

## INFLUENCE DES REGIMES D'ÉCOULEMENTS SUR LES PERFORMANCES ÉNERGETIQUES DES CHEMINÉES SOLAIRES

T. Chergui<sup>1</sup>, M. Gahgah<sup>1</sup>, S. Larbi<sup>2\*</sup>, A. Bouhdjar<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Unité de Recherche sur les Energies Renouvelables, Adrar. Algérie

<sup>2</sup>Laboratoire Génie Mécanique et Développement. Ecole Nationale Polytechnique, Alger

<sup>3</sup>Centre de Recherche sur les Energies Renouvelables, Bouzariah, Alger

\*E-mail : larbisalah@yahoo.fr, Fax : 213 21 52 29 73

### RESUME

Le travail présenté dans cet article est relatif à une modélisation d'écoulements dans les cheminées solaires. Il consiste en une modélisation bidimensionnelle d'un problème de convection naturelle en régime laminaire utilisant une géométrie semblable à celle d'une cheminée solaire réelle, pour la prédiction du comportement thermo-hydrodynamique du mouvement d'air, à travers un système axisymétrique avec des conditions aux limites bien définies. Le champ de vitesses et de températures dans le système a été déterminé à travers la résolution, par la méthode des volumes finis, des équations de la dynamique des fluides. Le code de calcul ainsi développé, dont les résultats ont été validés à ceux obtenus expérimentalement sur le site de Manzanares (Espagne), pourra constituer un outil préliminaire de prévision des phénomènes physiques, ayant lieu dans les cheminées solaires, avant la phase même de réalisation.

### NOMENCLATURE

$C_p$	Chaleur spécifique de l'air	(J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )	<b>Symboles grecques</b>	
R	Rayon du collecteur	(m)	$\rho$	Masse volumique (kg.m <sup>-3</sup> )
e	Hauteur moyenne de la couverture	(m)	$\mu$	Viscosité dynamique (kg.m <sup>-1</sup> .s <sup>-1</sup> )
k	Conductivité thermique de l'air	(W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )		
H	Hauteur de la cheminée	(m)	<b>Indices et exposants</b>	
p	Pression	(Pa)	e	Entrée
t	Temps	(s)	c	Chaud
T	Température	(K)	f	Froid
u, v	Composantes du vecteur vitesse	(m.s <sup>-1</sup> )	sl	Sol
r, y	Coordonnées d'espace	(m)	col	Collecteur
Pr	Nombre de Prandtl		elec	Electrique
Gr	Nombre de Grashof		tur	Turbine

### 1. INTRODUCTION

L'adoption d'une source d'énergie au détriment d'une autre est tributaire de la disponibilité et de la constance d'un potentiel énergétique par rapport à un autre. Le développement de procédés, tels que les centrales cheminées solaires (CCS), pour améliorer les performances des rotors des turbines éoliennes au sud donne un regain d'intérêt particulier, au sein de la communauté scientifique, aux organismes concernés par les problèmes d'énergie et enfin au simple consommateur, notamment ces dernières décennies avec la flambée du baril du pétrole et la menace qui pèse sur la durée de vie des combustibles fossiles. Selon les estimations économiques moyennes de Haaf et al. [1], une centrale (CCS) peut produire en moyenne 300 GWh/an avec un capteur à air en verre et le coût de la puissance générée est moins de 0.2 \$/kWh pour un amortissement sur 20 ans, avec un coût de maintenance de 2.5 % et une inflation de 5%. Cependant, d'autres facteurs importants tels que le champ de vitesse et la distribution des températures dans la cheminée restent aussi bien nécessaires pour la spécificité du domaine d'application et la conception d'un système (CCS) fonctionnel. Notons que les recherches se concentrent essentiellement sur l'évaluation des

performances énergétiques globales de ces systèmes [1-6], la littérature disponible sur l'aspect thermo- hydrodynamique des écoulements dans les cheminées solaires est rare [7- 9].

Une centrale cheminée solaire typique est composée d'un capteur solaire, d'une tour de cheminée assurant la circulation d'air par gradient de densité et d'un aérogénérateur pour produire l'énergie électrique (voir figure 1).

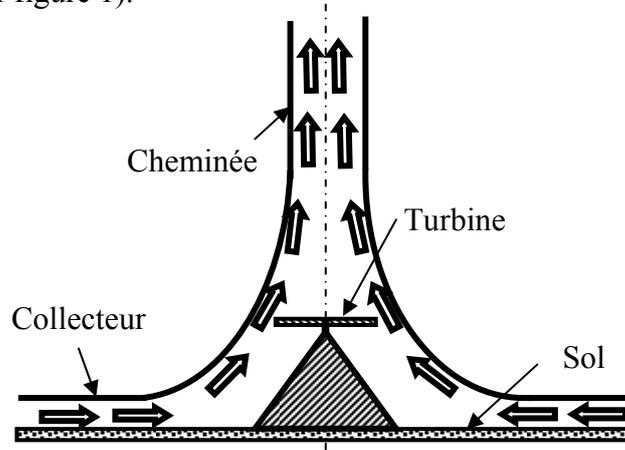


Figure 1. Représentation schématique d'une Cheminée Solaire.

L'objectif principal de cette étude consiste en une analyse d'un problème de convection naturelle en régime laminaire, dans une géométrie semblable à celle d'une centrale cheminée solaire. Le champ de vitesse et la distribution de températures dans le système sont déterminés à travers la résolution des équations de Navier et Stokes et de l'équation de conservation d'énergie, par utilisation de la méthode des volumes finis moyennant des hypothèses préétablies. Le code de calcul ainsi développé, dont les résultats ont été validés avec ceux obtenus expérimentalement sur le site de Manzanares (Espagne), pourra constituer un outil préliminaire de prévision des phénomènes physiques, ayant lieu dans les cheminées solaires, avant la phase même de réalisation.

## 2. MODELISATION MATHÉMATIQUE ET CONDITIONS AUX LIMITES

### 2. 1. Modèle Mathématique

Le modèle mathématique utilisé est établi en considérant que l'écoulement est laminaire, bidimensionnel et à symétrie axiale; le fluide est supposé visqueux, Newtonien, à propriétés physiques constantes et obéissant aux approximations de Boussinesq ; les dissipations visqueuses sont négligeables. Les équations gouvernantes sont basées sur les équations de bilans de masse, de quantité de mouvement et d'énergie. En coordonnées cylindriques, elles sont données par :

- pour l'équation de conservation de la masse :

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

- pour l'équation de quantité de mouvement suivant r :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\rho r u^2) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho u v) = -\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \mu \frac{\partial u}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) - \mu \frac{u}{r^2} \quad (2)$$

- pour l'équation de quantité de mouvement suivant y :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\rho r u v) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v^2) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \mu \frac{\partial v}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) + (\rho_0 - \rho)g \quad (3)$$

- pour l'équation d'énergie :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho T) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\rho r u T) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v T) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{k}{c_p} \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{k}{c_p} \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (4)$$

Désignons par  $H$  une dimension linéaire caractéristique, par  $Vr$  une vitesse de référence, par  $H/Vr$  un temps de référence et enfin par  $\Delta T$  l'écart de température de référence. Les variables réduites sont alors données par :

$$x^+ = \frac{x}{H}, \quad y^+ = \frac{y}{H}, \quad t^+ = \frac{t Vr}{H}, \quad u^+ = \frac{u}{Vr}, \quad v^+ = \frac{v}{Vr}, \quad T^+ = \frac{T - T_F}{\Delta T}, \quad p^+ = \frac{p}{\rho Vr^2}, \quad \Delta T = T_C - T_F \quad (5)$$

L'équation réduite écrite sous une forme condensée est alors:

$$\frac{\partial}{\partial t^+}(\phi^+) + \frac{1}{r^+} \frac{\partial}{\partial r^+}(r^+ u^+ \phi^+) + \frac{\partial}{\partial y^+}(v^+ \phi^+) = \Gamma_{\phi^+} \left[ \frac{1}{r^+} \frac{\partial}{\partial r^+} \left( r^+ \frac{\partial \phi^+}{\partial r^+} \right) \right] + \Gamma_{\phi^+} \left[ \frac{\partial^2 \phi^+}{\partial y^{+2}} \right] + S_{\phi^+} \quad (6)$$

Le tableau 1 ci- dessous donne la correspondance entre équations de bilans de conservation.

Tableau 1. Expressions de  $\Gamma_{\phi^+}$  et  $S_{\phi^+}$

Equation	$\phi^+$	$\Gamma_{\phi^+}$	Terme source $S_{\phi^+}$
Bilan de masse	1	0	0
Bilan de quantité de mouvement suivant r	$u^+$	$\frac{1}{Gr^{0.5}}$	$-\frac{\partial p}{\partial r} - \frac{u}{r^2} \Gamma_{\phi}$
Bilan de quantité de mouvement suivant y	$v^+$	$\frac{1}{Gr^{0.5}}$	$-\frac{\partial p}{\partial y} + (\rho_0 - \rho)g$
Bilan d'énergie	$T^+$	$\frac{1}{Gr^{0.5} Pr}$	0

## 2.2. Modèle Physique et Conditions aux limites

Le modèle physique et les conditions aux limites correspondantes sont donnés par la figure 2 ci- dessous.

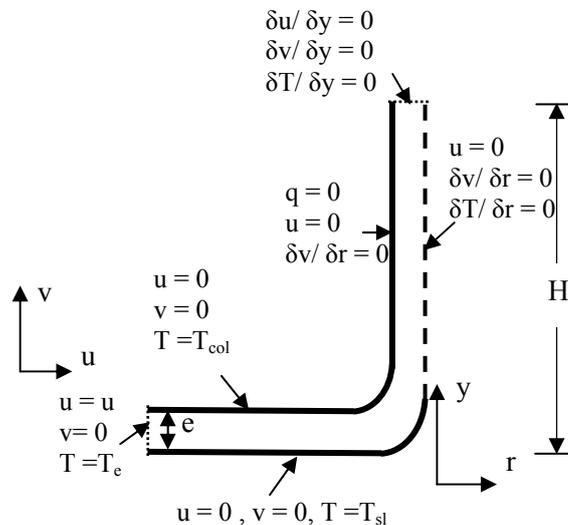


Figure 2. Modèle physique et conditions aux limites utilisées.

### 3. RESOLUTION NUMERIQUE

La méthode des volumes finis en coordonnées généralisées a été utilisée. Deux algorithmes principaux sont utilisés pour résoudre les équations de transport : un algorithme pour la génération des coordonnées du système (génération de maillage), et l'autre pour la solution du système physique [10].

### 4. RESULTATS ET DISCUSSIONS

L'analyse des performances énergétiques d'une centrale cheminée solaire est basée sur le modèle mathématique développé dans la référence [1]. Le tableau 2, ci-dessous, est relatif aux données techniques de la Centrale Cheminée Solaire de Manzanarès [2], les paramètres utilisés par la suite, dans l'analyse des performances du système, sont mentionnés dans ce tableau.

Tableau 2. Données techniques du prototype de Manzanarès [2]

Hauteur de la tour	195.6 m
Rayon de la tour	5.08 m
Rayon moyen du collecteur	122 m
La hauteur du collecteur	1.85 m
Nombre de pales de la turbine	4
Profile de des pales de la turbine	FX W-151-A
Augmentation de température dans le collecteur	$\Delta T = 20 \text{ K}$
Puissance produite	50 KW
Couverture en plastique	4000 m <sup>2</sup>
Couverture en vitrage	6000 m <sup>2</sup>

Le tableau 3 ci-dessous est relatif aux résultats de calcul de la puissance générée en fonction du nombre de Rayleigh, pour des dimensions données de la CCS et pour un gradient de température ( $\Delta T$ ) fixé

Tableau 3. Puissance développée en fonction des dimensions de la CCS et du nombre de Rayleigh, Ra.

		$P_{tur}(W)$	$P_{elec}(W)$
Ra=10 <sup>6</sup>		0.4788	0.4070
H	4 m		
R	2 m		
e	0.04 m		
Ra=10 <sup>7</sup>		3.83	3.256
H	8 m		
R	4 m		
e	0.08 m		
Ra=10 <sup>8</sup>		43.63	37.09
H	18 m		
R	9 m		
e	0.18 m		
Ra=10 <sup>9</sup>		3830	3256
H	80 m		
R	40 m		
e	0.4 m		
Ra=10 <sup>11</sup>		0.8667 10 <sup>5</sup>	0.4721 10 <sup>5</sup>
H	194.6 m		
R	122 m		
e	1.85 m		

La puissance délivrée, obtenue par notre code de calcul, appliqué au prototype de Manzanares est de : 47.21 kW pour un éclairement de 1000 W/m<sup>2</sup> et un gradient de température  $\Delta T = 20$  K. Le prototype installé par J. Schlaich à Manzanares développe une puissance de 50 kW pour le même éclairement et le même gradient de température  $\Delta T$  [2]. L'écart type entre les puissances, calculée et mesurée, est de 5.58% ; la différence est due, à notre sens, aux hypothèses simplificatrices, principalement à l'hypothèse qui consiste à considérer que le régime d'écoulement est stationnaire et que les propriétés thermophysiques sont constantes.

La figure 3, ci- dessous, montre la variation de la puissance électrique produite et la vitesse générée pour un rayonnement solaire donné sur le site de Manzanares [2]. On note que, la puissance maximale :  $P_{max} \approx 50$  kW et la vitesse maximale,  $V_{max} \approx 7$  m/s.

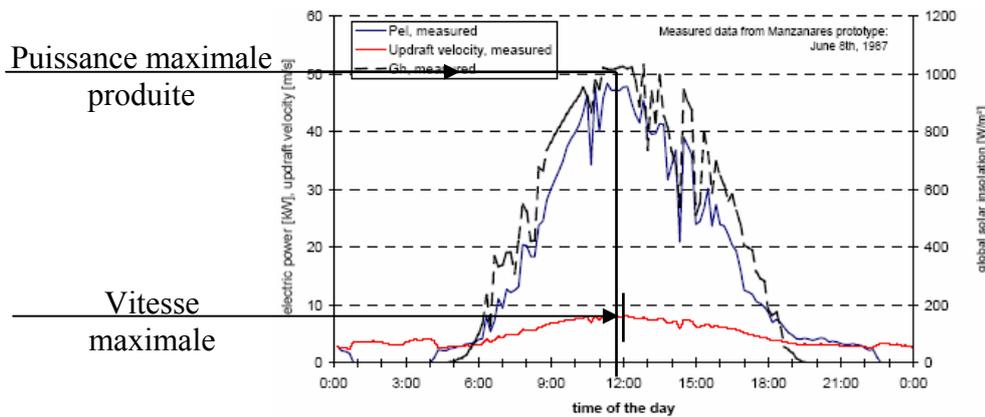


Figure 3. Variation de la puissance et de la vitesse pour une journée type sur le prototype de Manzanares [2].

Les résultats issus de la simulation numérique sont représentés sur les figures 4 et 5. La figure 4 montre les lignes d'iso- vitesses adimensionnelles où l'on peut noter que le maximum de vitesse est située à l'entrée de la tour, à l'ordonnée  $y^* = 0.15$ . La figure 5, quant à elle, donne les distributions d'isothermes dans le collecteur, ces distributions montrent que le maximum de température se situe sur la partie basse du collecteur.

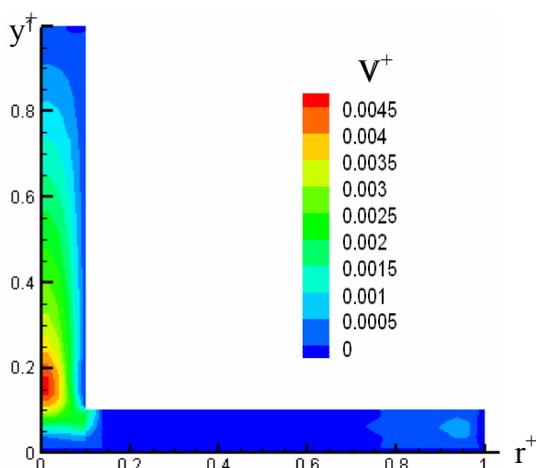


Figure 4. Iso- vitesses adimensionnelles dans la cheminée. Pour :  $e/H=0.1$

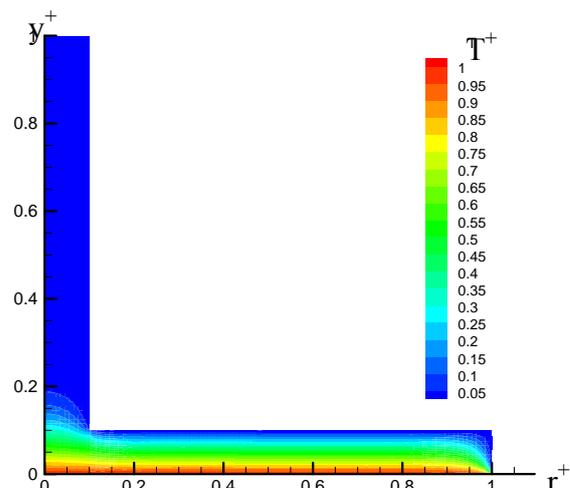


Figure 5. Isothermes adimensionnelles dans le collecteur pour :  $e/H=0.1$ .

## 5. CONCLUSION

L'étude présentée dans le cadre de ce travail est relative à une analyse d'écoulements et de performances énergétiques d'une centrale de production d'énergie électrique, de type cheminée solaire. Les résultats présentés sont relatifs à la détermination des performances énergétiques de la centrale chiminée solaire et à la détermination des caractéristiques locales de l'écoulement, telles que les piques et les zones de re-circulation, dans le but d'identifier les phénomènes locaux qui apparaissent dans certaines zones de la cheminée, afin de déterminer la position adéquate à l'emplacement des turbines éoliennes. Le code de calcul ainsi développé, dont les résultats ont été validés avec ceux obtenus expérimentalement sur le site de Manzanares (Espagne), pourra constituer un outil préliminaire de prévision des phénomènes physiques, ayant lieu dans les cheminées solaires, avant la phase même de réalisation.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] W. Haaf, K. Friedrich, G. Mayr, and J. Schlaich, 1983, Solar Chimneys, Part I: Principle and Construction of the Pilot Plant in Manzanares. *Solar Energy*, Vol.2, pp. 3-20.
- [2] W. Haaf, 1984, Solar towers, Part II: Preliminary Test Results from the Manzanares Pilot Plant. *Solar Energy*, Vol. 2, pp.141-161.
- [3] L. B. Mullet, 1987, The solar chimney overall efficiency, design and performance. *Int. J. Ambient Energy*, Vol. 8, pp. 35-40.
- [4] Y. Dai, H. B. Huang, R. Z. Wang, 2003, Case study of Solar Chimney Power Plants in North western Regions of China. *Renewable Energy*, Vol. 28, pp. 1295-1304.
- [5] J. P. Pretorius, D. G. Kröger, 2006, Critical evaluation of solar chimney power plant performance. *Solar Energy*, Vol. 80, 535-544.
- [6] A. J. Gannon, T. W. Von Backström, 2000, Solar chimney cycle analysis with system loss and solar collector performance. *Journal of Solar Energy Engineering*, Vol. 3, pp. 133-137.
- [7] M. Padki, S. A. Sherif, 1999, On a Simple Analytical Model for Solar Chimneys. *International Journal of Energy Research.*, Vol. 23, pp. 345-349.
- [8] M. A. Bernardes, S. Dos, R. M. Valle, M. F. B. Cortez, 1999, Numerical analysis of natural laminar convection in a radial solar heater. *International Journal of Thermal Science*, Vol. 38, pp. 42-50.
- [9] T. W., Von Backström, A. J.Gannon, 2000, Compressible flow through solar power plant chimneys. *ASME, Journal of Solar Energy Engineering*, Vol.122, pp.138-45.
- [10] S. V. Patankar, 1988, Computation Conduct and Duct Flow Heat Transfer. *Hemisphere Publishing Corporation*, 1<sup>st</sup> Edition, New York.