5] W. Haaf, 'Solar Chimneys, Part II: Preliminary Test Results from the Manzanares Pilot Plant', Solar Energy, Vol. 2, N°2, pp. 141 – 161, 1984.
- [6] M.A. dos S. Bernardes, R. Valle and M.F.B. Cortez, 'Numerical Analysis of Natural Laminar Convection in a Radial Solar Heater', International Journal of Thermal Sciences, Vol. 38, N°1, pp. 42 - 50, 1999.
- [7] H. Pastohr, O. Kornadt and K. Gürlebeck, 'Numerical and Analytical Calculations of the Temperature and Flow Field in the Upwind Power Plant', International Journal of Energy Research, Vol. 28, N°6, pp. 495 – 510, 2004.
- [8] X.P. Zhou, J.K. Yang, B. Xiao and F. Long, 'Numerical Study of a Solar Chimney Thermal Power Setup using Turbulent Model', Journal of the Energy Institute, Vol. 81, pp. 86 – 91, 2008.
- [9] T. Tingzhen, L. Weia, X. Guoling, X. Yanbin, G. Xuhu and P. Yuan, 'Numerical Simulation of the Solar Chimney Power Plant Systems Coupled with Turbine', Renewable Energy, Vol. 33, N°5, pp. 897 – 905, 2008.
- [10] C.B. Maia, A.G. Ferreira, R.M. Valle and M.F.B. Cortez, 'Theoretical Evaluation of the Influence of Geometric Parameters and Materials on the Behavior of the Airflow in a Solar Chimney', Computers and Fluids, Vol. 38, pp. 625 – 636, 2009.
- [11] S. Larbi, A. Bouhdjar and T. Chergui, 'Performance Analysis of a Solar Chimney Power Plant in the Southwestern Region of Algeria', Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 14, N°1, pp. 470 – 477, 2010.
- [12] T. Chergui, S. Larbi and A. Bouhdjar, 'Thermo-Hydrodynamic Aspect Analysis of Flows in Solar Chimney Power Plants - A Case Study', Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 14, N°5, pp. 1410 – 1418, 2010.
- [13] T. Chergui, S. Larbi and A. Bouhdjar, 'Configuration Aspect Analysis in Solar Chimney Power Plants Using Finite Element Method', Proceeding of the Eleventh World Renewable Energy Congress, WREC2011, Linköping, Sweden, May 08-13, 2011.
- [14] B.E. Launder and D.B. Spalding, 'The Numerical Computation of Turbulent Flows', Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 3, pp. 269 – 389, 1974.
- [15] C.M. Rhie and W.L. Chow, 'Numerical Study of the Turbulent Flow Past an Airfoil with Trailing Edge Separation', AIAA Journal, Vol. 21, N°11, pp. 1525 - 1535, 1983.