

Étude expérimentale de l'écoulement de l'air en convection naturelle dans une tour solaire

Wende Pouire Germain OUEDRAOGO*, Sié KAM, Boukaré OUEDRAOGO et D. Joseph BATHIEBO

Laboratoire d'Energies Thermiques Renouvelables(LETRE), Département de physique, Unité de Formation de Recherche en Sciences Exactes et Appliquées (UFR - SEA), Université Ouaga I Professeur Joseph KI-ZERBO, 03 BP 7021 Ouagadougou 03, Burkina Faso

* Correspondance, courriel : wenpoui@yahoo.fr

Résumé

Ce travail présente l'étude des écoulements de l'air dans une tour solaire, sous l'effet de la convection naturelle. C'est une étude expérimentale dont le but est la compréhension du phénomène de convection naturelle du fluide caloporteur dans la tour, à l'aide d'une maquette dont les dimensions sont précisées dans la suite. Ainsi cet article examine le comportement thermique de l'air au sein du collecteur et de la cheminée, c'est-à-dire les différentes températures et vitesses de l'air en fonction de la radiation solaire du jour. Ensuite une étude comparative est faite entre les vitesses de l'air calculées et celles mesurées.

Mots-clés : *tour solaire ou centrale à cheminée solaire, convection naturelle, fluide caloporteur, collecteur, cheminée.*

Abstract

Experimental study of the flow of air in natural convection in a solar tower

This work presents the study of air flows in a solar tower, under the effect of natural convection. This is an experiment whose purpose is the understanding of natural convection heat transfer fluid in the tower, using a model whose dimensions are specified in the following. Thus, this article discusses the thermal behavior of air in the collector and the chimney, that is to say the different temperatures and air velocities as a function of solar radiation of the day. Then a comparison is made between the calculated air speed and the measured.

Keywords : *solar Tower or solar chimney power plant, natural convection, heat transfer fluid, collector, chimney.*

Nomenclatures

Symboles

A : surface m^2
 C_p : chaleur spécifique à pression constante
 $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
 dx : longueur variable

Symboles grecs

λ : Conductivité thermique $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \text{K}^{-1}$
 τ : Transmittivité
 ε : Emissivité

\vec{F} : Force de la poussée d'Archimède N	ρ : Masse volumique de l'air $kg \cdot m^{-3}$
g : accélération de la pesanteur $m \cdot s^{-2}$	σ : Constante de Stefan Boltzmann $W \cdot m^{-2} K^{-4}$
q : Irradiation solaire $W \cdot m^{-2}$	β : Coefficient d'expansion thermique K^{-1}
l : longueur m	Indices
H : hauteur m	a : ambiant
h : coefficient d'échange thermique $W \cdot m^{-2}$	abs : absorbeur
\dot{m} : Débit massique $kg \cdot s^{-1}$	f : fluide (air)
R : rayon du collecteur m	fc : fluide dans la cheminée
P : pression Pa	H : hauteur
Nu : Nombre de Nusselt	srv : sur la vitre
T : température K	ssv : sous la vitre
dv : volume infinitésimal d'air	s : sommet de la cheminée
V : vitesse $m \cdot s^{-1}$	v : vitre
x : abscisse	0 : initial

1. Introduction

La tour solaire ou cheminée solaire est une installation solaire de production d'énergie électrique qui utilise le rayonnement solaire pour accroître l'énergie interne de l'air entrant dans le système. L'énergie solaire reçue par l'air à travers le collecteur va être transformée en énergie cinétique puis en électricité par le biais d'une turbine adéquate. La tour solaire est adaptée aux pays à fortes radiations solaires ou ensoleillement. Elle est composée de trois grandes parties à savoir le collecteur, la cheminée et la turbine. Le collecteur est la partie où entre l'air ambiant pour recevoir le rayonnement solaire et acquérir l'énergie cinétique qui lui permettra de produire de l'électricité. Il est constitué du sol et recouvert par de la matière transparente (verres ou matières plastiques) situé à quelques mètres du sol. Sa surface peut atteindre des dizaines de kilomètres carrés. L'air chauffé à travers ce collecteur se dirige vers la cheminée placée au centre du collecteur. Une turbine horizontale placée dans la cheminée va être actionnée par l'écoulement de l'air chaud pour produire de l'énergie mécanique ensuite convertie en énergie électrique. Ce dispositif peut fonctionner pendant la nuit à condition qu'il soit équipé d'un dispositif de stockage d'énergie solaire qui par convection assurera le fonctionnement du système. La compréhension du phénomène de convection naturelle mise en œuvre dans la tour solaire, nous amène à faire un bilan énergétique du collecteur, à déterminer les températures et les vitesses d'écoulement de l'air. La tour considérée est une maquette réalisée au sein de notre laboratoire.

2. Méthodologie

2-1. Présentation du contexte

Le concept de la tour solaire ou centrale à cheminée solaire a été proposé pour la première fois par [1] et ensuite décrite dans une publication par [2]. Depuis 1975, plusieurs brevets ont été accordés à [3] en Australie, au Canada, en Israël et aux États-Unis. L'ingénieur et chercheur de nationalité allemande Jörg Schlaich a également présenté cette technologie dans un congrès en 1978 [4], pour concevoir et construire, par la suite, avec ses équipiers le premier prototype d'une tour solaire à Manzanares en Espagne entre 1981 et 1982. Il fonctionna jusqu'à son arrêt en 1989 car le coût du kilowatt-heure n'était pas compétitif (cinq fois plus élevé

qu'une centrale thermique classique). Cette tour solaire de 195 mètres de haut, dont la surface de la serre au pied de la cheminée mesure près de 46000 m² a pu fournir une puissance maximale de 50 kW avec une turbine à rotor unique à quatre pales, orientée verticalement et installée à la base de la tour [5]. Après cette réalisation, des études analytiques, numériques et expérimentales ont été réalisées par des chercheurs, pour mieux comprendre le fonctionnement d'une tour solaire. De ce projet, plusieurs projets à grandes échelles ont été annoncés par quelques pays. Ainsi le Directeur Général de Hahn & Hahn, Alan Dunlop a annoncé en 2008 que le projet Namibien avait été approuvé par le gouvernement Namibien dont le coût total prévoit un (1) milliard de dollars. Ce projet baptisé Green-tower aura une cheminée de 1,5 km de hauteur et 280 mètres de diamètre et un collecteur de 38,5 km² pour produire une puissance électrique de 400 MW [6]. Le projet Espagnol localisé dans la Province de Ciudad Real a une cheminée de 750 m de haut, un collecteur de 3 km de diamètre, couvrant 350 hectares, dont 250 hectares pourraient être utilisés pour la culture de légumes sous serre. La vitesse de l'air dans la cheminée estimée à 43 km / h soit 12,5 m / s pour une puissance d'installation de 40 MW, soit la demande en électricité d'environ 120 000 personnes. Le coût du projet est estimé à 240 millions d'euros [7]. Le gouvernement Australien approuve la construction d'une tour solaire d'environ 1km de hauteur sur un diamètre de 70 mètres pour une serre de 7 km de diamètre. Elle produira 200 MW d'électricité destiné à approvisionner 200000 logements. Son coût avoisine 400 millions d'euros. La Chine a également commencé en 2009 la construction d'une tour solaire de puissance 27,5 MW dont le coût estimé à 160 millions d'euros [8]. Des projets similaires sont prévus dans plusieurs pays en fonction de l'objectif fixé par leur gouvernement pour les énergies renouvelable. Ce sont les Etats unis, la Chili, l'Inde, etc. Mais actuellement aucun de ces projets n'a encore vu le jour dû à leur coût élevé.

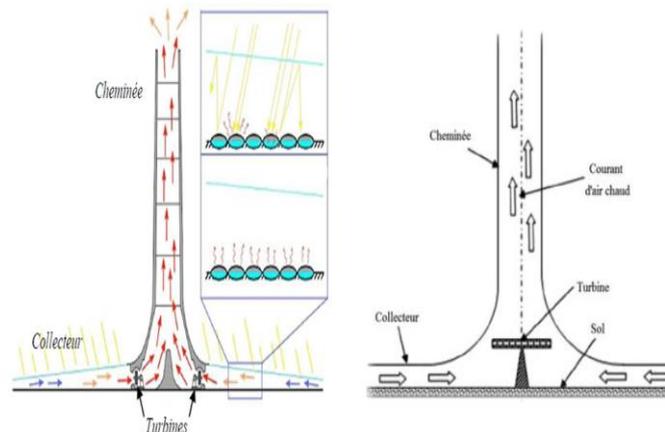


Figure 1 : Modèle de tours solaires [5 - 9]

2-2. Description de notre maquette de tour solaire

La tour solaire soumise à notre étude est une maquette réalisée dans le laboratoire LETRE de l'université de Ouagadougou. Elle est constituée de deux éléments principaux sur trois, à savoir le collecteur et la cheminée. Le troisième étant la turbine n'y est pas, du fait que l'objectif principal est la compréhension du phénomène de l'écoulement de l'air en convection naturelle au sein du dispositif et faire des expérimentations afin d'améliorer le modèle. Le collecteur de la tour est composé de toiture en verre recouvrant une surface absorbante en tôle (généralement l'absorbeur est le sol dans les projets ou prototypes au lieu d'une tôle). En effet, pour permettre la pénétration d'air dans le collecteur, des ouvertures de 2 cm de hauteur ont été réalisées. L'absorbeur est une tôle en aluminium-zinc, d'épaisseur 0,35 mm, peint en noir mat et isolé par des polystyrènes d'épaisseur 20 mm à sa surface inférieure. La toiture du collecteur est recouverte par quatre

(04) vitres d'un mètre carré de surface et de 5 mm d'épaisseur. Ainsi le collecteur a une surface totale d'environ 4 m², une hauteur de 8,5 cm à l'entrée et une hauteur de 13.5 cm à sa sortie du collecteur. La cheminée de notre maquette a une hauteur de 3 m et un diamètre de 20 cm, détachable à chaque 1 m.

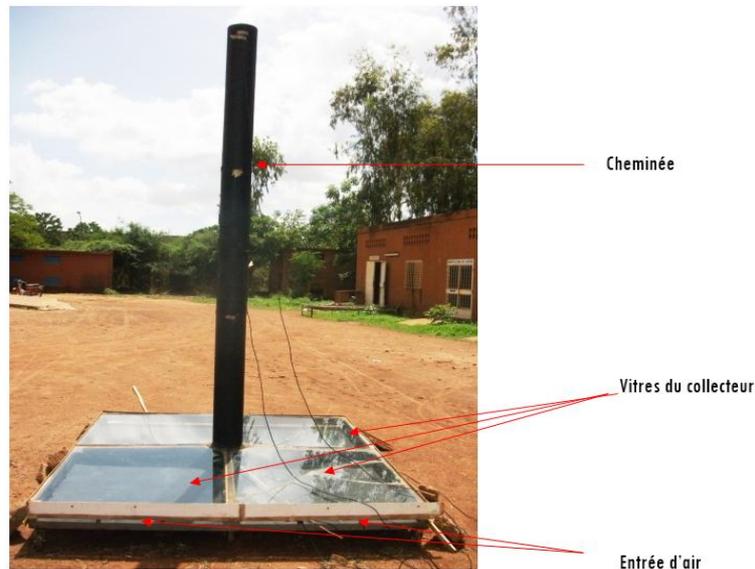


Figure 2 : La maquette de la tour solaire

2-3. Étude fondamentale

La théorie sur le phénomène d'écoulement par convection naturelle est un mécanisme particulièrement important pour l'échange d'énergie et de la masse, entre l'air inclus dans la tour et l'extérieur. En général pour chaque problème de convection, il faudrait résoudre un système d'équation très complexe, comportant une équation de continuité, trois équations du mouvement (Navier - Stokes) et une équation de l'énergie. Ainsi nous ferons un résumé théorique pour déduire le bilan thermique de la tour et la vitesse de l'air à la sortie de la cheminée.

2-3-1. Bilan thermique

La **Figure 3** ci-dessous est une partie du collecteur vue dans le plan.

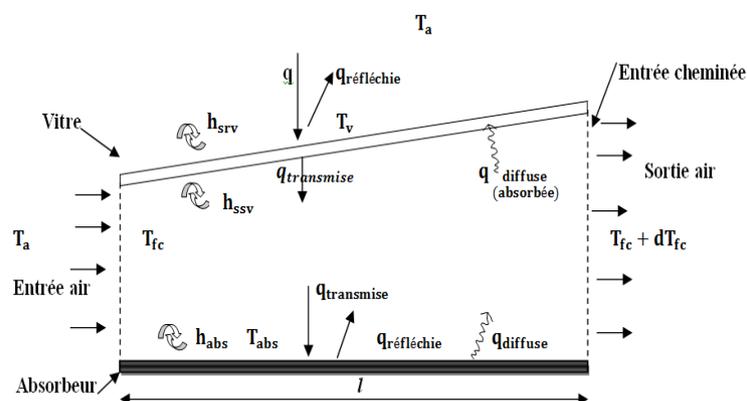


Figure 3 : Comportement thermique du collecteur

2-3-1-1. *Évolution de la température de l'air dans le collecteur*

Une analyse plus simple du collecteur est évidente en supposant que tout le rayonnement solaire incident est utilisé pour chauffer l'air du collecteur. Ce qui donne un aperçu du couplage entre le débit massique et l'élévation de la température d'après ***l'Équation*** suivant [10].

$$q = \dot{m}C_p\Delta T \tag{1}$$

$$\text{où, } \dot{m} = \rho vA$$

En réalité, seule une partie de ce rayonnement incident est absorbée et l'autre perdue dans l'atmosphère. L'air est chauffé par convection lors de son déplacement dans le collecteur. Ainsi la montée en température de l'air dans le collecteur, se déplaçant à travers son volume est donnée par ***l'Équation*** différentielle en fonction de la forme rectangulaire du collecteur:

$$\frac{dT_{fc}}{dx} = \frac{l}{\dot{m}C_p} (h_{abs}(T_{fc} - T_{abs}) + h_{ssv}(T_{fc} - T_v)) \tag{2}$$

Par intégration de ***l'Équation (2)***, nous obtenons la température du fluide (l'air) en fonction de la longueur du collecteur :

$$T_{fc}(X) = \left[\frac{(h_{abs}T_{abs} + h_{ssv}T_v)}{(h_{abs} + h_{ssv})} + \left(T_a - \frac{(h_{abs}T_{abs} + h_{ssv}T_v)}{(h_{abs} + h_{ssv})} \right) e^{\frac{l(h_{abs} + h_{ssv})}{\dot{m}C_p}(x-x_0)} \right] \tag{3}$$

Cette ***Équation*** traduit l'augmentation de la température au fur et à mesure qu'on s'approche de l'entrée de la cheminée [10].

2-3-1-2. *Bilan thermique de la vitre et de l'absorbeur*

En supposant la température le long de la vitre égale à T_v , le bilan thermique de la vitre s'écrit [10, 11] :

$$h_{srv}(T_v - T_a) - h_{ssv}(T_f - T_v) + \varepsilon_a\sigma(T_f^4 - T_a^4) - \varepsilon_{abs}\sigma T_{abs}^4 + \varepsilon_v\sigma T_v^4 = (1 - \tau)q \tag{4}$$

Les échanges thermiques ayant lieu sur l'absorbeur sont régies par ***l'Équation*** ci-dessous :

$$\lambda_{abs} \frac{\partial T_{abs}}{\partial z} = h_{abs}(T_f - T_{abs}) + \tau q - \varepsilon_{abs}\sigma T_{abs}^4 + \varepsilon_v\sigma T_v^4 \tag{5}$$

2-3-1-3. *Les coefficients d'échanges thermiques*

Le coefficient d'échange thermique (C.E.T) est l'un des paramètres indispensables dans le phénomène de convection. La plus grande difficulté en convection est le calcul du (C.E.T). Pour cela nous utilisons les expressions de coefficient d'échange thermique décrites par [10]. Ainsi le coefficient de transfert de chaleur entre le toit en verre et l'air circulant à travers le collecteur est donné par :

$$h_{ssv} = \left(\left(N_{uf} \frac{\lambda_f}{2R_c} \right)^4 + \left(N_{uv} \frac{\lambda_f}{R_c} \right)^4 \right)^{\frac{1}{4}} \tag{6}$$

Celui entre la surface de l'absorbeur et l'air circulant à travers le collecteur est :

$$h_{\text{abs}} = \left(\left(N_{\text{uf}} \frac{\lambda_f}{2R_c} \right)^4 + \left(N_{\text{uabs}} \frac{\lambda_f}{R_c} \right)^4 \right)^{\frac{1}{4}} \quad (7)$$

2-3-2. Équation de la vitesse du courant d'air dans la cheminée à une hauteur

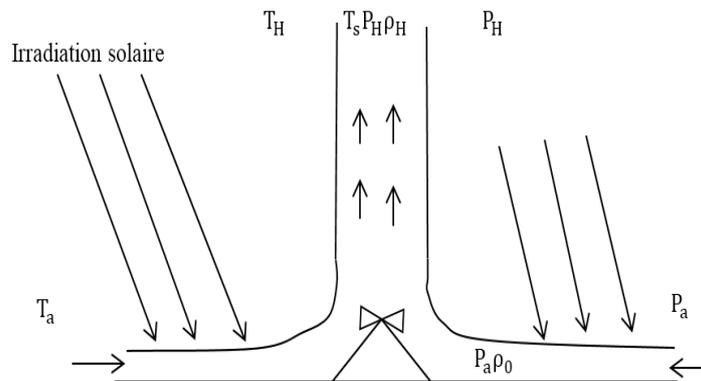


Figure 4 : Différentes températures, pressions et masses volumiques dans une tour solaire

La simplicité de la détermination de la vitesse du courant d'air peut se faire en supposant, les pressions P_H et P_a constantes et le fluide comme un gaz parfait [12]. L'utilisation de l'équation des gaz parfaits, de la force Archimède $\vec{F} = dV \cdot g \cdot (\rho_0 - \rho) \vec{k}$ s'exerçant sur un volume infinitésimal d'air (dv) et l'application de la relation fondamentale de la dynamique sur ce fluide donne l'expression de la vitesse de l'air [13]

$$v_H = \sqrt{2 \cdot H \cdot g \cdot \frac{(T_s - T_a)}{T_a}} \quad (8)$$

L'approximation de Boussinesq en convection naturelle stipulant que la masse volumique est fonction du différentiel de température et du coefficient d'expansion thermique s'écrit :

$$\rho = \rho_0 [1 - \beta(T_s - T_a)] \quad (9)$$

Par substitution de **l'Équation (9)**, nous obtenons une nouvelle égalité de la vitesse :

$$v_H = \sqrt{2 \cdot H \cdot g \cdot \frac{\beta(T_s - T_a)}{1 - \beta(T_s - T_a)}} \quad (10)$$

Nous pouvons conclure que les deux expressions de la vitesse du courant d'air dépendent fortement du différentiel de température et de la hauteur de la tour. Plus le différentiel de température augmente et / ou la hauteur augmente, plus la vitesse augmente.

3. Résultats et discussion

En considérant le dispositif décrit ci-dessus, des mesures expérimentales ont été menées en fonction de l'irradiation du jour. Pour l'interprétation des résultats, une seule journée a été prise en compte du fait de la similarité des mesures journalières.

3-1. Irradiation solaire

La **Figure 5** montre l'évolution de l'irradiation solaire du jour considéré. L'irradiation maximale est 1017 W / m^2 tandis que le minimale est 612 W / m^2 .

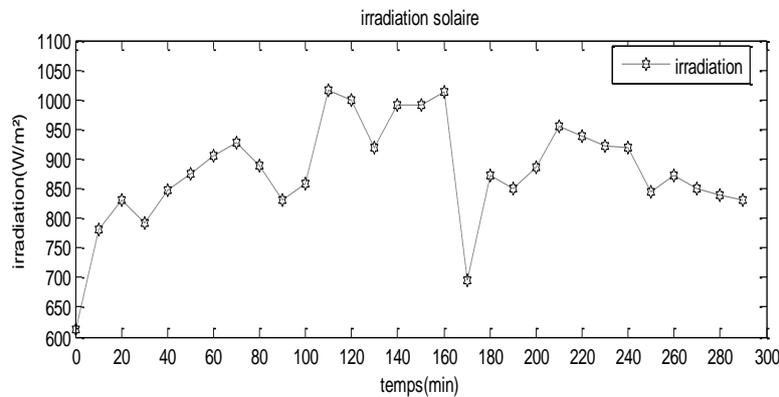


Figure 5 : Irradiation solaire

3-2. Profil de températures

3-2-1. Évolution de la température de l'air dans le collecteur

La **Figure 6** nous donne l'évolution des températures moyennes de l'air obtenues au niveau du collecteur. Les températures ambiantes et à l'entrée du collecteur sont légèrement différentes. Cette différence est due à la chaleur emmagasinée par le cadre métallique du collecteur. La température maximale de l'air enregistrée à l'entrée du collecteur est $43,9^\circ\text{C}$ et la valeur minimale $33,9^\circ\text{C}$. Cette figure montre également l'évolution des températures moyennes de l'air à la sortie du collecteur dont les températures maximale et minimale sont respectivement $74,4^\circ\text{C}$ et $59,7^\circ\text{C}$. La température de l'air augmente au fur et à mesure que l'irradiation solaire augmente, ce qui explique la différence de température entre la sortie et l'entrée du collecteur pouvant atteindre 35°C , générant ainsi une force motrice du flux d'air dans l'installation.

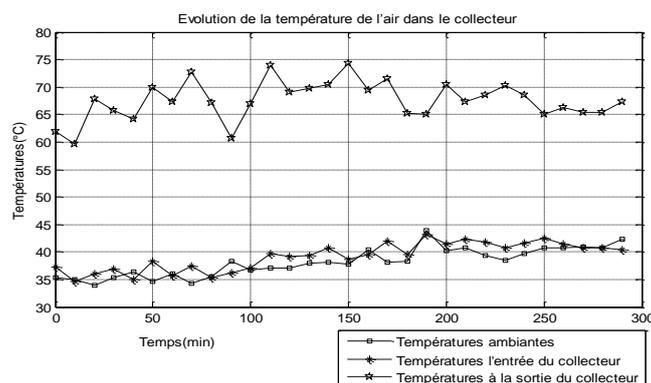


Figure 6 : Évolution de la température de l'air dans le collecteur

3-2-2. Évolution de la température de l'air dans la cheminée

La **Figure 7** montre l'évolution des températures à l'entrée et à la sortie de la cheminée. Ainsi les températures maximale et minimale à l'entrée de la cheminée sont respectivement $70,8^\circ\text{C}$ et $53,2^\circ\text{C}$, et celles

à la sortie sont 59.2°C et 48.7°C . La différence de température entre la sortie et l'entrée de la cheminée voisine de 20°C , est la résultante de la dépression lieu dans la cheminée pour permettre le bon fonctionnement d'une turbine, si elle est installée.

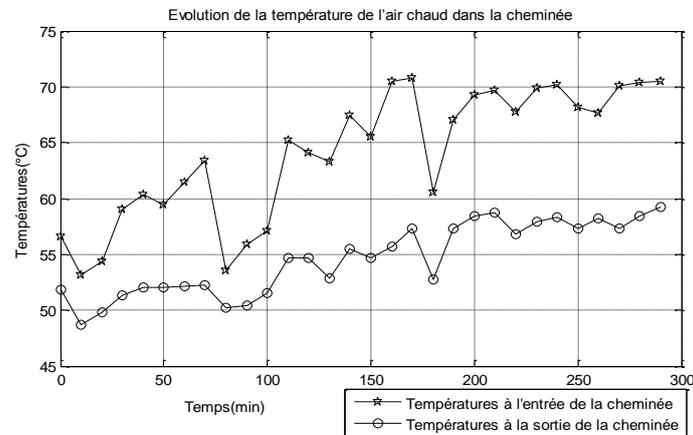


Figure 7 : Évolution de température de l'air chaud dans la cheminée

3-3. Champs de vitesses

La **Figure 8** ci-dessous donne l'allure des vitesses moyennes à l'entrée de la cheminée et à la sortie de la cheminée. La vitesse maximale à l'entrée de la cheminée est $1,5 \text{ m/s}$ et la valeur minimale est 1 m/s , par contre la vitesse maximale à la sortie est $1,2 \text{ m/s}$ et le minimal est $0,8 \text{ m/s}$. Les vitesses à l'entrée, sont supérieures à celles de la sortie car c'est elles qui doivent actionner la turbine.

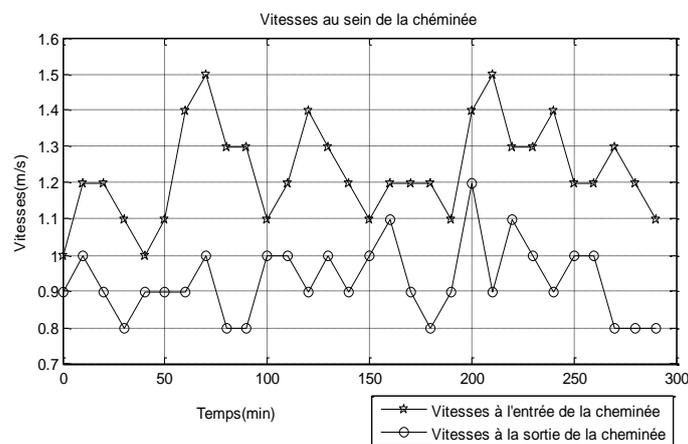


Figure 8 : Vitesses au sein de la cheminée

3-4. Comparaison des vitesses de sortie calculées et expérimentale

La vitesse de l'air à la sortie de la cheminée est très importante pour le bon fonctionnement d'une tour solaire. La **Figure 9** montre l'allure des vitesses calculées partir des **Équations (8) et (10)** et celles des vitesses expérimentales.

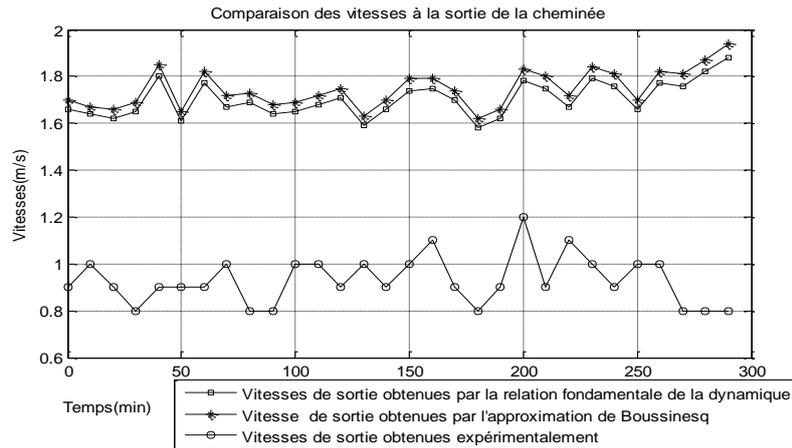


Figure 9 : Comparaison des vitesses de sortie de la cheminée

Nous constatons que les deux vitesses théoriques sont pratiquement égales, soit une différence de l'ordre de 2 à 3 % tandis que ces vitesses sont très largement supérieures à celles mesurées expérimentalement, soit un écart de vitesses d'environ 46 à 54 %. Cette grande différence de vitesse est due en grande partie à un problème de conception de notre tour solaire, qui n'a pas bien tenu compte de l'effet venturi pouvant favoriser l'accélération de l'air à l'entrée de la cheminée, pour avoir une vitesse plus élevée à sa sortie de la cheminée. La **Figure 10** montre le choix à faire pour la conception d'une tour solaire [14].

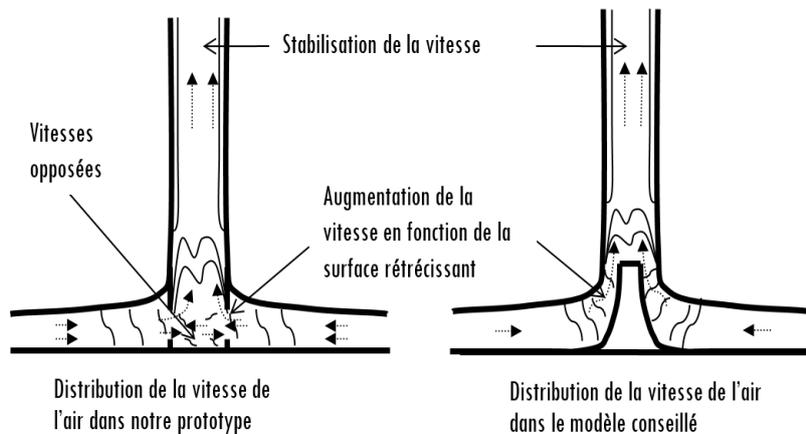


Figure 10 : Distribution de la vitesse de l'air dans une tour solaire

4. Conclusion

Les mesures expérimentales de l'écoulement de l'air en convection naturelle dans la tour, nous ont permis d'avoir une idée des grandeurs de températures et de vitesses au sein d'une tour solaire. La température de l'air au sein du collecteur augmente au fur et à mesure que l'irradiation est élevée. Mais une fois dans la cheminée on constate que la température de l'air s'abaisse petit à petit jusqu'à sa sortie du système. Une étude comparative des vitesses théoriques et expérimentales, nous a permis de déceler une anomalie dans la conception de notre maquette. Pour y remédier, nous devons réduire la surface d'entrée du fluide caloporteur au niveau de la cheminée tout en augmentant sa vitesse de sortie de la cheminée.

Références

- [1] - I. CABANYES, "Proyecto de motor solar, la energia eléctrica", Revista general de electricidad y sus aplicaciones, Vol. 8, (1903) 61 - 65.
- [2] - H. GÜNTHER, "In hundert Jahren - Die künftige Energieversorgung der Welt (In hundred years - Future energy supply of the world)" Kosmos, Franckh'sche Verlags handlung, 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, (1998) 277 - 288.
- [5] - W. HAAF, K. FRIEDRICH, G. MAYR and J. SCHLAICH, "Solar chimneys. Part I : Principle and Construction of the pilot plant in Manzanares", International Journal of Sustainable Energy, Vol. 2, N°1, (1983) 3 - 20.
- [6] - Les éléments sur le projet Namibien : [http:// www.greentower.net](http://www.greentower.net). (Date de la consultation : juillet 2013).
- [7] - Les éléments sur les projets Espagnol : <http://www.fotovoltaica.com/chimenea.pdf> (Date de la consultation : juillet 2013).
- [8] - Généralités sur la tour solaire : <http://www.tour-solaire.fr>.(Date de la consultation : juillet 2013).
- [9] - T. CHERGUI, H. BOUALIT, S. LARBI et A. BOUHDJAR, "Technologie de la cheminée solaire pour la production de l'énergie", Revue des Energies Renouvelables SIENR'12 Ghardaïa, (2012) 83 - 94.
- [10] - ROOZBEH SANGI, MAJID AMIDPOUR, and BEHZAD HOSSEINIZADEH, "Modeling and numerical simulation of solar chimney power plants", Department of Mechanical Engineering, K.N. Toosi University of Technology (KNTU), Tehran, Iran, (2011).
- [11] - ANTHONY JOHN GANNON, "Solar chimney turbine performance", degree of doctor of philosophy at the university of Stellenbosch, march, (2002).
- [12] - M. DENIS BONNELLE, "Tour solaire, tour à vaporisation d'eau, et modes de conversion d'énergie renouvelable apparentés : présentation, critiques et suggestions ", thèse de l'Université Claude Bernard - Lyon 1 - France, (2004).
- [13] - J. SCHLAICH, R. BERGERMANN, W.SCHEIL, and G. WEINREBE, "Design of commercial solar updraft tower systems-Utilization of solar induced convective flow for power generation", Journal of Solar Energy Engineering, Vol. 127, (2005).
- [14] - MING TINGZHEN, LIU WEI and XU GUOLIANG, "Analytical and numerical investigation of the solar chimney power plant systems", China; Int. J. Energy Res., Vol. 30, (2006) 861 - 873.