



Modélisation et simulation d'une cheminée solaire à Chlef, Algérie

Toufik Tahri^{*1}, Djilali Benyoucef²

^{1,2}Electrical Department, Hassiba Benbouali University of Chlef
BP 151 Hay Essalam, 02000 Chlef

*t.tahri@univ-chlef.dz

Résumé— Une centrale solaire à cheminée est un système permet de générer de l'énergie électrique à partir de l'énergie solaire gratuite. L'utilisation de la cheminée solaire dans les zones chaudes comme Chlef, en Algérie, avec une forte intensité de rayonnement solaire est très efficace et respectueuse de l'environnement. Dans ce travail, on a développé un modèle théorique de la cheminée solaire (collecteur, cheminée et turbine). Le rayonnement solaire global et la température de l'air ont été mesurés durant l'année 2017. Le modèle développé est utilisé pour la simulation en utilisant les données météorologiques de deux journées (01/01/2017 et 05/07/2017) de la région de Chlef, et en gardant les mêmes dimensions de la cheminée solaire de Manzanares en Espagne, dans le but de prévoir la puissance électrique produite par la centrale de cheminée solaire. Les résultats de simulation montrent que l'énergie électrique produite par SCPP peut atteindre 58 kW en janvier et 95 kW en été. L'influence des dimensions de l'installation (dimensions du collecteur et la cheminée) sur l'énergie électrique produite a été simulée afin de prévoir une SCPP optimal pour répondre au besoin en électricité de la région de Chlef. L'étude de l'influence des paramètres de la cheminée solaire montre que les dimensions de la centrale, la température de l'air et l'intensité des rayonnements solaires sont des paramètres importants pour l'amélioration de ces performances.

Keywords— Cheminée solaire, Puissance électrique, Rayonnement solaire, Température de l'air, Région de Chlef.

I. INTRODUCTION

Avec la baisse actuelle des ressources en combustibles fossiles et l'augmentation de la pollution dans le monde, les sources d'énergie renouvelables respectueuses de l'environnement sont très demandées. Parmi les différents types de sources d'énergie renouvelables, l'énergie solaire occupe une grande partie [1]. La centrale solaire à cheminée est un système permet de générer de l'énergie électrique à partir de l'énergie solaire qui semble être une solution aux crises énergétiques. Le premier prototype de SCPP a été construit et exploité en continu de mi-1982 jusqu'au début 1989 à Manzanares, en Espagne. Ce dernier, a été capable de produire de l'électricité jusqu'à 50 kW. Un projet de tour solaire, appelé Projet de Buronga, prévue pour 2010, est actuellement développé en Australie par la société EnviroMission. La cheminée aurait 990 mètres de hauteur, 70 mètres de diamètre.

La centrale fournirait 200 mégawatts de puissance électrique, de quoi approvisionner en électricité environ 200 000 logements [2]. Un projet grandiose fondé sur ce le même principe va être mis en œuvre en Arizona est réalisé par la société australienne EnviroMission. Plusieurs cheminées solaires semblables seront implantées pour produire 200 mégawatts, avec une hauteur de 720 m. Un projet similaire est prévu en Namibie par la société Hahn & Hahn, avec une puissance de 400 MW produite par chaque tour [3].

II. MODELISATION DE LA CENTRALE SOLAIRE A CHEMINEE

Un système typique de centrale solaire à cheminée (SCPP) contient principalement trois composants, le capteur solaire, la cheminée et la turbine/générateur. Le SCPP est une centrale électrique fonctionnant en présence de la lumière du soleil. Il est composé d'une longue cheminée, une grande surface de collecteur et une turbine/générateur placée sous la cheminée. Il travaille avec le rayonnement solaire qui chauffe l'air en dessous du collecteur. La densité de l'air chauffé diminue et celui-ci a tendance à s'élever vers le haut de la cheminée et fait tourner la turbine qui génère de l'électricité. Ensuite, l'air chauffé est évacué par la cheminée vers l'atmosphère [4]. Le schéma de la centrale solaire à cheminée étudié dans ce travail est illustré dans la Figure 1.

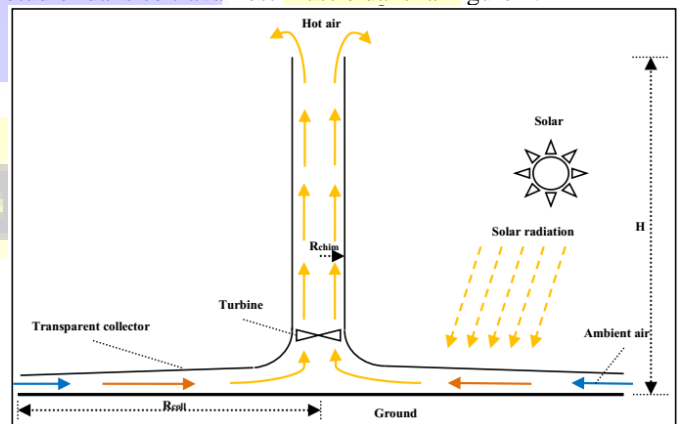


Fig. 1. Schéma de la centrale solaire de la cheminée



D'après le travail de Guo et al. [5], le rendement total de la cheminée solaire est défini comme le produit entre taux de chute de pression de la turbine et le rendement du collecteur de la cheminée et le rendement de turbine/générateur selon l'équation suivante (Eq.1):

$$\eta_{SCPP} = \eta_{coll} \cdot f_t \cdot \eta_{ch} \cdot \eta_{tg} \quad (1)$$

où η_{SCPP} , η_{coll} , η_{ch} , et η_{tg} sont respectivement: le rendement global, rendement du collecteur, rendement de la cheminée et rendement du turbine/générateur, et f_t est le taux de chute de la pression de la turbine.

La puissance électrique totale produite par la cheminée solaire est donnée par l'Eq. 2:

$$W_{SCPP} = Q_s \cdot \eta_{SCPP} \quad (2)$$

où W_{SCPP} est la puissance électrique totale produite et Q_s est l'énergie solaire totale reçue par le collecteur, elle est calculée par Eq. 3:

$$Q_s = I_s \cdot A_{coll} \quad (3)$$

où I_s est le rayonnement solaire mesuré et A_{coll} est la surface du collecteur.

Pour obtenir les rendements individuels de chaque composant du système, les équations sont développées dans la section suivante.

A. Collecteur solaire

Le rendement du collecteur est calculé en divisant la quantité de chaleur transmise à l'air par le collecteur (Q_u) par la quantité de rayonnement solaire introduite par la surface du collecteur (Q_s) selon l'équation. 4:

$$\eta_{coll} = \frac{Q_u}{Q_s} \quad (4)$$

Le bilan énergétique du capteur solaire peut être calculé par l'équation 5:

$$Q_u = \dot{m} \cdot C_p \cdot \Delta T = \alpha \cdot A_{coll} \cdot I_s - \beta \cdot \Delta T_0 \cdot A_{coll} \quad (5)$$

où ΔT_0 est la différence de température entre la surface du collecteur et l'air ambiant, et ΔT est la différence de température entre l'air chaud moyen dans le collecteur et l'air ambiant. α est le coefficient d'absorption efficace du collecteur avec une valeur typique de 0,75 à 0,8 et β est un coefficient de transfert de chaleur ajusté qui permet de calculer les pertes par rayonnement et par convection. \dot{m} est le débit massique de l'air à l'intérieur du collecteur.

En remplaçant l'équation (5) dans l'équation (3), le rendement du collecteur est donné par l'équation 6:

$$\eta_{coll} = \alpha - \frac{\beta \cdot \Delta T_0}{I_s} \quad (6)$$

Le calcul de la température moyenne de l'air chaud et de la surface de l'absorbeur est délicat. L'hypothèse pour l'équation ci-dessus (Eq. 7) est que la température de surface de l'absorbeur est égale à la température moyenne de l'écoulement d'air.

$$\Delta T = \Delta T_0 \quad (7)$$

où $\Delta T = T_f - T_a$ et $\Delta T_0 = T_0 - T_a$ avec T_f , T_a et T_0 sont respectivement la température moyenne de l'air chaud dans le collecteur, la température de l'air ambiant et la température de sortie du collecteur.

Selon Guo et al. [6] la montée de la température de l'air et la vitesse du courant ascendant sont couplées comme suit (Eq. 8):

$$\Delta T = C_1 \cdot V^m \quad (8)$$

Von Backström et Fluri [7] ont étudié la valeur de (m) avec l'utilisation d'un modèle de capteur solaire simple selon l'Equation 9 :

$$m = -\frac{\eta_{coll}}{\alpha} \quad (9)$$

Le rendement du collecteur peut être calculé à partir de l'équation (9) et une méthode d'ajustement est adoptée pour déterminer la relation entre m et les deux paramètres environnementaux selon Eq. 10:

$$m = -18.8354 \times I_s^{0.0504} \times T_a^{-0.6143} \quad (10)$$

B. Cheminée solaire

Le rendement de la cheminée est donné par Equation 11:

$$\eta_{ch} = \frac{W_{ch}}{Q_u} \quad (11)$$

où W_{ch} est la puissance contenue dans le flux d'air au bas de la cheminée et elle est donnée par Schlaich [8] comme suit (Eq. 12) :

$$W_{ch} = \Delta p_{ch} \cdot V_{ch} \cdot A_{ch} \quad (12)$$

où Δp_{ch} est la différence de pression produite entre la base de la cheminée et l'air ambiant.

Selon Schlaich [8], la différence de pression dans la cheminée et l'équation de la vitesse maximale sont données par les Equations 13 et 14:

$$\Delta p_{ch} = g \cdot \rho_{ch} \cdot K \cdot H_{ch} \cdot (T_0 - T_a) / T_a \quad (13)$$



$$V_{ch} = \sqrt{2 g H_{ch} (T_0 - T_a) / T_a} \quad (14)$$

Substituer l'équation 13 et l'équation 14 dans l'équation 12, nous obtenons l'équation 15 suivante :

$$W_{ch} = 1.414 \cdot \rho_{ch} \cdot A_{ch} \cdot g^{3/2} \cdot H_{ch}^{3/2} \left(\frac{T_0 - T_a}{T_a} \right)^{3/2} \quad (15)$$

La valeur de W_{ch} de l'Eq. 15 divisé par la valeur de Q_u dans l'Eq. 5 donne le rendement théorique de la cheminée solaire (Eq. 16) :

$$\eta_{ch} = \frac{1.414 \cdot \rho_{ch} \cdot A_{ch} \cdot g^{3/2} \cdot H_{ch}^{3/2} \left(\frac{T_0 - T_a}{T_a} \right)^{3/2}}{\alpha \cdot A_{coll} \cdot I_s - \beta \cdot \Delta T_0 \cdot A_{coll}} \quad (16)$$

Selon Shariatzadeh et al. [9] une autre équation qui peut aider à calculer le rendement de la cheminée d'une manière plus facile est donnée par Eq. 17:

$$\eta_{ch} = \frac{g \cdot H_{ch}}{c_p \cdot T_a} \quad (17)$$

C. Turbine Eolienne

Des turbines à air vertical à faible vitesse ont toujours été utilisées à la base de la cheminée solaire où la force de l'air chaud convertit au maximum les 2/3 du flux d'air en puissance mécanique et produit finalement de l'énergie électrique [8]. La puissance mécanique maximale produite par la turbine est donnée par l'Equation 18:

$$W_t = \frac{2}{3} W_{ch} \quad (18)$$

La puissance électrique produite par le générateur est calculée comme suit (Eq. 19):

$$\eta_g = \frac{W_e}{W_t} \quad (19)$$

Le rendement du turbine/générateur est donné par l'Eq. 20:

$$\eta_{tg} = \frac{W_e}{W_{ch}} \quad (20)$$

où $\eta_{tg} = \eta_t \cdot \eta_g$ est le rendement combiné de la turbine et du générateur. η_{tg} peut être traité comme une constante dans ce travail avec une valeur de 0,80.

Selon Guo et al. [5], le rapport de perte de charge optimal de la turbine pour le prototype espagnol peut s'écrire comme suit (Eq. 21):

$$f_{opt} = \frac{2-m}{3} \quad (21)$$

III. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Dans le présent travail, des simulations qui incorporent le rayonnement solaire et la température ambiante dans la région de Chlef sont réalisées en utilisant les dimensions du prototype espagnol à Manzanares pour explorer l'énergie électrique produite par SCPP. Les principales dimensions du prototype espagnol sélectionné comme modèle physique sont listées dans le Tableau 1.

Tableau 1: Dimensions principales du prototype de Manzanares en Espagne

Paramètre	Valeur
Rayon moyen du collecteur	122.0m
Hauteur moyenné du collecteur	1.85m
Hauteur de cheminée	194.6m
Rayon de cheminée	5.08m
Nombre de pales de la turbine	4

Les coordonnées géographiques du site de collecte de données à Chlef est 36 ° 23 'de latitude nord, de 23°1' de longitude ouest et de 143 mètres d'altitude au-dessus du niveau moyen de la mer. Les paramètres environnementaux tels que le rayonnement solaire global et la température de l'air ambiant sont collectés à partir du 1er janvier 2017 jusqu'à maintenant.

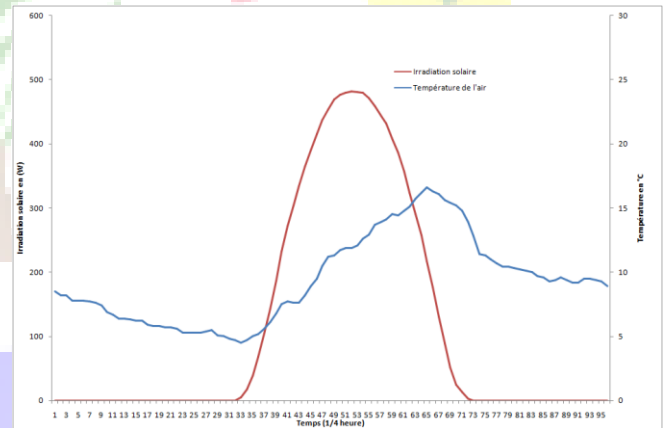


Fig. 2: Rayonnement solaire et température de l'air mesurés à Chlef le 1 janvier 2017



Le 5^{ème} Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables

The 5th International Seminar on New and Renewable Energies

Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,
Ghardaïa - Algérie 24 - 25 Octobre 2018

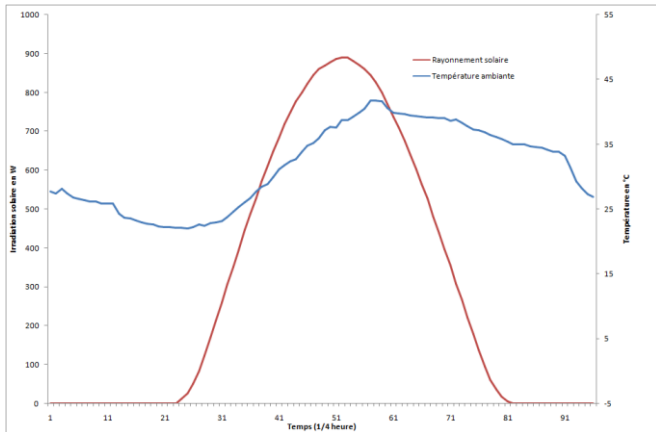


Fig. 3: Rayonnement solaire et température de l'air mesurés à Chlef le 05 Juillet 2017

La Figure 2 montre la variation du rayonnement solaire et la température de l'air ambiant en fonction du temps du 1 janvier 2017. On constate que le rayonnement global maximum observé est 482 W/m^2 à 13:00 h, alors que la température de l'air ambiant atteint sa valeur maximale $16,6^\circ\text{C}$ à 16:15 h. La variation du rayonnement solaire et la température de l'air ambiant en fonction du temps du 5 Juillet 2017 est illustrée sur la figure 3. On constate que la température maximale de l'air ambiant est de $41,7^\circ\text{C}$ à 14h15 et le rayonnement global maximal observé est 890 W/m^2 à 13h15.

Dans la conception de système à cheminée solaire, il est essentiel de connaître la quantité de lumière solaire disponible à un endroit particulier et à un moment donné. L'énergie solaire totale reçue par le collecteur en fonction du temps pour les deux jours est représentée sur la figure 4. Nous avons constaté que l'énergie solaire totale est très importante en été par rapport à l'hiver et que la valeur maximale mesurée est de $41,6 \text{ MW}$ à 13h15. On peut noter que les deux parcelles d'énergie solaire totale suivent la même tendance du rayonnement solaire.

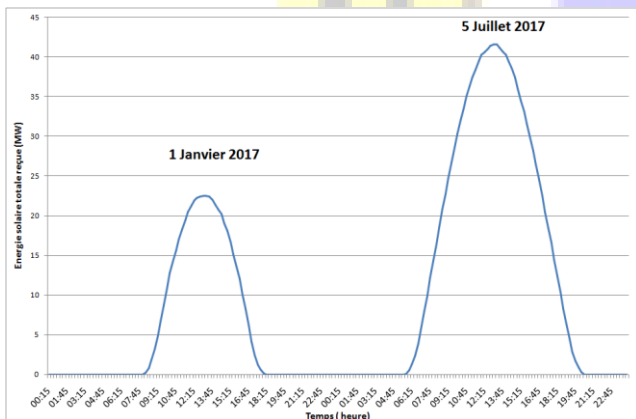


Fig. 4: Energie solaire totale reçue par le collecteur de la cheminée solaire

La vitesse ascendante à l'entrée de la cheminée en fonction du temps pour les deux jours est représentée dans la figure 5. On remarque que les deux courbes de vitesse suivent la même tendance du rayonnement solaire et la valeur maximale est de $12,5 \text{ m/s}$ à 13h15 en été et $9,2 \text{ m/s}$ à 13h00 en hiver. On peut voir que les valeurs de la vitesse du courant ascendant sont observées seulement pendant l'intervalle de 05h45 à 20h15 pour le 5 Juillet 2017, et de 08h15 à 18h00 pour le 1 Janvier 2017 et ils sont presque nul pendant la nuit.

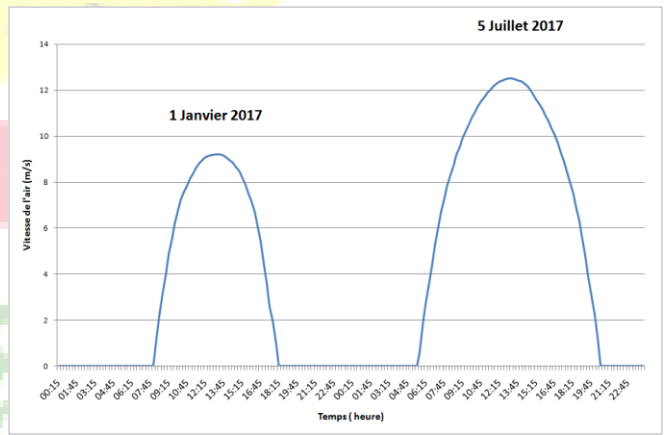


Fig. 5: Vitesse des courants ascendants à l'entrée de la cheminée

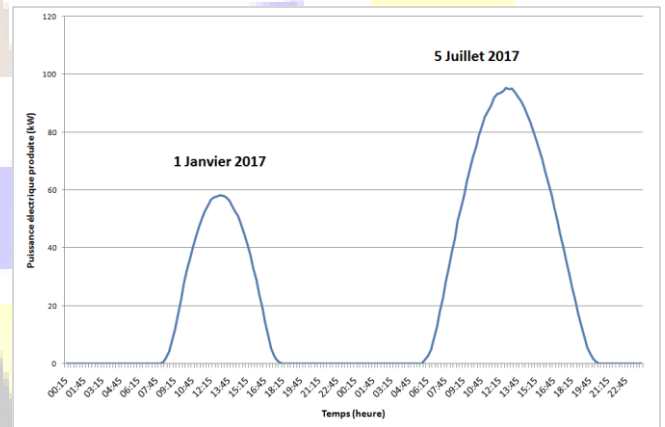


Fig. 6: Puissance produite par SCPP à Chlef

La puissance produite par la cheminée solaire est représentée dans la figure 6. On constate que l'énergie électrique produite par la SCPP à Chlef est très importante en hiver (58 kW à 13h00) et plus importante en été (95 kW à 12h45). En outre,



Le 5^{ème} Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables

The 5th International Seminar on New and Renewable Energies

Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,
Ghardaïa - Algérie 24 - 25 Octobre 2018



nous pouvons constater que la production de puissance suit la même tendance du rayonnement solaire.

Les résultats de simulation de la variation de la puissance de sortie avec le rayonnement solaire pour le 1er juin 2016 et le 8 janvier 2015 sont représentés par les figures 7 et 8. Nous pouvons constater que la variation de puissance électrique produite par SCPP est linéaire avec le rayonnement solaire.

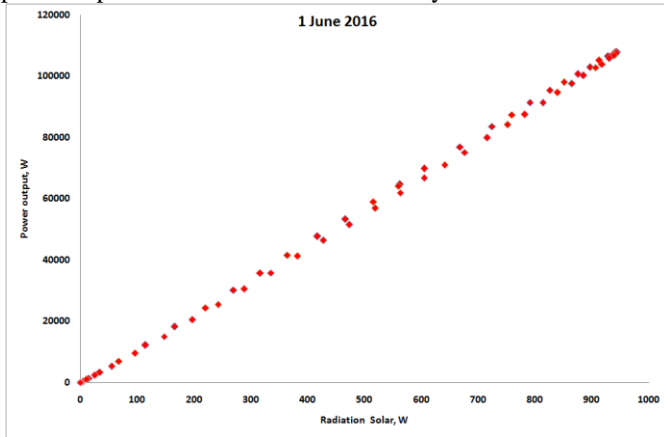


Fig. 7: Effets théoriques du rayonnement solaire sur la puissance du 1er juin 2016

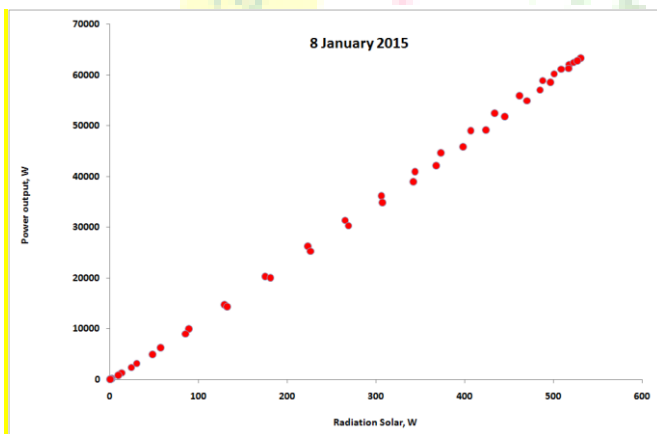


Fig. 8: Effets théoriques du rayonnement solaire sur la puissance du 8 janvier 2015

L'influence du collecteur de diamètre de la cheminée solaire sur la puissance pour une valeur du rayonnement solaire de 800W / m², température ambiante de 25 ° C, et hauteur de tour de 194.6m est montrée sur la Fig. 11. L'équation 3 du modèle est utilisée pour fonder les effets du collecteur diamètre dans la puissance. On voit que, la puissance de sortie dans SCPP augmente avec l'augmentation du diamètre de collecteur. La tendance de la courbe de la puissance générée selon le diamètre du collecteur est parabolique.

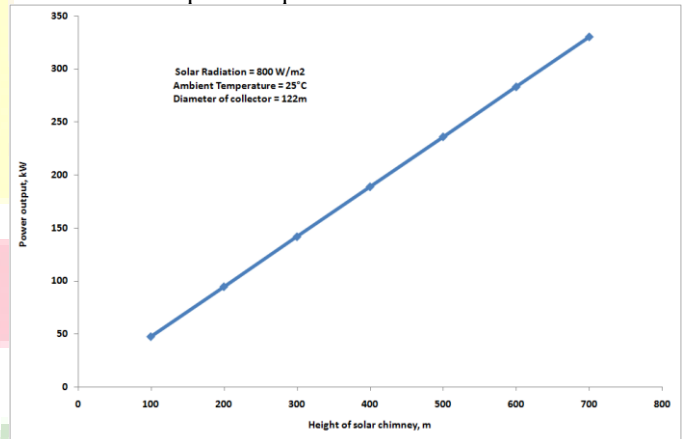


Fig. 10: Influence de la hauteur de la tour sur la puissance produite par SCPP

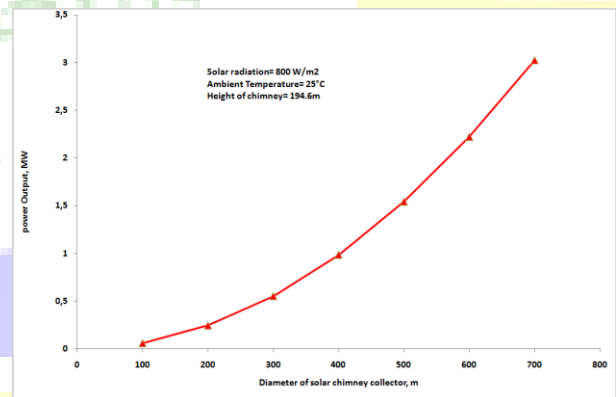


Fig. 9: Influence du collecteur de diamètre en sortie de puissance

Nous avons utilisé l'équation 17 du modèle pour trouver l'effet de la hauteur de la cheminée. On constate que la puissance générée dépend beaucoup plus de la hauteur de la cheminée. L'effet de la hauteur de la cheminée sur la puissance de SCPP à Chlef pour une valeur de rayonnement solaire de 800W / m², une température ambiante de 25 ° C, et un diamètre de collecteur de 122m est montré sur la figure 10.

IV. CONCLUSION

Cet article a discuté les résultats de la simulation d'une centrale solaire à cheminée à Chlef en Algérie. A cet effet, un modèle théorique a été développé pour décrire le processus de la cheminée solaire. Le modèle est utilisé pour prédire la puissance électrique produite par la cheminée solaire en utilisant les dimensions typiques de la cheminée solaire de



Le 5^{ème} Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables

The 5th International Seminar on New and Renewable Energies

Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,
Gharadaïa - Algeria 24 - 25 Octobre 2018



Manzanares et les données météorologiques de la région de Chlef. Les résultats montrent que l'énergie électrique produite par SCPP peut atteindre 0,108 MW en juin et 63 kW en janvier. Les résultats de simulation montrent que puissance générée peut être améliorée si nous augmentons la hauteur de la tour ou le diamètre du collecteur.

References

- [1] [1] Xu B, Li P, Chan C. Application of phase change materials for thermal energy storage in concentrated solar thermal power plants: a review to recent developments. *Appl Energy* 2015; 160:286–307.
- [2] [2] <http://www.tour-solaire.fr/wiki-def-cheminee-solaire>. [accessed 28/02/2018].
- [3] [3] www.bluejean.fr/mysteres/centrale-solaire.php. [accessed 28/02/2018].
- [4] [4] Schlaich Bergermann und Partner. *The solar chimney*. Structural Consulting Engineers; 2005.
- [5] [5] Penghua Guo, Jingyin Li , Yunfeng Wang, Yuan Wang, Evaluation of the optimal turbine pressure drop ratio for a solar chimney power plant, *Energy Conversion and Management* 108 (2016) 14–22.
- [6] [6] Guo PH, Li JY, Wang Y, Liu YW. Numerical analysis of the optimal turbine pressure drop ratio in a solar chimney power plant. *Sol Energy* 2013;98:42–8.
- [7] [7] Von Backström TW, Gannon AJ. Solar chimney turbine characteristics. *Sol Energy* 2004;76:235–41.
- [8] [8] Schlaich J. *The solar chimney – electricity from the sun*. Stuttgart: Axel Menges; 1995
- [9] [9] O. Joneydi Shariatzadeh, A.H. Refahi, S.S. Abolhassani, M. Rahmani, Modeling and optimization of a novel solar chimney cogeneration power plant combined with solid oxide electrolysis/fuel cell, *Energy Conversion and Management* 105 (2015) 423–432.

