

Modélisation d'une centrale à cheminée solaire en régime turbulent et avec stockage thermique.

Hakim SEMAI & Amor BOUHDJAR

Centre de Développement des Energies Renouvelables, CDER
BP 62 Route de l'Observatoire Bouzaréah, 16340 Alger, Algérie

h.semai@cder.dz
a.bouhdjar@cder.dz

Résumé : Le travail présenté, est consacré à l'étude de l'écoulement d'un fluide, sous l'effet de la convection naturelle, dans une centrale à cheminée solaire en écoulement turbulent et dans le cas d'un régime transitoire. L'étude est effectuée par simulation numérique à l'aide d'un code de CFD (Fluent) et ce pour deux types de configurations. Dans la première configuration, on ne prend que la partie sol (d'une profondeur égale à 5m), qui se trouve au-dessous du collecteur, comme système de stockage. Dans le deuxième cas, le système de stockage est composé du sol et d'un bac rempli d'eau, d'épaisseur 10 cm, couvrant toute la surface du collecteur. Les conditions aux limites seront définies selon les données météorologiques, disponibles sur le site d'Adrar, qui évoluent le long d'une journée type. Les Résultats obtenus nous ont permis de mettre l'accent sur l'influence du système de stockage sur les performances des centrales à cheminée solaire et sur la durée de leurs fonctionnement après le coucher du soleil et de déterminer l'emplacement adéquat des machines de conversion énergétique (turbine).

Mots clés : centrale à cheminée solaire, capteur solaire, stockage thermique, écoulement turbulent, écoulement instationnaire.

1. Introduction :

La centrale à cheminée solaire est un concept destiné à produire de l'électricité à grande échelle et à coût réduit. Les principaux composants de la centrale sont le collecteur solaire, la cheminée qui est placée au centre du collecteur et la turbine. Le collecteur est composé d'une couverture plastique de forme circulaire suspendue à une certaine hauteur du sol et d'un bac d'eau qui couvre toute la surface du sol en dessous de la couverture plastique, qui est à son tour couvert d'une couverture plastique. Le principe de fonctionnement consiste en de rayonnement solaire traversant la paroi transparente et chauffant la surface inférieure du collecteur (eau de stockage et sol) qui, à son tour, chauffe l'air à l'intérieur du collecteur. Ainsi les différences de masses volumiques résultantes des gradients de température vont donner naissance à un courant de convection. Ce qui permet au fluide de s'échapper à travers la cheminée. L'énergie cinétique du fluide sera convertie en énergie électrique via des aérogénérateurs placés juste à l'entrée de la cheminée. Un prototype expérimental a été réalisé et testé à Manzanares, Espagne, en 1980 [1]. Plusieurs travaux ont été effectués depuis, sur les centrales à cheminée solaire, des études à caractère expérimental réalisées pratiquement sur le prototype de Manzanares.

Kreetz [2] a présenté un modèle numérique pour déterminer l'apport du stockage thermique dans le collecteur. Ces résultats présentent l'utilité de prolonger le fonctionnement de la cheminée solaire en période nocturne en utilisant une énergie d'appoint.

Pretorius & al. [3] ont développé un modèle numérique simulant l'écoulement d'air dans une centrale à cheminée solaire à grande échelle, en indiquant qu'une augmentation de production d'énergie est possible, en optimisant la forme et la hauteur de la couverture du collecteur.

Tingzhen Ming & al. [4] ont effectué une analyse numérique sur les performances d'une centrale à cheminée solaire, identiques au prototype de Manzanares, qui est exposée à l'écoulement du vent avec des vitesses différentes. Les résultats ont montré que la vitesse du vent a une influence sur les performances de la centrale.

Pastohr & al. [5] ont modélisé le prototype de Manzanares, à l'aide d'un code CFD dans le but d'effectuer une analyse plus détaillée dans la description du mode de fonctionnement et la détermination du rendement du système. Ils confirment que la chute de pression à la turbine et le débit massique, éléments décisifs sur l'efficacité du système, ne peuvent être déterminés qu'avec l'accouplement de toutes les parties d'une centrale à cheminée solaire.

Dans notre travail on va modéliser l'écoulement qui s'effectue dans la centrale à cheminée solaire en considérant le régime de l'écoulement turbulent, transitoire et sous l'effet de la convection naturelle. Les conditions aux limites sont définies à partir des conditions météorologiques (irradiation solaire et température

ambiante), relatives au site d'Adrar (sud Algérien), présent sur une journée typique. Dans la figure (1) nous représentons le schéma représentatif d'une centrale à cheminée solaire.

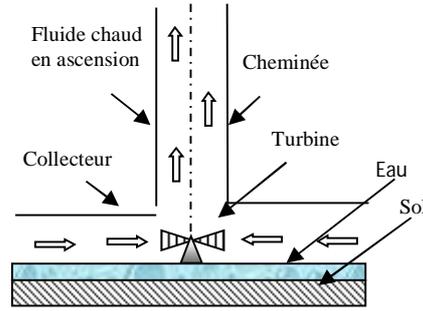


Figure 1: Schéma représentatif d'une centrale à cheminée solaire

2. Modèle mathématique

Le modèle mathématique élaboré est défini selon les hypothèses suivantes :

- L'écoulement est bidimensionnel et le système admet un axe de symétrie.
- L'air qui est le fluide de fonctionnement est supposé visqueux, newtonien et obéit à l'approximation de Boussinesq [6].
- Les propriétés du fluide sont supposées constantes.
- Pas de source de chaleur.

En tenant compte des hypothèses mentionnées précédemment, les équations qui régissent l'écoulement en régime transitoire et en coordonnées cartésiennes, s'écrivent comme suit :

- **Equation de continuité**

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i)}{\partial x_i} \quad (1)$$

- **Equations de quantité de mouvement**

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \left(\frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} \right) + \rho f \quad (f: \text{force de volume}) \quad (2)$$

- **Equation d'énergie**

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho c_p T) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j c_p T) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + T \beta \frac{\partial p}{\partial t} + \phi \quad (3)$$

avec :

$$\phi \square : \text{Source interne de dissipation d'énergie. } \phi = 2\mu \delta_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{2}{3} \mu (\nabla \cdot \mathbf{u})^2 \delta_{ij} \quad (4)$$

- **Les équations de transports pour le modèle standard K-ε :** Le modèle standard K-ε est un modèle semi empirique basé sur les équations de transports de l'énergie cinétique (K) et son taux de dissipation (ε) [7]. L'équation de transport de K est déduite à partir de l'équation exacte dans l'hypothèse que l'écoulement est totalement turbulent et l'effet de viscosité moléculaire est négligée. Les équations de l'énergie cinétique turbulente K et du taux de dissipation (ε), sont données par les relations suivantes :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho K) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho K u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial K}{\partial x_j} \right) + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{K} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{K} + S_\epsilon \quad (6)$$

G_k est l'énergie cinétique turbulente générée par le gradient des vitesses moyennes qui est évaluée, dans le cas de l'approximation de Boussinesq, par :

$$G_k = \mu_t S^2 \quad (7)$$

$$\text{Avec } S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} : \text{Le taux de déformation. } S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (8)$$

$$G_b \text{ est l'énergie cinétique turbulente générée par l'effet de gravitation. } G_b = \beta g_i \frac{\mu_t}{P_{rt}} \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad (9)$$

$$\text{avec: } \mu_t = \rho C_u \frac{K^2}{\epsilon} \text{ la viscosité turbulente.} \quad (10)$$

$P_{rt} = 0.85$ le nombre de Prandtl turbulent.

Y_M est le paramètre relatif à la dilatation volumétrique pour un fluide compressible.

$$C_{1\epsilon} = 1.44, C_{2\epsilon} = 1.92, C_u = 0.09, \sigma_k = 1, \sigma_\epsilon = 1.3, C_{3\epsilon} = \tan|V/U| \quad [8] \quad (11)$$

S_k et S_e sont les paramètres sources.

3. Calcul relatif à la cheminée

La tour qui se trouve placée juste au milieu du capteur solaire, qui est raccordée à la surface du collecteur avec une bonne étanchéité, sert à convertir l'énergie thermique collectée au niveau du collecteur solaire et acheminée par l'air vers la rentrée de la cheminée en énergie cinétique. La variation de la masse volumique de l'air due à l'élévation de la température dans le collecteur permet à l'air de s'élever à travers la cheminée. En appliquant l'équation de quantité de mouvement sur une section différentielle de la tour et on considérant que les pertes par frottements sont négligeables, du fait que, les parois de la cheminée ont un rapport surface-volume optimale, on obtient l'expression de la vitesse maximale qui est donnée comme suit :

$$w_{max} = \sqrt{2gH_{chem} \frac{\Delta T}{T_a}} \quad (12)$$

Où H_{chem} représente la hauteur de la tour. Ainsi, on remarque que le carré de la vitesse est proportionnel à la différence de température et à la hauteur de la tour. La puissance fournie par l'écoulement est donnée comme suit :

$$P_{tot} = \eta_{chem} P_u = \left(\frac{gH_{chem}}{T_a} \Delta T \rho_{coll} \right) V_{entree\ chem} A_{chem} \quad (13)$$

La différence de pression entre la base de la cheminée et sa sortie est donnée par :

$$\Delta p_{tot} = \rho_{coll} g H_{chem} \frac{\Delta T}{T_a} \quad (14)$$

La puissance électrique délivrée par le système de conversion est calculée par :

$$P_{elec} = \frac{2}{3} \left(\eta \frac{gH_{chem}}{c_p T_a} \right) A_{coll} I_g \quad (15)$$

4. Résultats et interprétation

En considérant les données météorologiques relatives au site d'Adrar, une simulation d'une centrale à cheminée solaire aux données géométriques, telles-que données dans le tableau 1, a été menée en se basant sur le modèle précédemment développé en régime transitoire. Les deux configurations mentionnées précédemment sont pris en considération. La périodicité de la simulation porte sur une journée du mois d'Aout. L'air à l'entrée du collecteur est supposé être à la température ambiante, avec une différence de pression nulle à l'entrée du collecteur et à la sortie de la cheminée. La température à 5m de profondeur du sol est constante, et elle prend une valeur de 300K. Les parois de la cheminée sont considérées adiabatiques. La partie supérieure du collecteur (la surface de captation) est une surface semi transparente avec un coefficient d'absorbance ($\tau\alpha$) égale à 0.64.

Tableau 1: Données géométriques de la centrale à cheminée solaire

Diamètre du collecteur	244 m
Diamètre de la cheminée	10 m
Distance entre l'absorbeur et la couverture	2 m
Epaisseur de l'eau de stockage	0.1 m
Hauteur de la tour	200 m

4.1 Champs de température :

La figure (2) montre l'évolution de la température moyenne à l'entrée du collecteur et qui représente ainsi la température ambiante évoluant le long d'une journée type. La température maximale enregistrée est de 318K et la valeur minimale obtenue est de 299K. Ces valeurs correspondent aux valeurs de la température ambiante enregistrées pour une journée du mois d'Aout au niveau du site d'Adrar (sud algérien).

La figure (3) nous donne l'évolution de la température moyenne obtenue au niveau de la sortie du collecteur. La température de l'air augmente au fur et à mesure que l'irradiation solaire augmente, pour atteindre une valeur maximale de l'ordre de 338K, dans la configuration simple, et 324K dans la deuxième configuration. La différence de température enregistrée dans ces deux configurations revient au fait que, pendant la période ensoleillée, une fraction assez importante de l'énergie solaire reçue va être emmagasinée dans l'eau de stockage, cette dernière est dotée d'une capacité thermique nettement supérieure à celle du sol. Ainsi, on obtient des températures inférieures, dans la centrale équipée de l'eau de stockage par rapport à celles obtenues dans l'installation simple. Cependant, durant la période sans présence de la source solaire (après le coucher et avant le lever du soleil) c'est l'inverse qui se produit, à savoir, les températures obtenues dans la deuxième configuration deviennent supérieures à celles obtenues dans la configuration simple. Cela, revient à la part d'énergie stockée

dans l'eau qui servira de système d'appoint afin de maintenir la température du fluide en écoulement relativement élevée, assez longtemps que possible, comparativement à la configuration non équipé de l'eau de stockage.

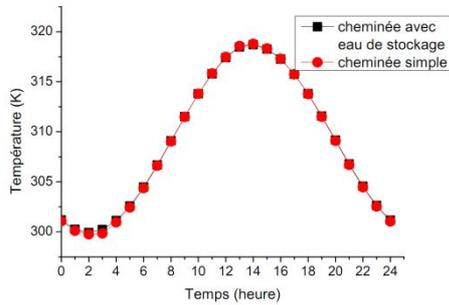


Figure 2 : température à l'entrée du collecteur

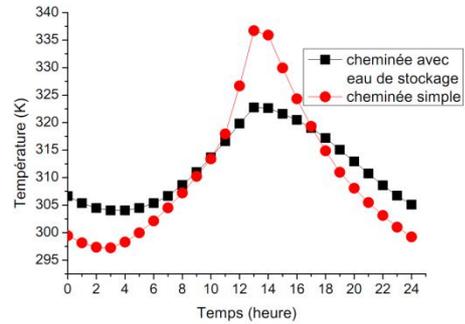


Figure 3 : température à la sortie du collecteur

4.2 Champs de vitesse :

La figure (2) montre l'évolution de la vitesse moyenne obtenue à la sortie du collecteur pour les deux configurations prises en compte. Les vitesses maximales sont obtenues au niveau de la centrale ayant comme système de stockage uniquement la partie sol. La valeur maximale atteinte est de l'ordre de 18 m/s et la valeur minimale obtenue est de 3 m/s. Par contre, dans la deuxième configuration, où la partie stockage est composée d'un bac d'eau et le sol, on obtient une évolution de la vitesse le long de ladite journée avec des variations ayant des amplitudes relativement faible comparativement à celles obtenues dans la première configuration. La valeur maximale obtenue est de l'ordre de 15 m/s et la valeur minimale est de 8 m/s.

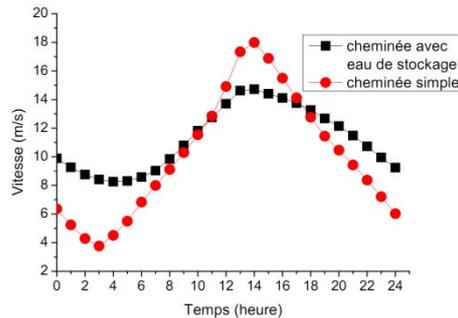


Figure 4 : vitesse moyenne de l'air à la sortie du collecteur

Dans la figure (5), nous traçons le profil de la puissance électrique journalière obtenue du système constitué du capteur solaire, de la cheminée et des aérogénérateurs. Nous constatons que la puissance électrique maximale générée par les aérogénérateurs dépasse les 200KW, dans le cas de la première configuration, des résultats assez concluants en se basant sur ceux obtenus par Salah Larbi et al. [9], où la puissance électrique pour le mois d'Aout atteint les 300KW. Et 120 KW, pour la deuxième configuration. Le système de stockage mis en place, composé de l'eau et de la partie sol correspondant à la deuxième configuration, permet à l'installation d'assurer un fonctionnement régulier, stable et pendant des périodes s'étalant bien au-delà du coucher du soleil.

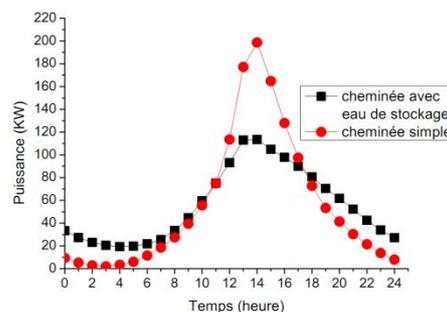


Figure 5 : puissance électrique journalière

5. Conclusion

Les résultats obtenus avec ce type de configuration c.-à-d. prévoir un système de stockage dans la centrale à cheminée solaire permet à l'installation de fonctionner pendant plusieurs heures après le coucher du soleil considéré comme l'unique source alimentant le système. Les vitesses atteignent leurs maximums, juste à l'entrée de la cheminée, l'endroit approprié à l'emplacement des turbines pour extraire le maximum d'énergie du fluide en mouvement.

Comparativement aux mesures obtenues sur le prototype de Manzanares, on remarque une différence dans l'ordre de grandeurs sur les vitesses et la puissance délivrée. Cela revient au caractère idéal supposé dans notre simulation, des paramètres thermo- physiques du fluide et du fait que le gisement solaire disponible sur le site d'Adrar est d'autant plus important que celui de Manzanares.

Nomenclature

Symbole

A	surface du collecteur, m^2
Cp	chaleur spécifique à pression constante, $KJ.Kg^{-1}K^{-1}$
g	accélération de la pesanteur, $m.s^{-2}$
I	irradiation solaire, $W.m^{-2}$
K	énergie cinétique de la turbulence, $J.Kg^{-1}.m.s^{-2}$
L	longueur caractéristique, m
P	pression, Pa
Pr	nombre de Prandtl
Ra	nombre de Rayleigh
S	terme source
T	température, K
t	temps, s
u, v, w	composantes de vitesse, $m.s^{-1}$
u*	vitesse de frottement, $m.s^{-1}$
u'	fluctuation de vitesse, $m.s^{-1}$
x, y, z	variables indépendantes, m
Z ₀	paramètre de rugosité, m

Symboles grecs

λ	conductivité thermique, $W.m^{-1}.K^{-1}$
α	diffusivité thermique, $m^2.s^{-1}$
ε	taux de dissipation de la turbulence, $m^2.s^{-3}$
μ	viscosité dynamique, $Kg.m^{-1}.s^{-1}$
β	coefficient de dilatation volumique, K^{-1}
\emptyset	source interne de dissipation d'énergie, w
ρ	masse volumique, $Kg.m^{-3}$
δ_{ij}	symbole de Kronecker
ΔP	chute de pression dans la cheminée, Pa

Exposant, Indices

a	ambiante
chem	cheminée
elec	électrique
g	globale
max	maximale
Tot	totale

References

- [1] W. Haaf, K. Friederich, G. Mayer and J. Schlaich, Solar chimneys, Part I: Principe and construction of the construction of the pilot plant in Manzanares, Sol. Energy, 2, pp. 3-20, 1983.
- [2] Kreetz, H., Theoretische Untersuchungen und Auslegung eines tempor, Diplomarbeit TU Berlin, Berlin, 1997.
- [3] J. P. Pretorius, D.G. Kröger, Critical evaluation of solar chimney power plant performance, Solar Energy; 80: 535–544. 2006.
- [4] M. Tingzhen, W. Xinjiang, K. Kiesgen de Richter, L. Wei, W. Tianhua, P. Yuan, Numerical analysis on the influence of ambient crosswind on the performance of solar updraft power plant system. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16: 5567–5583, 2012.
- [5] H. Pastohr, O. Kornadt, K. Gürlebeck, Numerical and analytical calculations of the temperature and flow field in the upwind power plant. Int. J. Energy Research. Vol. 28, pp. 495–510, 2004.
- [6] Bouhdjar A., Phénomène de stratification dans une cuve de stockage thermique –Etude paramétrique-. Thèse de Doctorat d'état. Université de Tlemcen, Tlemcen Algérie. 2005.
- [7] B. E. Launder and D. B. Spalding, Lectures in Mathematical Models of turbulence. Academic Press, London, England, 1972.
- [8] R. M. Henkes, F. Van der Flugt, and C. Hoogendoorn, Natural convection flow in a square cavity calculated with low-Reynolds-Number turbulente model. Int. J. Heat Transfert, 34: 1543-1557, 1991.
- [9] 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, 14:470-477, 2010.