

Simulation Numérique CFD Avec Comsol Multiphysics D'une Conception Améliorée D'un Collecteur De Chaleur Utilisée Dans Une Cheminée Solaire

Noureddine MENECEUR*, S BOULAHROUZ**, R. MENECEUR*

* Mechanical engineering department, El-Oued University, Algeria

** Electro-Mechanical Engineering laboratory, Faculty of Science and Technology, KHENCHELA University, ALGERIA.

E-mail : meneceur-noureddine@univ-eloued.dz

Abstract

Cette étude présentée l'amélioration d'une nouvelle conception d'un collecteur de chaleur utilisée pour la conversion d'énergie solaire de rayonnement en énergie électrique. En utilisant le modèle mathématique turbulent $k-\varepsilon$ avec une géométrie axisymétrique en dimension 2D en régime transitoire, cela permet de simuler les caractéristiques thermodynamiques d'écoulement de l'air dans le collecteur et l'efficacité de la production d'énergie de manière à changer la valeur des paramètres de conception, tels que ; l'angle de convergent de collecteur, la hauteur et la surface de collecteur. Les résultats obtenus montrent que l'augmentation de ces paramètres diminue la pression du flux d'air, augmenter la vitesse du flux d'air et la température autour de la base de la cheminée, ainsi que d'améliorer l'efficacité de la production d'électricité.

Keywords: tour solaire, convection naturelle, fluide caloporteur, collecteur, effet de serre, cheminée.

1. Introduction

La technologie de production d'énergie renouvelable utilise la lumière du soleil et la flottabilité de l'air chauffé pour produire de l'électricité. Une cheminée solaire est une centrale à énergie renouvelable, composé d'un collecteur de chaleur, d'un tuyau de cheminée, d'une turbine et d'un absorbeur [1]. Le collecteur généralement couvre la grande surface du sol pour capter la chaleur de la lumière du soleil, donc forme une pression d'air dégradée dans sa zone couverte pour conduire un flux d'air horizontal de la température ambiante au centre [2]. L'utilisation de l'effet de canal de cheminée pour diriger le flux d'air verticalement et cela permet de propulser la turbine pour produire l'électricité [3].

Plusieurs travaux de recherche ont été réalisés sur les cheminées solaire sont caractérisés par un certain nombre d'études théoriques et expérimentales. En 1903 l'ingénieur espagnol Isodoro Cabanyes a été le premier à proposer l'idée d'utiliser une cheminée solaire pour produire de l'électricité [4]. Après quelques années plus tard en 1926, le Professeur Bernard Dubos a proposé à l'Académie des Sciences française la construction d'une centrale solaire aéro-électrique en Afrique du Nord avec sa cheminée solaire sur la pente d'une grande montagne. La première idée de la centrale solaire a été proposée par les ingénieurs allemands Jorg Schlaich et Rudolf Bergermann en 1976 [5]. Les essais effectués sur le premier prototype à Manzanares, en Espagne, avec une puissance maximale de 50 kW, ont montré que le concept est techniquement viable [6].

En 2006 Pretorius et Kröger [4]. Ont évalué l'influence d'une équation de transfert de chaleur convective développée, d'un coefficient de perte d'admission de turbine plus précis, d'un verre de toit de collecteur de qualité et de divers types de sol sur la performance d'une centrale à grande échelle de cheminée solaire. Dans la même année Ming et al. Ont présenté un modèle mathématique pour évaluer la pression statique relative et la force motrice du système de la centrale solaire et vérifié le modèle avec des simulations numériques [5]. En 2009 Maia et al. [6] ont présenté une analyse théorique d'un écoulement turbulent à l'intérieur d'une cheminée solaire. Ils ont montré que les éléments physiques les plus importants dans un système de cheminée solaire sont les dimensions de la tour car ils provoquent la variation la plus significative du comportement d'écoulement. Une augmentation de la hauteur et du diamètre de la tour produit l'augmentation du débit massique et le décrétement de la température d'écoulement.

Récemment en 2012 dans le centre des énergies renouvelable Ghardaïa T. Chergui, et al [7]. Ils ont écrit un article sur la Technologie de la cheminée solaire pour la production de l'énergie ils ont publié une étude détaillée sur la dynamique des fluides et de comment utiliser cette technologie est plus rentable. Fei Cao, et al. [8] Ils ont écrit un article sur la conception et la simulation de cheminée solaire d'un centrale électrique, la construction de ce programme est développée avec TRNSYS, dans cette étude ont évalué la performance de la CCS. Ont été constaté que la production d'énergie par CCS est très pertinente par rapport à l'irradiation solaire locale et que le CCS à capacité de puissance plus élevée présente

de meilleures caractéristiques coût-bénéfice. Ces chercheurs ont pensé que TRNSYS c'est un outil efficace et conventionnel pour évaluer à la fois les performances passagères et les moyennes du CCS. El-Ghonemy [9] fait une évaluation sur la performance de la chute de pression à travers la turbine, la vitesse et température du flux d'air et puissance de sortie pour un cheminée solaire spécifique avec une hauteur de cheminée de 200 m et d'un diamètre de 10 m, avec un collecteur de 500 m, ainsi qu'une intensité de rayonnement solaire presque de $800 (W/m^2)$, Basé sur le modèle de turbulence $(k-\epsilon)$ Toghraie et al. [10] maintenez que la production d'énergie pour un collecteur horizontal dans une cheminée a une relation positive avec la hauteur de la cheminée et le rayon du collecteur mais une relation négative avec la hauteur du collecteur. Généralement, les principaux facteurs affectant l'efficacité de la production d'énergie SSCP comprennent la radiation solaire, le rayon et la forme géométrique du collecteur de chaleur, les matériaux du couvercle du collecteur et de la plaque absorbante, la hauteur et le rayon de cheminée, ainsi que la conception de la tête de turbine [11, 12].

Suivant à la revue de la littérature, plusieurs travaux de recherches sur les cheminées solaires ont défini le toit du collecteur comme un plan horizontal. Bien que quelques recherches explorent une conception de toit incliné, elles se concentrent presque toutes sur un collecteur divergent. Pour améliorer l'efficacité de conversion d'énergie du cheminée, cet étude propose un collecteur de chaleur amélioré pour un cheminée solaire est caractérisé par un toit partiellement incliné. En utilisant le logiciel de Comsol Multiphysics pour simuler les caractéristiques d'écoulement d'air et l'efficacité de la production d'énergie. Les résultats obtenus sont analysés et discutés.

2. Conception de collecteur

Contrairement au collecteur de chaleur horizontal [13, 14], dans cette étude nous proposons une conception de collecteur incliné pour améliorer l'efficacité de la conversion d'énergie. La figure 1 est illustré le schéma de conception de collecteur.

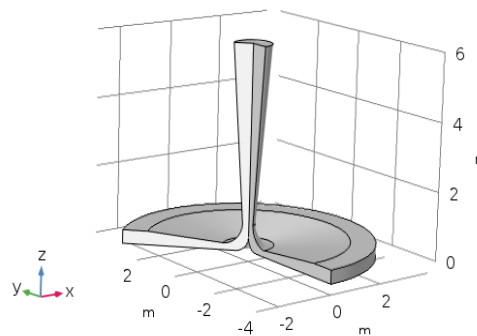


Fig.1. Schéma de conception de la cheminée solaire avec collecteur améliorée.

Nous considérons la géométrie de collecteur de cheminée axisymétrique dessinée par les dimensions de cette conception est représentée par le tableau ci-dessous :

| Eléments | Dimensions |
|-----------------------|-----------------------|
| Hauteur de cheminée | 6 (m) |
| Diamètre de cheminée | 0.60 (m) |
| Rayon de collecteur | 5 (m) |
| Surface de collecteur | 314,15 m ² |
| Entre de collecteur | 0.40 (m) |
| Angle d'inclinaison | 15° |

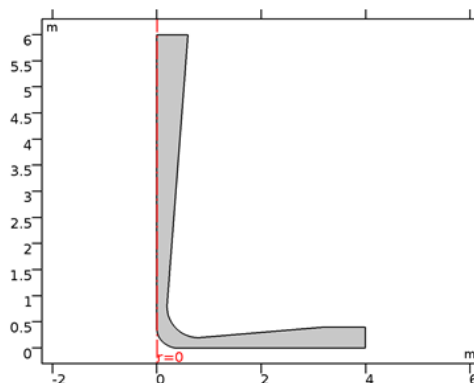


Fig.2 : modèle géométrique en 2D axisymétrique de l'ensemble cheminé et collecteur, dessiné par Comsol Multiphysics.

3. Simulation numérique

3.1. Modèle mathématique :

Nous avons modélisé la tour solaire (l'ensemble de collecteurs et cheminée) sous COMSOL comme un milieu continu 2D symétrie avec la forme et les dimensions comme indiqué sur la figure 2.

L'écoulement d'air à travers le collecteur est régi par les équations de Navier-Stokes du modèle de Reynolds moyenne [15]. L'équation de continuité, les équations de quantité de mouvement, les équations d'énergie de la cinétique turbulente sont formés a coordonnées cylindriques [16, 17]. L'équation de continuité peut s'écrire par l'expression [1] :

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

Où : r représente la coordonnée radiale, z représente la coordonnée axiale, ρ représente la densité de l'air, w signe la vitesse dans la direction axiale et u désigne la vitesse dans la direction radiale.

L'équation de l'énergie peut s'écrire par :

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v T)}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r \rho u T)}{\partial r} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\lambda}{C_p} \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\lambda}{C_p} \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (2)$$

Où : C_p représente la capacité calorifique de l'air, λ représente la conductivité thermique et v représente la vitesse de l'air.

Les équations de quantité de mouvement peuvent s'écrire par :

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u w)}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r \rho u u)}{\partial r} = -\frac{dP}{dr} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \mu \frac{\partial u}{\partial r} \right) - 2\mu \frac{u}{r^2} \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho V w)}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r \rho w u)}{\partial r} = -\frac{dP}{dz} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \mu \frac{\partial w}{\partial r} \right) - g(\rho_0 - \rho) \quad (4)$$

Où : μ représente la viscosité dynamique, ρ_0 représente la densité de référence.

Les équations standard du modèle de turbulence (k - ε) pour l'énergie cinétique turbulente et le rapport de dissipation de l'énergie cinétique turbulente sont données par les expressions :

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k w)}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r \rho k u)}{\partial r} = \frac{\partial}{\partial z} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial r} \right] + G_k - g \beta \frac{\mu_t}{Pr_{kt}} \frac{\partial T}{\partial z} - \rho \varepsilon \quad (5)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon w)}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r \rho \varepsilon u)}{\partial r} = \frac{\partial}{\partial z} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \mu \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial r} \right) + G_k C_{1\varepsilon} - \frac{\varepsilon}{k} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (6)$$

Où :

μ_t : est la viscosité turbulente, σ_k et σ_ε représentent les nombres de Prandtl turbulents pour ε et k .

Généralement, dans le modèle de turbulence standard (k - ε) les paramètres constants configurés respectivement $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$, σ_ε et σ_k sont à 1.44, 1.92, 1.2 et 1.0.

L'efficacité de la cheminée solaire peut être calculée par les expressions suivantes :

$$Q_{sp} = Q_c \cdot Q_h \cdot Q_t \cdot Q_g \quad (7)$$

$$Q_c = \frac{Q}{Q_s} = \frac{\dot{m} C_p \Delta T}{A_G} \quad (6)$$

$$Q_h = \frac{\Delta P_t}{Q} = \frac{\dot{m} V_{c,max}^2 / 2}{\dot{m} C_p \Delta T} = \frac{gH}{T_0 C_p} \quad (8)$$

Où :

Q_{sp}, Q_c, Q_h, Q_t et Q_g : sont représentent l'efficacité de la centrale solaire, du collecteur de chaleur, de la cheminée, de la turbine et du générateur.

Q : est flux de chaleur spécifique sortant.

Q_s : est le flux solaire entrant.

ΔT : est la température de l'air incrémentielle entre l'entrée et la sortie du collecteur.

ΔP_t : est la différence de pression entre le bas de la cheminée et la sortie de la cheminée.

Le débit massique à travers la cheminée est donné par la relation suivante [18] :

$$\dot{m} = \rho_c \cdot A_c \cdot V_c \tag{9}$$

La vitesse atteinte par les courants de convection libres est calculée par l'expression suivante [19]:

$$V_{c,max} = \sqrt{2gH \frac{\Delta T}{T_0}} \tag{10}$$

En l'absence de turbine, la puissance pénétrée dans le flux d'air peut être calculée par :

$$\Delta P_t = \dot{m} \frac{V_{c,max}^2}{2} \tag{11}$$

3.2 Choix du maillage :

Nous avons choisi pour notre modèle de simulation sous COMSOL un maillage à élément triangulaire simple de type fine avec 1036 éléments (voir figure 3). Le choix d'un maillage qui nécessite un temps de calcul réduit représente la solution optimale.

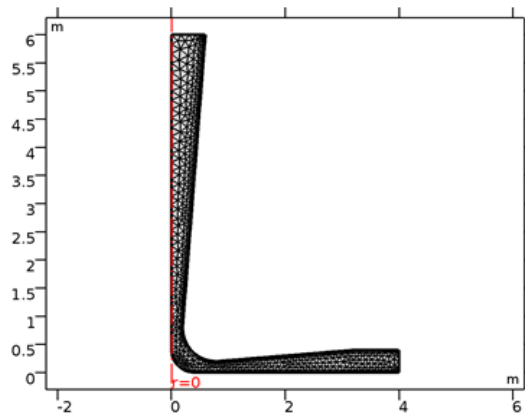


Fig.3. Le type de maillage généré automatiquement par le logiciel COMSOL.

3.3 Les conditions initiales aux limites

Les équations différentielles de la modélisation sont résolues avec les conditions initiales aux limites suivantes :

- La condition initiale :

$$t = 0, u = v = w = 0, T = T_0, P = P_0 \tag{12}$$

- Aux bords du cheminé : (adhérence à la paroi et isolation thermique)

$$u = v = 0, \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\partial T}{\partial z} = 0 \tag{13}$$

- A la surface du collecteur : (flux thermique imposé)

$$Q_{solair} = 800 \dots 1200 [W] \tag{14}$$

4. Résultats et discussion

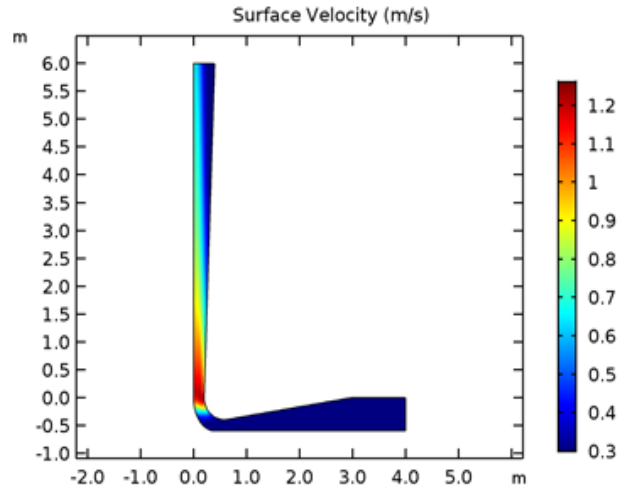


Fig.4 : Evolution de la vitesse d'écoulement d'air à travers la cheminée pour un flux solaire de $800 [W / m^2]$

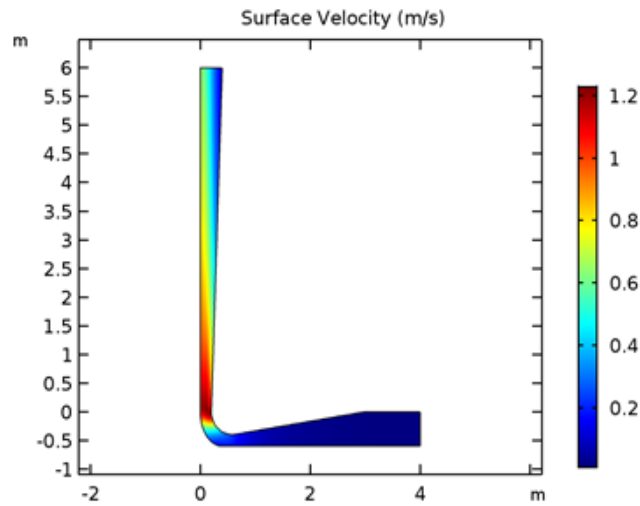


Fig.5 : Evolution de la vitesse d'écoulement d'air à travers la cheminée pour un flux solaire de $1200 [W / m^2]$.

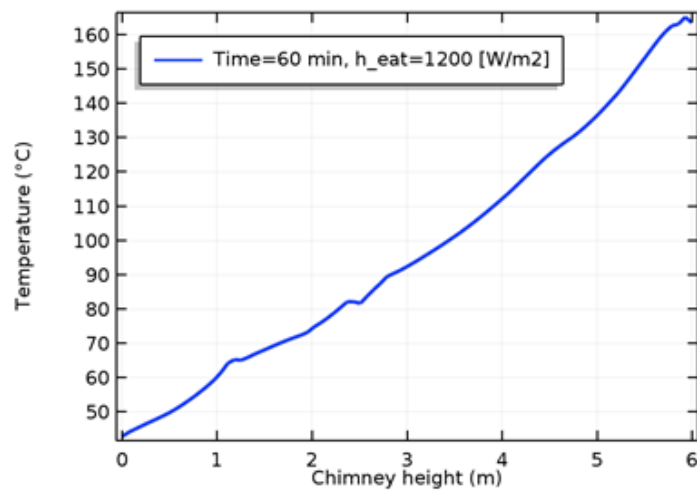


Fig.6 : Variation de la température d'écoulement d'air le long de la cheminée, dans une période de 60 minutes et $Q_{ray}=1200 W/m^2$.

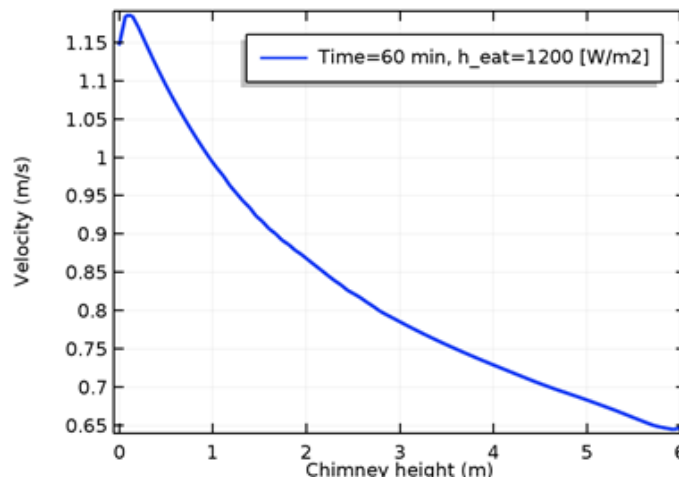


Fig.7 : Variation d'écoulement d'air le long de la cheminée, dans une période de 60 minutes et $Q_{ray}=1200 \text{ W/m}^2$.

Les figures (4 et 5) montrent le contour de vitesse d'écoulement d'air à travers la cheminée et le collecteur, pour une période de 60 minutes pour un flux solaire de 1200 W/m^2 . On observe que la vitesse d'écoulement d'air maximale se trouve à l'entrée de la cheminée. La vitesse d'écoulement d'air à travers la cheminée est diminuée du bas à sa sortie, est de même pour la vitesse du flux d'air le long du rayon du collecteur.

La variation de la température d'écoulement d'air à travers la cheminée est illustrée à la figure 6. On remarque que la température d'écoulement d'air diminue dans la direction du rayon du collecteur et obtient la température ambiante à sa zone d'entrée. Le même phénomène se retrouve le long de la hauteur de cheminée mais diminue très lentement. La température maximale se situe près de la zone d'absorption. De plus, la température est augmentée avec une augmentation de l'angle convergent et de la pente d'inclinaison et par l'augmentation du rayonnement solaire.

5. Conclusion

Une simulation numérique sous le logiciel COMSOL Multiphysics d'une nouvelle conception d'un collecteur de chaleur utilisée pour la conversion d'énergie solaire de rayonnement en énergie électrique a été présentée. En utilisant le modèle mathématique turbulent ($k-\varepsilon$) avec une géométrie axisymétrique en dimension 2D en régime transitoire, cela permet de simuler les caractéristiques thermodynamiques d'écoulement de l'air dans le collecteur et la cheminée pour améliorer l'efficacité de la production d'énergie. Dans cette simulation numérique en employant un maillage triangulaire fine avec 1036 éléments, étendu sur un intervalle de temps [0 1] s pour une période d'un heure sous les conditions climatique stable.

À la suite de cette approche numérique, il nous semble utile de rappeler quelque conclusion importante comme :

La température de l'air dans la cheminée, le flux solaire et la géométrie de collecteur influencée directement sur la performance de la cheminée, ainsi que sur la température de l'écoulement de l'air à la sortie de cheminée.

Les résultats obtenus montrent que la meilleure performance de la cheminée solaire correspond à la plus haute dégré d'efficacité thermique et de maximum quantité de chaleur obtenus dans le collecteur par effet de serre. Ainsi que la pression du flux d'air dans la région d'entrée de la cheminée, augmente la vitesse et la température d'écoulement d'air dans cette région, cela permet d'améliorer l'efficacité de la production d'énergie.

Références

- [1] S. Fu, "An enhanced heat collector design and numerical simulation for solar chimney power plant," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, p. 042022.
- [2] A. Hassan, M. Ali, and A. Waqas, "Numerical investigation on performance of solar chimney power plant by varying collector slope and chimney diverging angle," *Energy*, vol. 142, pp. 411-425, 2018.
- [3] C. O. Okoye and O. Taylan, "Performance analysis of a solar chimney power plant for rural areas in Nigeria," *Renewable energy*, vol. 104, pp. 96-108, 2017.
- [4] W. Chekirou, N. Boukheit, and T. Kerbache, "Différents modes de transfert de chaleur dans un absorbeur d'un concentrateur solaire cylindro-parabolique," *Revue des Energies Renouvelables ICRESD-07 Tlemcen*, pp. 21-28, 2007.
- [5] L. Beneke, C. Fourie, and Z. Huan, "Investigation of an octagon-shaped chimney solar power plant," *Journal of Energy in Southern Africa*, vol. 27, pp. 38-52, 2016.
- [6] T. Tayebi and M. Djezzar, "Numerical analysis of flows in a solar chimney power plant with a curved Junction," *International Journal of Energy Science (IJES) Volume*, vol. 3, 2013.
- [7] T. Chergui, H. Boualit, S. Larbi, and A. Bouhdjar, "Technologie de la cheminée solaire pour la production de l'énergie," *Revue des Energies Renouvelables SIENR*, vol. 12, pp. 83-94.
- [8] F. Cao, H. Li, L. Zhao, T. Bao, and L. Guo, "Design and simulation of the solar chimney power plants with TRNSYS," *Solar Energy*, vol. 98, pp. 23-33, 2013.

- [9] A. El-Ghonemy, "Solar chimney power plant with collector," *IOSR Journal of Electronics and Communication Engineering (IOSR-JECE)*, vol. 2, pp. 28-35, 2016.
- [10] D. Toghraie, A. Karami, M. Afrand, and A. Karimipour, "Effects of geometric parameters on the performance of solar chimney power plants," *Energy*, vol. 162, pp. 1052-1061, 2018.
- [11] S. K. Patel, D. Prasad, and M. R. Ahmed, "Computational studies on the effect of geometric parameters on the performance of a solar chimney power plant," *Energy conversion and Management*, vol. 77, pp. 424-431, 2014.
- [12] M. Hosien and S. Selim, "Effects of the geometrical and operational parameters and alternative outer cover materials on the performance of solar chimney used for natural ventilation," *Energy and Buildings*, vol. 138, pp. 355-367, 2017.
- [13] M. O. Hamdan, "Analysis of a solar chimney power plant in the Arabian Gulf region," *Renewable Energy*, vol. 36, pp. 2593-2598, 2011.
- [14] A. Koonsrisuk, "Comparison of conventional solar chimney power plants and sloped solar chimney power plants using second law analysis," *Solar Energy*, vol. 98, pp. 78-84, 2013.
- [15] S. Hu, D. Y. Leung, and M. Z. Chen, "Effect of divergent chimneys on the performance of a solar chimney power plant," *Energy Procedia*, vol. 105, pp. 7-13, 2017.
- [16] E. Gholamalizadeh and M.-H. Kim, "CFD (computational fluid dynamics) analysis of a solar-chimney power plant with inclined collector roof," *Energy*, vol. 107, pp. 661-667, 2016.
- [17] H. F. Fasel, F. Meng, E. Shams, and A. Gross, "CFD analysis for solar chimney power plants," *Solar energy*, vol. 98, pp. 12-22, 2013.
- [18] J. r. Schlaich, R. Bergermann, W. Schiel, and G. Weinrebe, "Design of commercial solar updraft tower systems—utilization of solar induced convective flows for power generation," *J. Sol. Energy Eng.*, vol. 127, pp. 117-124, 2005.
- [19] A. Koonsrisuk and T. Chitsomboon, "Mathematical modeling of solar chimney power plants," *Energy*, vol. 51, pp. 314-322, 2013.