

# Contrôle Passive de la Qualité du champ Thermo-hydrodynamique des Cheminées Solaires par les Paramètres Géométriques

T. Chergui\*, Abd. H. Boualit\*, A. Bouhdjar\*\*, M. Lebbi\*, S. Larbi\*\*\*,

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

\*\*Centre de Développement des Energies Renouvelables, CDER, 16340, Algiers, Algeria.

\*\*\*Ecole National Polytechnique, ENP, 16200. Algiers, Algeria.

tchergui@gmail.com

**Résumé**– Le but de ce papier est d’analyser le comportement thermo-hydrodynamique de l’écoulement de l’air dans les cheminées solaires (CS) selon certains paramètres dominants. Les équations décrivant l’écoulement turbulent de l’air ont été résolues numériquement en utilisant la méthode des volumes finis pour les différents paramètres géométriques. La discrétisation en volumes finis des équations de transport en coordonnées généralisées, couramment utilisé pour étudier les écoulements turbulents dans des domaines géométriquement complexes a été adoptée. Il a été démontré que les dimensions de la tour contrôlent directement le domaine hydrodynamique en augmentant ou en diminuant le débit massique tandis que le champ thermique est contrôlé indirectement en diminuant la température moyenne du système. En outre, les dimensions du collecteur contrôlent directement le champ thermique et indirectement le domaine hydrodynamique. Cet effet se traduit par la diminution de l’énergie cinétique produite.

**Mots-clés** — *Cheminée Solaire, Rayonnement solaire, Température ambiante, Simulation numérique.*

## I. INTRODUCTION

Les techniques cheminées solaires utilisent l’irradiation solaire pour chauffer l’air sous le toit transparent du collecteur. Une fois chauffé, l’air s’écoule, par gradient de densité, à travers la tour-cheminée placée au centre du collecteur. L’énergie solaire captée par le collecteur est ainsi transformée en énergie cinétique. L’énergie cinétique de l’air en écoulement peut être transformée en énergie électrique en utilisant des aérogénérateurs. On parle donc d’une centrale à cheminée solaire (CCS).

Les techniques Cheminées Solaires (CS) peuvent servir, dans plusieurs disciplines, comme des générateurs de débit d’air à des températures et des vitesses contrôlées, comme par exemple, dans le conditionnement d’air (la climatisation) et le séchage.

A commencer par **Cabanyes** [1] et **Günter** [2], plusieurs projets sur les CCS ont été communiqués à travers le monde jusqu’à la réalisation du premier prototype dans la province espagnol Manzanares [3,4]. La conception de ce prototype a été réalisée par le bureau d’études de **Schlaich et Partner** [5].

Depuis, plusieurs études sur l’évaluation des performances globales (le rendement et la puissance

produite) des centrales CCS ont été entrepris [3-7]. Pour les études de CFD qui s’intéressent aux caractéristiques locales des écoulements à travers ces systèmes on site le travail de **Pastohr & al.** [8] qui 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.** [9] 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.** [10] 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 est que l’énergie maximale disponible, la puissance développée et le rendement atteignent chacun une valeur maximale (pic). **Zhou et al.** [11] 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.** [12] 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.** [13] comme **Chergui et al.** [14] 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 psychométrique 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.

**Chergui et al. [15]** ont développé un code numérique de CFD basé sur la méthode des volumes finis. Des études de performance reliées aux paramètres géométriques et opérationnelles d'une cheminée solaire ont été réalisées. L'influence du rapport de l'élévation du toit du collecteur. La hauteur du collecteur, la hauteur de la tour et la force d'entraînement de l'écoulement c'est-à-dire la différence de températures ont été prises en compte à travers la variation du nombre de Rayleigh Ra, ainsi le champ de vitesse et la distribution de la température, dans le système, ont été évalués en fonction de Ra. **Les mêmes auteurs [16]** 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) dans la résolution des équations de transport.

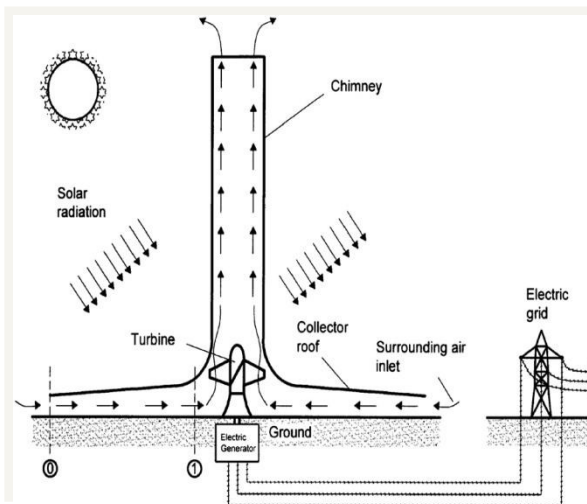


Figure 1 Principe de fonctionnement d'une Centrale à cheminée solaire.

**Chergui et al. [17]** ont introduit le concept de minimisation de la production d'entropie EGM (Entropy Generation Minimisation) dans leur étude d'optimisation de la configuration géométrique dans un système de cheminée solaire. Ils ont rapporté, pour différents nombre de Rayleigh, des résultats numériques sur les taux de production locale et globale de l'entropie dans le cas d'une convection naturelle de l'air dans une cheminée solaire. Les résultats en termes de champs et de profils de production d'entropie locale, sont donnés.

**Cao et al. [18]** ont élaboré un programme basé sur le TRNSYS pour évaluer les performances des CCS. Ils ont vérifié l'influence des paramètres météorologique sur les performances des CCS et donc ils ont pu réaliser une analyse technico-économique sur des CCS commerciales même pour des sites qui ne figurent pas dans la base de données du TRNSYS.

**Chergui et al [19]** se sont intéressés à l'influence de la température ambiante sur le champ thermo hydrodynamique dans les cheminées solaires. **Ils ont montré** que l'augmentation de la température ambiante fait baisser légèrement le débit massique et par contre élever la température maximale dans le collecteur. L'influence de la température ambiante sur les performances globales des cheminées solaires, tels que la puissance cinétique ou électrique, est pratiquement négligeable. **Lebbi et al. [20]** ont entrepris une étude sur la possibilité d'utiliser les CCS comme source d'énergies dans les processus de génération de l'Hydrogène et d'utiliser ce dernier comme une astuce de stockage de l'excès d'énergie électrique engendré par les CCS.

L'objectif de la présente étude porte sur l'influence de la variation de la température ambiante sur les caractéristiques thermiques et hydrodynamiques de l'écoulement dans les CCS.

Récemment **Chergui et al. [21]** se sont particulièrement intéressés à l'effet de la forme de certaines parties d'un cheminée solaire comme la forme de la jonction collecteur-tour, ou la tour de forme tronconique convergente ou divergente. A cet effet, les équations de transport de flux ont été modélisées et résolus numériquement pour différentes formes géométriques à l'aide de la méthode des volumes finis en coordonnées généralisées. Ils ont constaté que quelques configurations géométriques générés des perturbations, qui reflétaient sur les comportements thermo-hydrodynamiques de l'écoulement. Ils ont conclu que des modifications sur la forme géométrique peuvent éliminer cette perturbation dissipation.

## II. FORMULATION MATHÉMATIQUE

Les équations qui régissent l'écoulement de l'air dans une cheminée solaire 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 des quantités turbulentes, comme la viscosité turbulente, figurant dans les équations de l'écoulement moyen. Nous avons utilisé le modèle  $\kappa$ - $\epsilon$  standard de **Lauder et Spalding [22]** avec des fonctions de paroi. Dans ce modèle, la viscosité turbulente est évaluée à partir de l'énergie cinétique turbulente ( $\kappa$ ) et la dissipation de l'énergie cinétique turbulente ( $\epsilon$ ). Soit alors :

$$\mu = \rho c \frac{\kappa^2}{\mu \epsilon} \quad (1)$$

Les équations régissant de l'écoulement sont alors [8]

a. L'équation de continuité

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (2)$$

b. L'équation de quantité de mouvement suivant  $-x$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial r_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i \quad (3)$$

c. L'équation de conservation d'énergie

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho c u T) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( k \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + r_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \beta T \left( u_j \frac{\partial p}{\partial x_j} \right) \quad (4)$$

d. L'équation d'énergie cinétique turbulente ( $\kappa$ ):

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u \kappa) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\kappa} \right) \frac{\partial \kappa}{\partial x_i} \right] + G_\kappa + \beta \frac{\mu_t}{\rho \text{Pr}_t} \kappa - \rho \varepsilon \quad (5)$$

e. L'équation de dissipation de l'énergie cinétique turbulente ( $\varepsilon$ ):

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{\kappa} \left( G_\kappa + C_{3\varepsilon} \beta g_i \frac{\mu}{\rho \text{Pr}_t} \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{\kappa} \quad (6)$$

### III. PROCEDURE NUMERIQUE

La discrétisation des équations de transport sur un maillage structuré en 2-D a été fait à base de la méthode des volumes finis [23]. Le stockage des variables se fait en maillage non décalé (Collocated) via l'interpolation de **Rhie & Chow** [24]. La correction de la pression est réalisée à l'aide de l'algorithme **SIMPLE** [25].

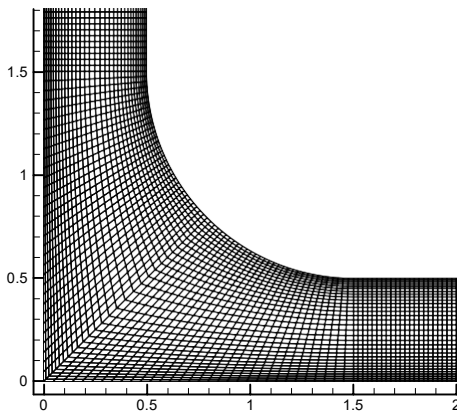


Figure 2 Maillage de la structure (40 x 400 mailles).

Le maillage en 2-D adopté est structuré et curvilignes de type body-fitted [26]. La dépendance de maillage a été étudiée en utilisant différents nombres de mailles avant de se fixer sur un maillage de 40 x 400 mailles (Fig.2).

#### A. Condition aux limites

Cette étude porte sur une CCS supposée symétrique et ses parois imperméables en plus de la condition de non glissement. La fig. 3 montre les différents conditions aux limites adoptées. Ces conditions sont appliquées au collecteur, à la jonction, aux parois de la tour et à la

surface du sol. A la sortie de la tour-cheminée, l'écoulement est supposé entièrement établi. A l'entrée du collecteur, la composante de la vitesse dans la direction radiale  $u$  est inconnue au préalable, puisque la vitesse est le résultat indirecte de la force de flottabilité origine du mouvement. Donc la vitesse à l'entrée doit être déterminée en utilisant un bilan de masse à chaque itération avant quelle soit injectée dans le prochain calcul. Cette opération est maintenue jusqu'à la convergence des résultats. L'air à l'entrée du collecteur est supposé à la température ambiante. Les parois de la tour sont supposées adiabatiques. La température de la surface du sol est la température chaude ( $T_{\text{sol}} = T_{\text{chaude}}$ ).

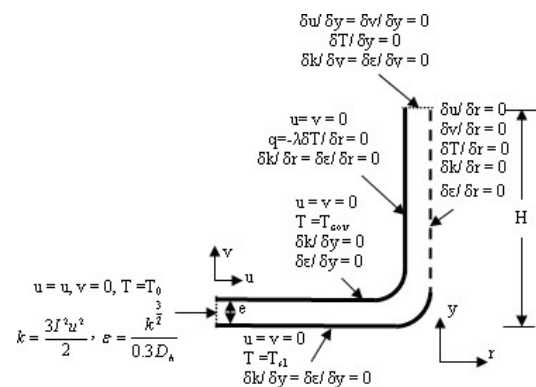


Figure 3 Conditions aux limites et domaine d'étude

### IV. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

#### A. Influence des paramètres géométriques du collecteur

Les figures 4 et 5 montrent respectivement l'évolution du débit massique produit par le système pour différentes valeurs de la hauteur du collecteur et du diamètre du collecteur. Le débit massique croît avec la hauteur du collecteur avant de commencer à décroître. Ceci peut s'expliquer par la section transversale de la tour qui reste inchangée et donc freine l'écoulement. Une augmentation de cette dernière en correspondance avec l'augmentation de la section transversale du collecteur peut retarder la rechute du débit massique.

La courbe sur la Fig. 5 montre que le débit massique de l'air s'accroît avec l'accroissement du rayon du collecteur jusqu'à une certaine valeur asymptotique pour connaître une stabilisation. Cela peut s'expliquer par le fait que l'augmentation du rayon du collecteur fait augmenter le gradient de température et par conséquent augmenter les forces de flottabilité.

Cette stabilisation dans la valeur du débit massique malgré l'augmentation du rayon du collecteur peut s'expliquer par l'amplification des pertes de charges proportionnelles à la dimension du parcours de l'écoulement. En plus de l'effet inverse de l'augmentation de la surface chauffée. Car cette augmentation fait amplifier les pertes thermiques et donc le système tend vers un équilibre thermique.

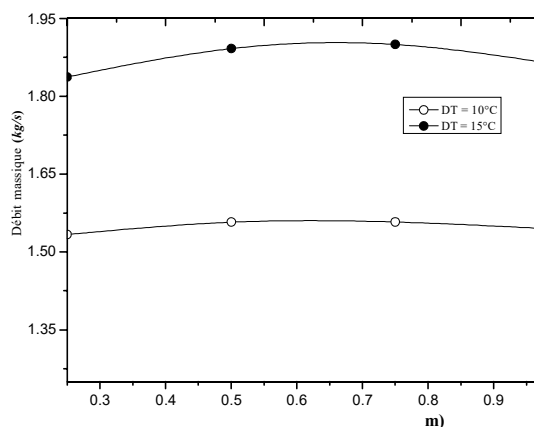


Figure 4 Débit massique vs l'élévation du toit du collecteur.

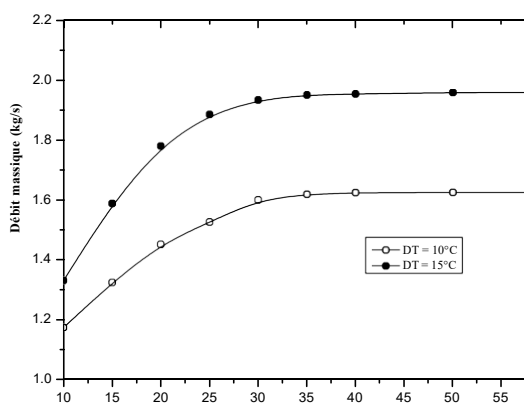


Figure 5 Débit massique vs le diamètre du collecteur

### B. Influence des paramètres géométriques de la tour

Les figures 6 et 7 montrent, respectivement, l'évolution du débit massique produit par le système pour différentes valeurs du diamètre de la tour et de sa hauteur. On note que le débit massique produit par le système augmente continuellement avec l'augmentation de la hauteur de la tour. Cela peut s'expliquer par le fait que les dimensions de la tour favorisent les forces motrices, origine du mouvement (gradient de pression et forces de flottabilités). Par contre l'augmentation du rayon de la tour induit une influence moindre des contraintes loin des parois de la tour faisant ainsi augmenter le débit généré par le système et donc une augmentation de la vitesse d'écoulement dans le collecteur suite à. Donc un plus grand volume d'air est à chauffer dans le collecteur pour la même période, faisant ainsi diminuer la température de l'air dans le collecteur.

On note que le débit massique produit par le système augmente continuellement avec la croissance de la hauteur de la tour avant de se stabiliser à une valeur asymptotique. Ceci peut être expliqué par le fait que la hauteur de la tour favorise l'effet thermosiphon autour du mouvement. Les forces de frottement s'installent progressivement en raison du rapport de la surface intérieure du canal (tour) et du volume de fluide de ce même canal. Ce qui motive les

deux forces à s'équilibrer et par conséquent le système à fournir un débit massique constant.

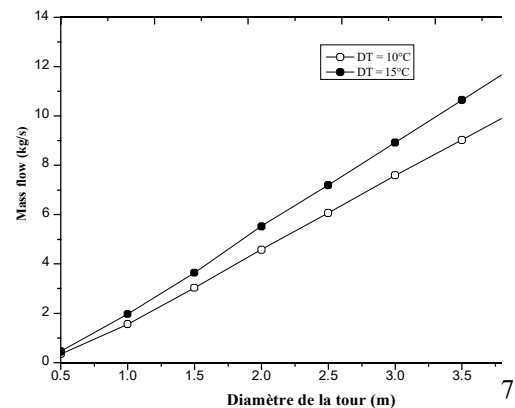


Figure 6 Débit massique vs le diamètre de la tour

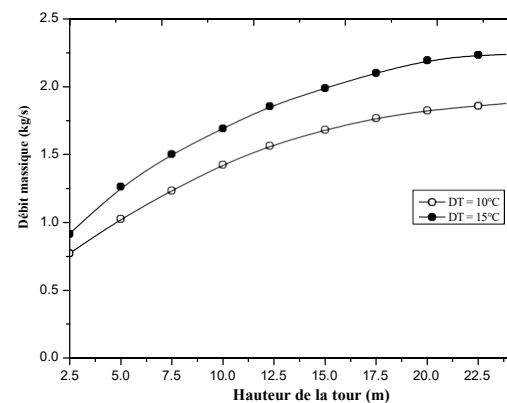


Figure 7 Débit massique vs le diamètre de la tour

Ainsi, il apparaît clairement que le rayon de la tour influe directement sur le champ hydrodynamique. D'un autre côté, la hauteur du collecteur influe directement sur le champ thermique et donc sur le champ hydrodynamique. Sauf que ces deux paramètres s'alignent favorablement dans l'augmentation de l'énergie cinétique via la vitesse moyenne produite par le système.

Il est ainsi jugé que les dimensions de la tour permettent le contrôle direct du champ hydrodynamique en contrôlant la vitesse, contrairement aux dimensions du collecteur, qui nous permis de contrôler directement le champs thermique et indirectement le champ hydrodynamique.

### V. CONCLUSIONS

Ce travail s'installe dans une série d'études sur l'influence des différents paramètres géométriques et météorologiques sur la qualité du champ thermo-hydrodynamique via le débit massique produit par les cheminées solaires. L'idée repose sur le fait que l'énergie cinétique générée est la mission fondamentale d'une cheminée solaire pour concevoir ce que nous sommes intéressés à connaître son évolution à travers l'évolution

du débit massique de l'écoulement ainsi que la vitesse dans les différents compartiments. Nous avons examiné l'influence des dimensions de la tour et du collecteur et nous sommes parvenus aux conclusions suivantes

Le champ hydrodynamique est fortement influencé par les dimensions de la tour en augmentant le débit massique produit. Cela nous permis un contrôle direct du champ hydrodynamique par le conditionnement de la distribution de vitesse. Les dimensions de la tour facilitent la circulation de l'air à travers le système en minimisant l'effet des forces de frottement et en favorisant l'effet thermosiphon, en augmentant le gradient de pression. Le diamètre de la tour semble le paramètre géométrique le plus importante en faisant augmenter continuellement le débit massique produit vs l'augmentation du rayon de la tour. Cependant l'augmentation de la hauteur de la tour accroît le débit mais jusqu'à une valeur asymptotique limite. Quoique, il est difficile de contrôler directement le champ hydrodynamique en faisant varier les dimensions du collecteur en particulier la hauteur de son toit puisque le débit massique chute de débit massique à une élévation du toit du collecteur donné.

Le diamètre du collecteur augmente le taux d'écoulement de masse à une valeur asymptotique. Sinon, la réduction de la vitesse moyenne de l'écoulement traversant le collecteur causée par l'élévation du toit du collecteur ou de son diamètre laisser suffisamment de temps pour l'air en écoulement de remuer le sol et donc intensifier l'échange thermique entre le sol et l'air, la hausse du gradient de température dans le collecteur. De ce fait, la commande du champ thermique est directement conditionnée par les dimensions du collecteur.

## Références

- [1] Cabanyes I., -Las chimeneas solares (Solar chimney)ll, 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] Haaf, W., Friedrich, K., Mayr, G., and Schlaich, J., Solar Chimneys, Part I: Principle and Construction of the Pilot Plant in Manzanares. Solar Energy, Vol.2, pp.3-20, 1983.
- [4] Haaf, W., Solar towers, Part II: Preliminary Test Results from the Manzanares Pilot Plant. Solar Energy, Vol. 2, pp. 141-161, 1984.
- [5] Schlaich J., Solar thermal electricity generation. Engineering Structures Int., Vol. 4, pp.76-81, 1994.
- [6] Gannon AJ, von BackströmTW. Solar chimney cycle analysis with system lossand solar collector performance. J. Solar Energy Eng.;122:133–7. 2000.
- [7] Bernardes MA dos S, Voss A, Weinrebe G. Thermal and technical analyzes of solar chimneys. Solar Energy; 75:511–24. 2003.
- [8] Pastohr H., Kornadt, O., Gürlebeck, K., Numerical and analytical calculations of the temperature and flow field in the upwind power plant Int. J. Energy Res. 28, 495–510. 2004.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] Maia CB, Ferreira AG, Valle RM, Cortez MFB. Theoretical evaluation of the influence of geometric parameters and materials on the behaviour of the airflow in a solar chimney. Comput. Fluid; 38:625–36. 2009.
- [13] Larbi S., Bouhdjar A. and Chergui T., \_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.
- [14] Chergui T., Larbi S. etBouhdjar A. Modelling and simulation of solar chimney power plant performances in southern region of Algeria. 4th International Conference on Modeling, Simulation and Applied Optimization (ICMSAO), 2011. Kuala Lumpur. IEEE Confrence Publications. 2011.
- [15] Chergui T., Larbi S. and Bouhdjar A., -Thermo-Hydrodynamic Aspect Analysis of Flows in Solar Chimney Power Plants - A Case Studyl, (RSER), Vol. 14, N°5, pp. 1410 – 1418, 2010.
- [16] Chergui T., Larbi S. and Bouhdjar A., \_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.
- [17] Chergui, T., Boualit, H., Bouhdjar, A., Larbi, S.Entropy Generation Analysis of the Solar Chimney Power Plant. World Renewable Energy Forum, WREF 2012. 13- 17 May 2012, Denver, Colorado, USA. 2012.
- [18] Cao, F., Li, H.S., Zhao, L., Bao, T.Y., Guo, L.J. Design and simulation of the solar chimney power plants with TRNSYS. Solar Energy 98, 23–33.2013.
- [19] Chergui T., M. Lebbi, Abd. H. Boualit, L. Boutina, A. Bouhdjar, S. Larbi. Analyse de l'effet de la Température Ambiante sur le champ Thermo-hydrodynamique des Cheminées Solaires.19-21-December.2014-CIER2014. À Monastir .Tunisie.
- [20] Lebbi M., Chergui T., Boualit H., Boutina I. Influence of geometric parameters on the hydrodynamics control of solar chimney. Int J Hydrogen Energy 39. 15246-15255. 2014.
- [21] Chergui T., Boualit Abd. H., Lebbi M., Boutina L., Improved Thermo-hydrodynamic Field Quality in the Solar Chimneys. Renewable Energy Congress (IREC), 2015 6th International. 24-26 March 2015. INSPEC 15144396-10.1109/IREC.2015.7110972-IEEE
- [22] Launder B.E., Spalding D.B. The numerical computation of turbulent flows. Comput. Methods Appl. Mech.; 3:269–89. 1974.
- [23] Chergui T., Etude des écoulements avec transfert de chaleur dans les centrales à cheminées solaires. Thèse de Doctorat. Ecole Nationale Polytechnique. Alger, Algérie. 2013.
- [24] 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.
- [25] Patankar S. V., Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Hemisphere Publishing Corporation, United States of America. 1980.
- [26] Thompson, J.F., Soni, B. K., Weatherhill, N. (Eds.), Handbook for Grid Generation, CRC Press, 1999.