

ÉTUDE D'UNE EVENTUELLE IMPLANTATION DANS LES HAUTS-PLATEAUX D'UNE CENTRALE À CHEMINÉE SOLAIRE

KHERRIS Sahraoui¹, ZEBBAR Djalle², MEKROUSSI Said³, MOSTEFA Kouider⁴ et SAIDI Lilia⁵

^{1,2,4,5}Institut des Sciences et de la Technologie, Centre Universitaire El-Wancharissi de Tissemsilt, 38000, Tissemsilt, Algérie

³Département de génie mécanique, Université Ibn Khaldoun de Tiaret, 14000, Algérie
Emails: Kherris.sahraoui@gmail.com, djallel.zebbar@gmail.com, mekroussi_said@yahoo.fr, etude.ist.cut@gmail.com saidililia@hotmail.fr

RÉSUMÉ

Le présent travail est consacré à l'étude de faisabilité d'une éventuelle implantation d'une centrale à cheminée solaire (CCS) destinée pour la production d'énergie électrique au niveau des hauts-plateaux algériens. La localité en question est à 865 m d'altitude, 35,36° de latitude et 1,81° de longitude. Une modélisation mathématique de la CCS basée sur le modèle de PERRIN Brichambaut pour le calcul du rayonnement solaire à été élaborée. Les résultats obtenus ont été présentés et interprétés pour deux périodes : estivale (le 15 juillet) et hivernale (le 15 décembre). Une comparaison des résultats obtenus de l'irradiation solaire avec ceux du Centre de Développement des Energies Renouvelables (CDER) à été effectuée.

Mots Clés: centrale solaire; tour solaire; puissance électrique; diamètre du collecteur; hauteur de cheminée.

NOMENCLATURE

p : Pression, Pa	TSV : Temps solaire vrai, heures
T : Température, K	V _c : Vitesse de l'air à la sortie du collecteur (entrée de la cheminée), m/s
ΔT : Différence de température, K	Δp : Différence de pression, Pa
m : Débit massique, Kg/s	K : Conductance thermique du capteur, W/m ² . °C
S : Entropie, J/K	α* : Coefficient de réflexion du sol, w/m ²
A _c : Section transversale de la cheminée, m ²	Symboles grecques :
A : Surface, m ²	ρ : Masse volumique, Kg/ m ³
C _p : Capacité calorifique massique à pression constante du fluide, J/Kg. K	η : Rendement
D _{c,t} : Diamètre de la cheminée, m	Indices :
H _{c,t} : Hauteur de la cheminée, m	a : Ambiante.
D _{coll} : Diamètre du collecteur, m	c : Cheminée.
H _{coll} : Hauteur du collecteur, m	coll : Collecteur.
E : Eclairement solaire, W/ m ²	elec : Electrique.
g : Accélération de la pesanteur, Kg / m. s ²	tur : Turbine.
P : Puissance électrique, W	

1. INTRODUCTION

Depuis plus d'un siècle, il est devenu clair de remarquer l'importante croissance de la demande énergétique que connaît le marché mondial ou cette demande a été couverte par l'utilisation des sources d'énergie d'origine fossile qui arrivent à leurs limites. La grande partie de l'énergie électrique consommée provient des combustibles fossiles (pétrole, gaz naturel, charbon, ...etc) dont l'utilisation massive peut conduire à

l'épuisement de ces réserves et menace réellement l'environnement. Cette menace c'est manifesté à travers des changements climatiques planétaires liés aux rejets de dioxyde de carbone provenant de la combustion d'énergies fossiles qui est le principal gaz responsable du renforcement de l'effet de serre, ce qui ouvre les portes à une course vers de nouvelles sources d'énergie ou de nouveaux procédés permettant d'obtenir d'avantage d'énergie. Pour cela, la question de la préservation de l'environnement a occupé une place grandissante dans les pays développés. En effet, en 1992 lors de la conférence de Rio et plus tard, en 1997, lors du protocole de Kyoto, la plupart des états ont pris des engagements pour lutter contre les émissions de gaz à effet de serre afin de contribuer à la préservation de l'environnement et de l'équilibre climatique. Dans ce contexte, le développement des énergies renouvelables est apparu comme une réponse à apporter et à soutenir en particulier l'énergie solaire. En outre, l'Algérie est l'un des pays de la méditerranée qui dispose d'un potentiel énergétique solaire très élevé. Selon les données d'ensoleillement, l'Algérie est comptée parmi les pays les plus ensoleillés dans le monde. Le potentiel des ressources solaires de ce pays est optimal pour l'exécution des projets solaires pour la production de l'énergie électrique.

La tour solaire à effet de cheminée est l'un des moyens pour la production de l'énergie électrique, c'est une centrale à énergie renouvelable, construite de manière à canaliser l'air chauffé par le soleil afin d'actionner des turbines pour produire de l'électricité en utilisant le rayonnement solaire. Le concept a été initialement proposé par l'ingénieur allemand Jörg Schlaich en 1968 [1-4].

De 1980 à 1989, un prototype dans Manzanres a été développé, construit et testé [2-3, 5], La cheminée a une hauteur de 195 m et un diamètre de 10 m. La surface du collecteur (effet de serre) est de 46 m². La puissance maximale générée est de 50 kW, ce dernier a pu délivrer une puissance de 50 KW. Selon Padki et Sherif [6] et Schlaich [5], les zones désertiques et les zones subtropicales sont d'un intérêt primordial pour les moyennes et grandes SC. Les centrales solaires de cheminée peuvent également être utilisées dans des conditions exceptionnelles [7-8-9].

B. Mebarki et al. [10] avaient effectué une étude analytique d'une cheminée solaire dans le sud-ouest de l'Algérie. Les résultats obtenus montrent que la tour solaire peut produire 100 à 200 kilowatts de l'électricité et elle peut atteindre 1.8 MW pour un diamètre de 3000 m et une hauteur de 200 m.

S. Larbi et al. [11] avaient présenté une analyse des performances énergétiques d'une CCS prévue pour fournir de l'énergie électrique aux villages isolés situés dans la région du sud-ouest algérienne. L'énergie solaire et l'état psychométrique de l'air dans le sud de l'Algérie sont importants pour encourager pleinement le développement des cheminées solaires soit pour la production de l'énergie thermique ou électrique pour de divers usages. Les auteurs se sont intéressés par la ville d'Adrar là où le rayonnement solaire est important. Les résultats obtenus prouvent que la CCS peut produire à partir de 140 à 200 kW d'électricité sur un site comme celui d'Adrar pendant toute l'année, selon une évaluation faite sur la moyenne mensuelle d'ensoleillement.

M. Tingzhen et al. [12] ont présenté une méthode de simulation numérique pour le système de centrale électrique de la cheminée solaire avec la turbine, ils ont trouvé pour une cheminée solaire avec une cheminée de 400m de hauteur et 30m de rayon, un collecteur 1500 m de rayon et une turbine à 5 lames, la puissance maximale et l'efficacité de turbine est de 10MW et 50 %, respectivement.

E. Bilgen et J. Rheault [13] ont présenté des études sur les cheminées solaires aux hautes latitudes. Pour les évaluer, ils ont développé un modèle mathématique calculé sous MATLAB, basé sur les données mensuelles moyennes météorologiques et un cycle thermodynamique, la performance thermique de la production nominale d'une centrale de 5 MW à trois emplacements au Canada, a été étudiée. Les résultats ont montré que la

performance thermique complète pour des cheminées solaires aux hautes latitudes est environ 0.48 %, qui est légèrement meilleure que celle avec des collecteurs horizontaux aux emplacements du sud avec le climat favorable.

A. Koonsrisuk, T. Chitsomboon [13] ont proposé une étude d'une variable de similitude simple sans dimensions pour la cheminée solaire qui s'est avérée être valable pour un cas entièrement semblable et un cas partiellement semblable. Ceci doit rendre l'étude expérimentale d'une cheminée solaire plus simple et plus économique.

La littérature disponible concernant l'étude numérique de la convection naturelle proprement dite dans la cheminée solaire est rare, car la recherche se concentre surtout sur l'évaluation de la performance globale de ces systèmes.

Dans ce contexte, R.M.Valle et M.F.Cortez [14] ont conduit la première simulation numérique de la convection naturelle laminaire dans une tour solaire. Pour la prédiction du comportement thermo-hydrodynamique du système, le modèle mathématique (équations de bilan de la quantité de mouvement et de l'énergie) a été exploité en utilisant la méthode des volumes finis en coordonnées généralisées. La solution est obtenue pour un domaine de calcul fixe, indépendant de la forme géométrique du système physique. Cette méthodologie permet une visualisation détaillée des effets géométriques sur les champs de vitesse et de température qui sont très importants pour la définition de la géométrie et des caractéristiques opérationnelles optimales de tels systèmes. Ils ont proposé un système d'équations différentielles elliptiques pour la génération de maillage pour un système bidimensionnel, et une méthode pour la transformation du système de coordonnées.

L'objectif de ce présent travail est consacré à l'étude de l'influence de certains paramètres géométriques et physiques, à savoir le diamètre du collecteur, la hauteur de la cheminée et le rayonnement solaire sur la puissance électrique délivrée ainsi que la faisabilité d'implantation d'une CCS au niveau de la localité de Tissemsilt.

2. MODELESATION MATHEMATIQUE

La CCS étudié est composée de trois éléments essentiels : un capteur solaire (collecteur), la cheminée située dans le centre du collecteur et l'unité de conversion de puissance (PCU) qui comprend une ou plusieurs turbines génératrices [1, 15]. Les turbines sont entraînées par l'air produit par la flottabilité résultant de l'effet de serre à l'intérieur du collecteur (figure 1).

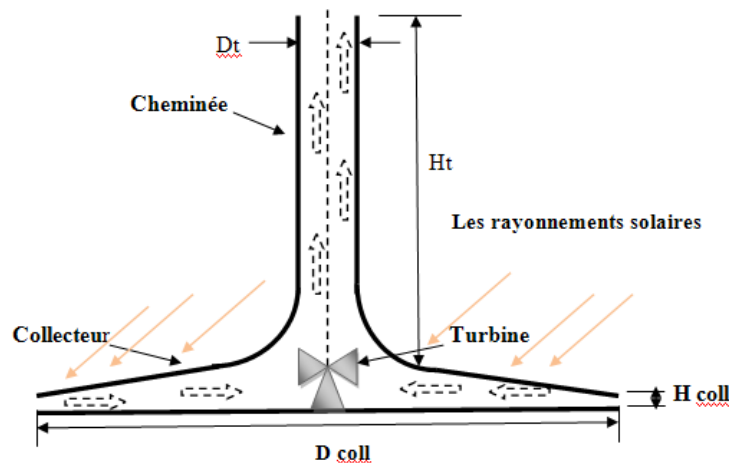


FIGURE 1. Schéma représentatif d'une centrale à cheminée solaire

2.1. CYCLE THERMODYNAMIQUE DE LA CHEMINÉE SOLAIRE

Le fonctionnement de la cheminée solaire exige la présence de l'air, qui transporte la chaleur obtenue dans le collecteur à partir des rayons solaires vers l'ensemble des dispositifs qui sont capables d'exploiter cette énergie thermique, en la transformant en énergie cinétique. L'air sort de la cheminée, ce qui permet d'introduire l'air frais au collecteur pour subir le cycle (figure 2).

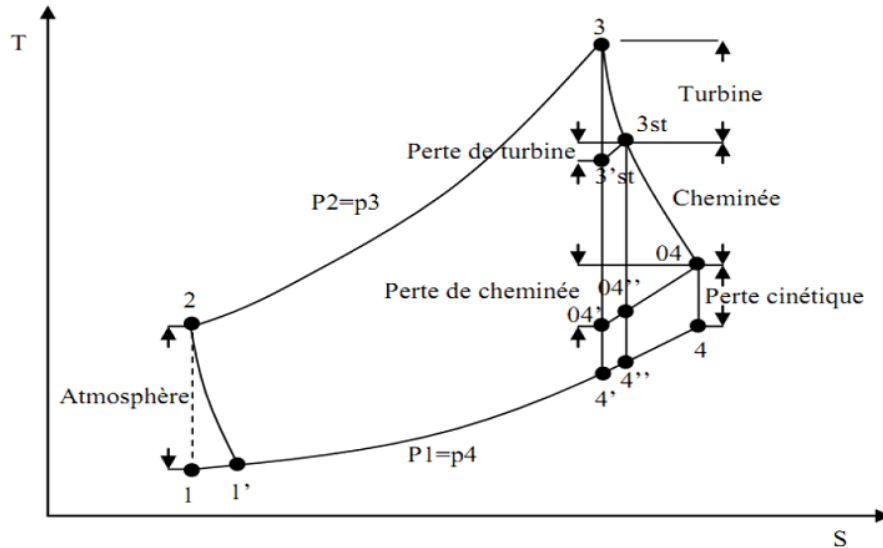


FIGURE 2. Cycle réel de la cheminée solaire [16]

2.2. CHEMINÉE

L'efficacité de la cheminée est définie par:

$$\eta_c = \frac{P_{\text{utile}}}{P_{\text{solaire}}} \quad (1)$$

$$P_{\text{solaire}} = m \cdot C_p \cdot (T_3 - T_2) = m \cdot C_p \cdot \Delta T_{23} \quad (2)$$

La puissance utile est donnée par la relation suivante :

$$P_{\text{utile}} = \frac{g \cdot H_c}{C_p T_2} \cdot \rho_{\text{coll}} \cdot A_c \cdot V_c \cdot \Delta T_{23} \quad (3)$$

et la différence de pression totale qui est produite entre l'entrée et la sortie de la cheminée est :

$$\Delta P_{\text{tot}} = \rho_{\text{coll}} \cdot g \cdot H_c \cdot \frac{\Delta T_{23}}{T_2} \quad (4)$$

2.3. COLLECTEUR

L'efficacité du collecteur est exprimée par le rapport :

$$\eta_{\text{coll}} = \alpha^* - k \frac{\Delta T_a}{E} \quad (5)$$

2.4. LA TURBINE

La puissance mécanique maximale donnée par la turbine est :

$$\Delta P_{tur,max} = \frac{2}{3} \frac{\eta_{coll} \cdot A_{coll} \cdot E \cdot H_c}{C_p \cdot T_a} \quad (5)$$

La puissance électrique délivrée par la cheminée est :

$$P_{elc} = \frac{2}{3} \frac{g \cdot \eta_{coll} \cdot A_{coll} \cdot \eta_{tur} \cdot E \cdot H_c}{C_p \cdot T_a} \quad (6)$$

3. RESULTATS ET DISCUSSION

Pour voir l'influence de l'éclairement solaire, le diamètre du collecteur et la hauteur de la cheminée sur la puissance délivrée par la tour solaire pendant les journées 15 décembre (période hivernale) et le 15 juillet (période estivale), des courbes ont été tracées traduisant les variations suivantes :

- La variation de l'éclairement solaire journalier en fonction du temps,
- La puissance journalière produite en fonction du temps,
- La puissance journalière produite en fonction du diamètre du collecteur,
- La puissance journalière produite en fonction de la hauteur de la tour.

3.1. LA VARIATION DE L'ECLAIREMENT SOLAIRE JOURNALIER EN FONCTION DU TEMPS

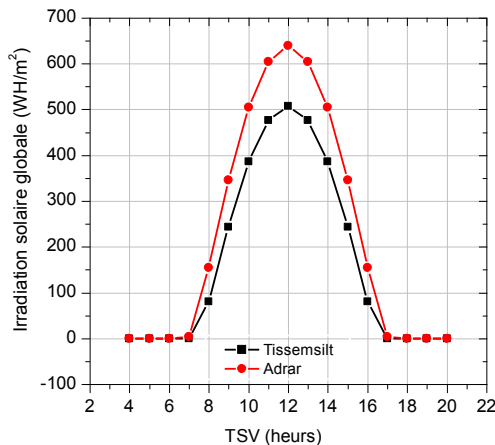


FIGURE 3. La variation de $I = f(\text{TSV})$ pour le mois de décembre

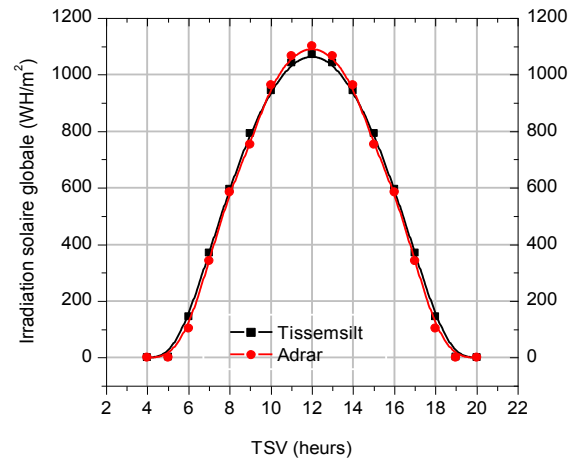


FIGURE 4. La variation de $I = f(\text{TSV})$ pour le mois de juillet

Les figures 3 et 4 représentent l'évolution de l'éclairement solaire journalier pour les deux périodes choisies. L'examen des deux figures fait ressortir que pour un ciel clair, la radiation solaire varie au cours de la journée d'une manière Gaussienne. Elle est faible au voisinage du lever et du coucher du soleil ce qui correspond à une hauteur de soleil nulle et elle atteint le maximum au milieu de la journée c'est-à-dire à midi solaire quand la hauteur du soleil est maximale.

3.2. LA VARIATION DE LA PUISSANCE JOURNALIÈRE PRODUITE EN FONCTION DU TEMPS

Les figures 5 et 6 illustrent la puissance délivrée en fonction du temps solaire pour les deux localités Adrar et Tissemsilt. On remarque que la puissance développée est beaucoup plus élevée durant le mois de juillet en comparaison avec le mois de décembre, car l'éclairement solaire reçu au niveau du collecteur est très élevé dans ce mois. En juillet, la ville de Tissemsilt reçoit une quantité considérable du rayonnement solaire, le pic des radiations apparait a midi, approximativement il est de l'ordre de 1074Wh/m^2 correspondant à une puissance de 94365.88W tandis qu'en mois de décembre le pic d'éclairement est de l'ordre de 508Wh/m^2 qui représente la moitié de la puissance délivrée le mois de juillet qui est de l'ordre de 44634.88W pour la localité de Tissemsilt. On peut conclure que l'efficacité du système est importante durant la période estivale. Il est à souligner que la puissance produite au niveau de la localité d'Adrar est supérieure à celle produite à Tissemsilt en raison de l'irradiation solaire de chaque localité.

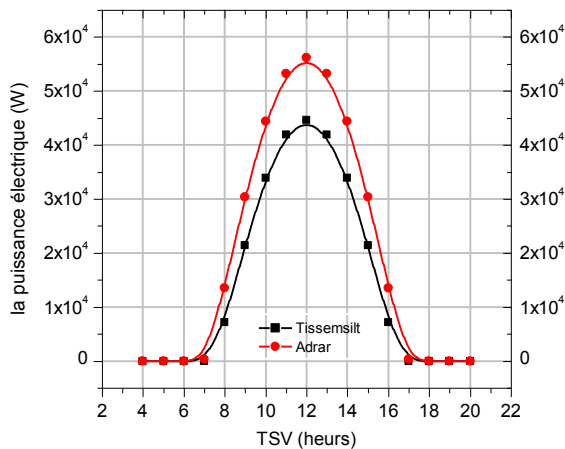


FIGURE 5. La variation de la $P_{elec} = f(\text{TSV})$ pour le mois de décembre

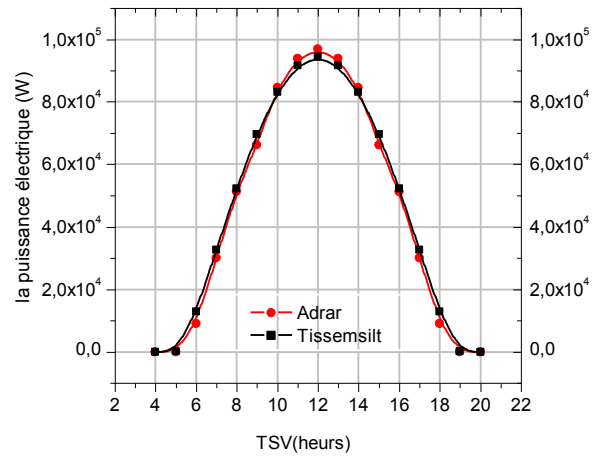


FIGURE 6. La variation de la $P_{elec} = f(\text{TSV})$ pour le mois de juillet

3.3. LA VARIATION DE LA PUISSANCE JOURNALIÈRE PRODUITE EN FONCTION DU DIAMETRE DU COLLECTEUR

Les figures 7, 8, 9 et 10 montrent l'évolution de la puissance journalière produite par la tour solaire pour différents diamètres du collecteur. La lecture de ces figures permet de ressortir que la puissance générée augmente avec l'augmentation du diamètre du collecteur.

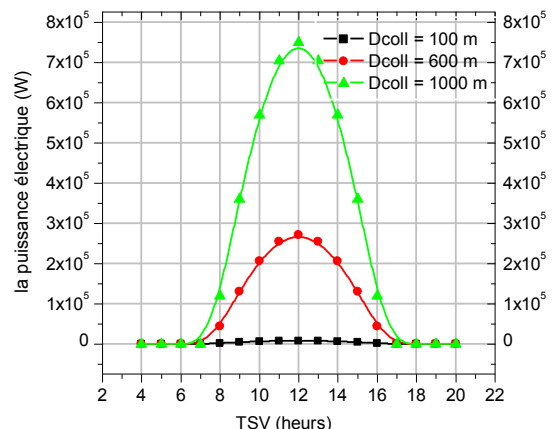
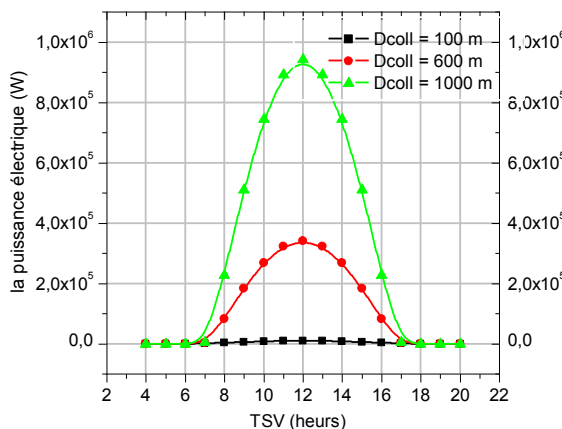


FIGURE 7. Puissance journalière produite pour différents diamètres du collecteur pour le moi de décembre pour la localité d'Adrar

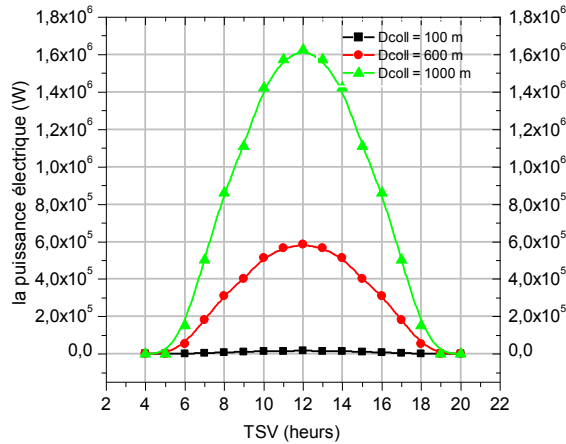


FIGURE 8. Puissance journalière produite pour différents diamètres du collecteur pour le moi de décembre pour la localité de Tissemsilt

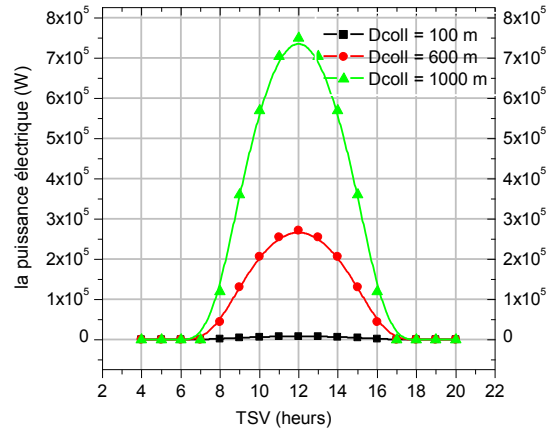


FIGURE 9. Puissance journalière produite pour différents diamètres du collecteur pour le moi de juillet pour la localité d'Adrar

FIGURE 10. Puissance journalière produite pour différents diamètres du collecteur pour le moi de décembre pour la localité de Tissemsilt

La figure 10 montre que pour une hauteur de 195 m, presque 1.58 MW d'électricité peuvent être produite par une tour ayant un diamètre de collecteur de 1000 m pour la localité de Tissemsilt.

3.4. LA VARIATION DE LA PUISSANCE JOURNALIÈRE PRODUITE EN FONCTION DE LA HAUTEUR DE LA TOUR

Les figures 11 à 14 présentent la variation de la puissance journalière produite pour les différentes hauteurs pour les mois de juillet et décembre. L'examen de ces figures montre que l'augmentation de la hauteur de la tour solaire conduit à une augmentation de la puissance électrique produite. On constate d'après la figure 14 avec un diamètre du collecteur constant (245 m) que pour la période estivale, on peut produire une puissance maximale à la localité de Tissemsilt de :

- 290953.40W avec une cheminée de 600 m de hauteur,
- 145476.7 W avec une cheminée de 300 m de hauteur,
- 48492.23 W avec une cheminée de 100 m de hauteur.

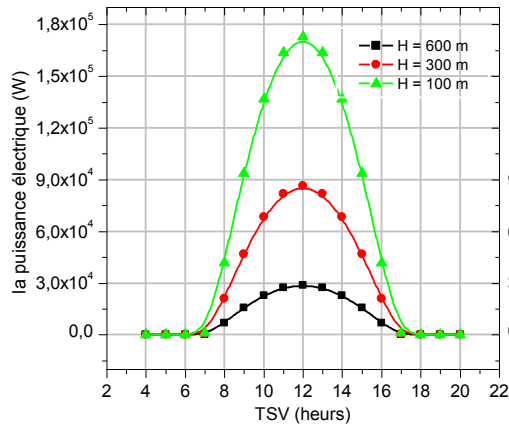


FIGURE 11. Puissance journalière produite pour différentes hauteurs de la cheminée pour le moi de décembre pour la localité d'Adrar

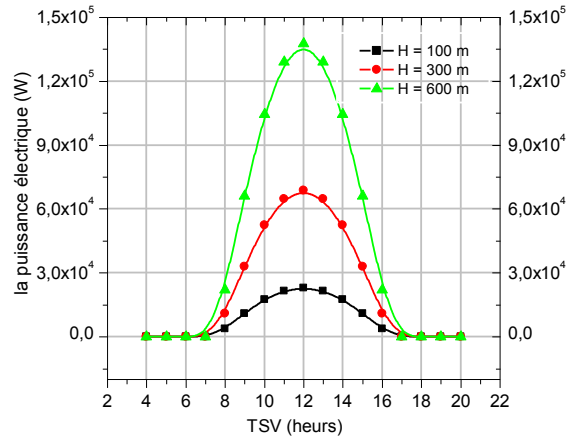


FIGURE 12. Puissance journalière produite pour différentes hauteurs de la cheminée pour le moi de décembre pour la localité de Tissemsilt

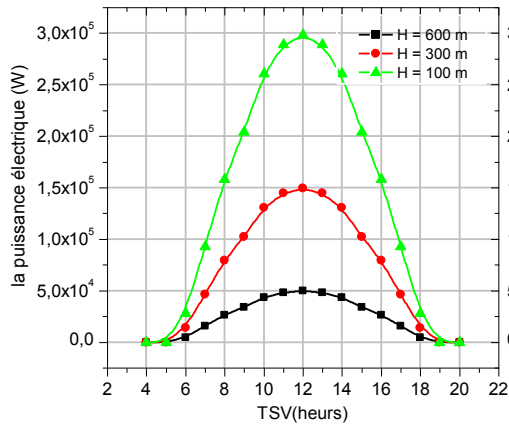


FIGURE 13. Puissance journalière produite pour différentes hauteurs de la cheminée pour le moi de juillet pour la localité d'Adrar

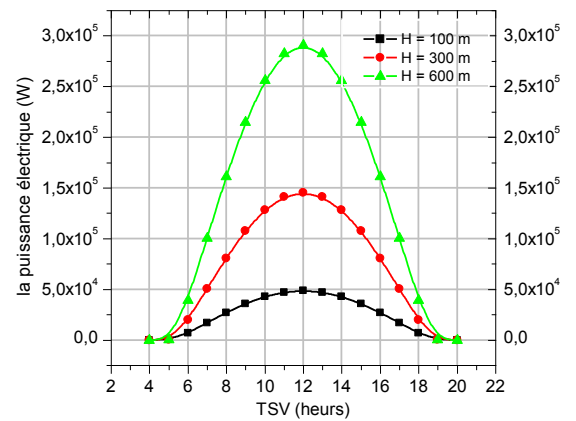


FIGURE 14. Puissance journalière produite pour différentes hauteurs de la cheminée pour le moi de juillet pour la localité de Tissemsilt

3.5. COMPARAISON DES RESULTATS DE L'IRRADIATION SOLAIRE

Une comparaison des résultats de l'irradiation solaire obtenue par cette présente étude et ceux du centre de développement des énergies renouvelables CDER à été effectuée.

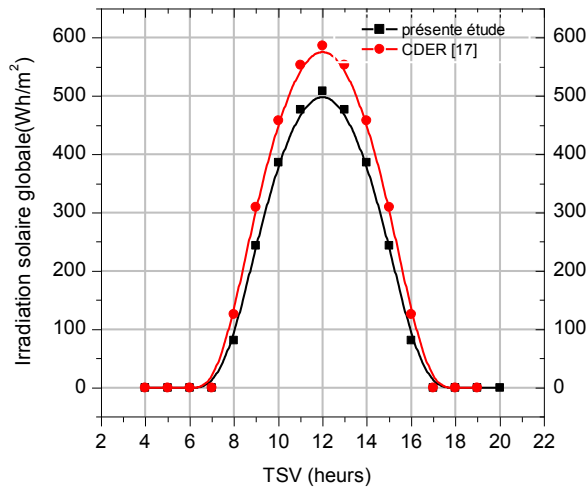


FIGURE 15. La comparaison des résultats de l’irradiation solaire pour le 15 décembre - Tissemsilt

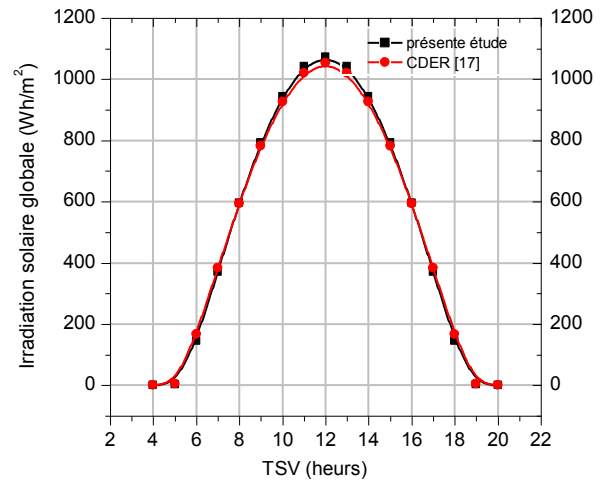


FIGURE 16. La comparaison des résultats de l’irradiation solaire pour le 15 juillet - Tissemsilt

L’examen des figures 15 et 16, fait ressortir la bonne concordance des résultats avec une erreur moyenne est inférieure à 4 %.

3.6. LA FAISABILITE D’IMPLANTATION D’UNE CENTRALE SOLAIRE A EFFET DE CHEMINEE AU NIVEAU DE LA LOCALITE DE TISSEMSILT

Pour un meilleur fonctionnement, une cheminée solaire doit être construite dans une région très ensoleillée. L’Algérie est donc parmi les endroits les plus favorables au monde. Par ailleurs, l’ensoleillement moyen est estimé à 1944 kWh/m² sur une durée annuelle de 2999 h au niveau de Tissemsilt soit favorable pour une éventuelle étude de la tour solaire à effet de cheminée à la localité en question.

La puissance électrique (KW)	50 KW	100 KW	500 KW
Hauteur de cheminée (m)	154.89	309.78	1548.92
Diamètre de collecteur (m)	217.51	307.61	687.85

TABLEAU 1. La variation du diamètre et de la hauteur de la cheminée en fonction de la puissance électrique délivrée à la localité de Tissemsilt.

Le tableau 1 illustre les variantes de la faisabilité d’implantation d’une centrale solaire à effet de cheminée à la localité de Tissemsilt. Trois puissances sont proposées 50, 100 et 500 KW afin de déterminer la hauteur et le diamètre. L’étude de faisabilité montre que pour un diamètre et une hauteur égaux à 280 m, la puissance délivrée est la même. En dessous de cette valeur, l’influence de H est dominante. Au de là de cette valeur l’influence du diamètre est dominante et la puissance délivrée peut atteindre 1000 KW pour une hauteur de 1000 m, tandis que pour la même valeur de diamètre de 1000 m, la puissance délivrée n’est que 300 KW. On peut conclure que pour augmenter la puissance électrique délivrée par la cheminée il suffit de jouer sur le diamètre du collecteur.

4. CONCLUSIONS

A l'issue du travail effectué, les conclusions suivantes peuvent être établies :

- un programme sous l'environnement FORTRAN basé sur la détermination du rayonnement solaire selon le modèle de PERRIN Brichambaut à été élaboré,
- la radiation solaire varie au cours de la journée d'une manière Gaussienne. Elle est faible au voisinage du lever et du coucher du soleil ce qui correspond à une hauteur de soleil nulle et elle atteint le maximum au milieu de la journée c'est-à-dire à midi solaire quand la hauteur du soleil est maximale,
- la puissance développée est beaucoup plus élevée du mois de juillet que le mois de décembre, car l'éclairement solaire reçu au niveau du collecteur est très élevé dans ce mois,
- l'augmentation de la hauteur du tour solaire ainsi que le diamètre du collecteur conduit à une augmentation de la puissance électrique produite,
- la comparaison des résultats de l'irradiation solaire obtenus par cette présente étude et ceux du CDER montre la bonne concordance,
- la tour solaire peut produire 100 à 200 kilowatts d'électricité. Elle peut atteindre 1000 kW pour un diamètre de 1000 m et une hauteur de 200 m. Cette production est suffisante pour répondre aux besoins des petits villages.

REFERENCES

- [1] Amel Dhahri, Ahmed Omri, A Review of solar Chimney Power Generation Technology, *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)*, Vol. 2, Issue-3, pp. 1-17, February 2013.
- [2] 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 Solar Energy*, vol. 2, pp. 3-20, 1983.
- [3] W. Haaf, —Solar Chimneys - Part II: Preliminary Test Results from the Manzanares Pilot Plant, *International Journal of Solar Energy*, 2 (2), pp.141–161, 1984.
- [4] S. Terol, The present state of research at the solar chimney power plant in Manzanares (Spain) and future prospects for large scale plants, in Proc. *International Congress on Renewable Energy Sources*, vol.1,p.1644,1 987.
- [5] Schlaich, J., 1995. The Solar Chimney. *Edition Axel Menges*, Stuttgart.
- [6] Padki, M.M., Sherif, S.A., Solar chimney for medium-to-large scale power generation. In: *Proceedings of the Manila International Symposium on the Development and Management of Energy Resources*, vol. 1, Manila, Philippines, pp. 432–437, 1989.
- [7] Bilgen, E., Rehault, J., Solar chimney power plants for high latitudes. *Solar Energy*, 79, pp. 449–458, 2005.
- [8] Nizetic, S., Ninic, N., Klarin, B., Analysis and feasibility of implementing solar chimney power plants in the Mediterranean region. *Energy*, 33, pp. 1680–1690, 2008.
- [9] N. Ninic, S. Nizetic., Elementary theory of stationary vortex columns for solar chimney power plants. *Solar Energy* 83, 462–476, 2009.

- [10] B. Mebarki, B. Draoui, B. Allaoui, M. Djilali, L. Rahmani, Etude analytique d'une tour solaire à effet de cheminée destinée pour la production d'énergie électrique au sud ouest de l'Algérie, *International Conference en Electrical Engineering (CIGE'2013) 17-19 November 2013*, Bechar, Algeria
- [11] 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 Reviews*, Vol. 14, N°1, pp. 470 – 477, 2010.
- [12] M. Tingzhen, L. Wei, Yanbin, G. Xuhu, P. Yuanb, Numerical simulation of the solar chimney power plant systems coupled with turbine, *Renewable Energy* 33, 897–905, 2008.
- [13] A. Koonsrisuk, T. Chitsomboonont, A single dimensionless variable for solar chimney power plant modeling, *Solar Energy*, Vol. 83, pp. 2136–2143, 2009.
- [14] R.M. Valle et M.F. Cortez, numerical analysis of natural laminar convection in a radial solar heater, *Int. J. Therm. Sci.* 38, pp. 42-50, 1999.
- [15] Xiping Zhou, Fang Wang, Reccab M. Ochieng., A review of solar chimney power technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14 (8), 2315–2338, 2010.
- [16] CHELOUFI, D., Réalisation et expérimentation d'une cheminée solaire, *mémoire de master*, université Kasdi Merbah Ouargla, pp. 18 – 29, 2013-2014.
- [17] Rédha Yaiche et Abdellah Bouhanik, Atlas solaire algérien, *Centre de Développement des Energies Renouvelables*, EISSN/ISSN 1112-3850, 2013.