

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur  
et de la Recherche Scientifique



**Ecole Nationale Polytechnique**

**Département de Génie Mécanique**

**Projet de Fin d'Etudes en vue de l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat en  
Génie Mécanique**

Thème

**Détermination des performances énergétiques  
d'une centrale à cheminée solaire au sud Algérien**

Présenté par :

**MAY Yaaqoub**

Dirigé par :

**Salah LARBI, Prof., ENP**

**Promotion : Juin 2014**

## ملخص :

إن العمل المقدم في هذه المذكرة يتمثل في تحليل و تحديد أداء المدخنة الشمسية في جنوب الجزائر اعتمادا على الظروف المناخية والبيئية. وقد تم اختيار موقعي، أدرار و بشار نظرا لامتلاكهما طاقة شمسية مهمة عن قاعدة البيانات المتاحة عن درجة الحرارة المحيطة والإشعاع السنوي في هذه المنطقة. وقد أظهرت النتائج أن الإشعاع الشمسي لديه تأثير كبير على الطاقة الكهربائية المنتجة، على عكس درجة الحرارة المحيطة فإنها لا تؤثر بما يكفي. وأظهر تحليل أداء الطاقة في المحطتين أن مركز أدرار هو أكثر كفاءة.

## الكلمات الرئيسية :

محطة المدخنة الشمسية لتوليد الطاقة ؛ حساب الفعالية الطاقوية ؛ الإشعاع الشمسي ؛ درجة الحرارة المحيطة ؛ موقع Manzanares .

## Résumé :

*Le travail présenté dans ce mémoire est relatif à l'analyse et à la détermination des performances énergétiques d'une centrale à cheminée de la région sud algérienne en fonction des conditions climatiques et environnementales. Les deux sites, Adrar et Béchar ont été choisis compte tenu de la banque des données expérimentales disponible qui relative à la température ambiante et à l'Irradiation solaire annuel dans ces deux régions. Les résultats obtenus ont montré que l'irradiation solaire à une grande influence sur la puissance électrique produite et que la température ambiante n'influe pas assez sur la puissance produite. L'analyse de la détermination des performances énergétiques sur les deux centrales a montré que la centrale d'Adrar est plus performante.*

**Mots clés :** Centrale cheminée solaire ; Calcul des performances énergétiques ; Irradiation solaire ; Température ambiante ; Site de Manzanares.

## Abstract:

*The presented work is related to energy performances analysis of solar chimney power plant in south Algeria region, taking into account the weather and environmental conditions. Two sites, Adrar and Bechar, have chosen in this study according to the availability of annual experimental data of ambient temperature, and solar irradiation. Obtained results showed that the solar irradiance intensity influence is more important than ambient temperature on electrical power production and then Adrar site is the most performed.*

**Keywords:** Solar chimney power plant; Energy performance calculation; Solar irradiation; Ambient temperature; Manzanares site.

## *Remerciements*

*Avant tout, je remercie ALLAH tout puissant de m'avoir donné la volonté et le courage de mener à bien ce travail.*

*Je tiens à exprimer ma sincère reconnaissance et ma profonde gratitude à mon Promoteur, Monsieur Salah LARBI, Professeur à l'E.N.P, pour m'avoir fait confiance, pour m'avoir donné l'honneur de travailler à ses coté et pour m'avoir accompagné dans mes premiers pas dans le monde de la recherche, pour son soutien moral, ces remarques, ces encouragements et sa disponibilité permanente.*

*Je tiens à remercier également tous les membres de jury qui m'ont fait l'honneur d'accepter de juger le travail développé dans ce mémoire : Monsieur Bouzid Benkoussas, Maître de Conférence - A à l'E.N.P, président de jury et Monsieur Mohamed Tarek ATTOUCHI, Maître assistant- A à l'E.N.P. Examineur.*

*Un grand merci à monsieur R.Yaïche ingénieur au CDER pour les données radiométriques.*

# *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail à mes très chers parents  
Qui ont toujours été là pour moi, qui m'ont soutenu  
dans les moments difficiles tout le long de mon cursus  
qui m'ont donné un magnifique modèle de labeur  
et de persévérance « Que DIEU vous protège ».*

*A mes frères et sœurs à qui je souhaite  
toute la réussite dans leurs vies.*

*A mon petit frère chafik,  
à qui je souhaite de suivre la voie des études,  
de la science, et d'intégrer une grande école.*

*A mon ami depuis le tronc commun  
KERRACHE Massipssa (l'Acteur),*

*A ma très chère amie Chafia qui ma toujours soutenu.*

*A ma cousine Nassima et Lamia*

*A tous mes cousins Wahid, Loucf, Yousseme, Hamza,  
Boulouch, Wlid BENCHEGRA*

*A toute ma famille aussi nombreuse quelle soit.*

*Merci à tous.*

*Yaaqoub*

# Tables des matières

<b>Introduction générale.....</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre I : Généralités sur l'énergie solaire.....</b>	<b>3</b>
I.1. Le Soleil .....	4
I.2. La constante Solaire .....	4
I.3. Energie solaire .....	5
I.4. Aspect géométrique de l'énergie solaire .....	8
I.5. L'énergie solaire en Algérie .....	20
<b>Chapitre II: Centrales à cheminée solaire .....</b>	<b>24</b>
II.1. Introduction .....	25
II.2. Historique .....	25
II.3. Principaux éléments de la cheminée solaire .....	25
II.4. Principe de fonctionnement de la CCS .....	28
II.5. Système de stockage .....	29
II.6. Avantages et les inconvénients .....	30
II.7. Projets .....	30
II.8. Coûts .....	37
II.9. Coûts de production d'énergie .....	37
<b>Chapitre III: Etat de l'art sur les centrales à cheminée solaire .....</b>	<b>38</b>
III.1 Etudes théoriques .....	39
III.2 Etudes expérimentales .....	47
<b>Chapitre IV: Modélisation mathématique des flux énergétiques dans les centrales à cheminée solaire .....</b>	<b>53</b>
IV.1. Introduction .....	54
IV.2. Paramètres influençant le fonctionnement d'une centrale à cheminée solaire .....	55
IV.3. Modélisation mathématique .....	56
IV.4. Détermination des performances énergétiques .....	58
IV.5. Conclusion .....	67
<b>Chapitre V: Calcul des performances énergétiques des centrales à cheminée solaire.....</b>	<b>68</b>
V.1 Introduction .....	69
V.2 Calcul de la puissance électrique de la CCS .....	70
V.3 Calcul des performances de la tour solaire d'Adrar .....	73
V.4 Calcul des performances de la tour solaire de Béchar .....	80
V.5 Comparaison entre la tour solaire d'Adrar et celle de Béchar .....	88
<b>V.6 Comparaison entre le rayonnement solaire mesuré et le rayonnement calculé.....</b>	<b>91</b>
V.7 Conclusion .....	94
<b>Conclusion générale .....</b>	<b>95</b>
<b>Références bibliographiques .....</b>	<b>98</b>

# Nomenclature

➤ **Lettres latin :**

Symbole	Définition	Unité
$A_C$	Section de passage	$m^2$
$A_{Coll}$	Surface du collecteur	$m^2$
$C_p$	Chaleur spécifique	$J/(kg \cdot K)$
$d_{Ts}$	Distance terre - soleil	$m$
$g$	Accélération due à la gravité	$m/s^2$
$G$	Irradiation solaire globale sur une surface horizontale	$W/m^2$
$h$	Hauteur du soleil	$m$
$H$	Angle horaire	$m$
$H_C$	Hauteur de la cheminée	$m$
$HR$	Humidité relative	%
$I_0$	Constante solaire moyenne égale à 1367	$W/m^2$
$I_{SC}$	Constante solaire	$W/m^2$
$l$	Epaisseur de la couche d'ozone réduite	$m$
$L$	Longitude du lieu considéré	$^{\circ}N$
$\dot{m}$	Débit massique	$kg/s$
$m_r$	Masse d'air optique relative	
$n_j$	Numéro de jours de l'année	
$P_0$	Pression atmosphérique au niveau de la mer	$pa$
$P$	Pression atmosphérique	$pa$
$P_{\text{électrique}}$	Puissance électrique fournie par la centrale	$W$
$P_{tot}$	Energie contenue dans le fluide	$W$
$P_{Wt}$	Puissance théorique de la centrale	$W$

$P_{Wt,max}$	Puissance théorique maximale de la centrale	$W$
$\Delta p_s$	Différence de pressions statiques	$Pa$
$\Delta p_{tot}$	Différence de pressions totales	$Pa$
$\dot{Q}$	Gain en puissance thermique de l'air	$W$
$T_0$	Température ambiante	$K$
$T_r$	Période de rotation de la terre sur elle même	$K$
$\Delta T$	Différence de température entre l'entrée et la sortie du collecteur	$K$
$U_0$	Epaisseur de la couche d'ozone corrigée	$m$
$UA$	Unité Astronomique égale à 150000000000	$m$
$U_w$	Epaisseur d'eau condensable à la verticale du lieu	$m$
$V_c$	Vitesse de l'air à l'entrée de la cheminée et à la sortie de collecteur	$m/s$
$V_{C,max}$	Vitesse maximale de l'air dans la cheminée	$m/s$
$X_w$	Epaisseur d'eau condensable corrigée	$m$
$z$	L'altitude du lieu considéré	$m$

➤ **Lettres Grec :**

$\alpha_0$	Coefficient d'absorption du rayonnement solaire direct par la couche d'ozone	
$\alpha$	Coefficient d'absorption effective du rayonnement solaire du collecteur	
$\alpha_\omega$	Coefficient d'absorption du rayonnement directe par la vapeur d'eau	
$\beta$	Coefficient de pertes énergétiques englobant les pertes par convection, par rayonnement et par stockage du sol	$W/(m^2 \cdot K)$
$\eta$	Rendement global de la centrale	
$\eta_{coll}$	Rendement de collecteur	
$\eta_{Wt}$	Rendement du la turbine	

$\theta_z$	Angle zénithale	°
$\rho_c$	Masse volumique de l'air dans la cheminée	$kg/m^3$
$\rho_{coll}$	Masse volumique de l'air à la sortie de collecteur	$kg/m^3$
$\rho_e$	Masse volumique de l'air dans l'environnement extérieur	$kg/m^3$
$\varphi$	Latitude du lieu considéré	°E

# *Introduction générale*

## **Introduction générale**

*Le rayonnement solaire est à l'origine de plus de 90% d'énergie est consommées avant d'atteindre la terre. L'homme, pour ses besoins, a toujours puisé dans le cycle énergétique naturel (hydro-électricité, biomasse). Il est important de souligner que l'utilisation des énergies fossiles (charbon, gaz, pétrole) n'est pas sans conséquence sur les problèmes environnementaux bien connus: pollution de l'air, effet de serre, production d'aérosols, etc. Face à ces aléas, des efforts accrus ont été consentis, particulièrement ces dernières décennies pour trouver d'autres énergies alternatives aux énergies conventionnelles. L'énergie solaire se présente comme l'une des énergies alternatives, dans la transformation en particulier de la chaleur, en électricité ou en une forme d'énergie chimique facilement stockable (hydrogène par exemple).*

*Le soleil émet continuellement une énorme quantité d'énergie radiante dans l'espace. Une moyenne de 1367 Watts atteint chaque mètre carré du bord externe de l'atmosphère terrestre. La part d'énergie reçue sur la surface de la terre dépend de l'épaisseur de l'atmosphère à traverser. Une connaissance précise de la distribution de l'irradiation solaire sur un site géographique particulier est d'une grande importance pour le développement des systèmes photo-thermiques ou photovoltaïques [5].*

*L'Algérie dispose d'un des gisements les plus importants au monde. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse 2000 heures annuellement et peut atteindre 3900 heures dans les hauts plateaux et le Sahara [15]. Les deux régions du sud algérien, Adrar (27.80°N, -0.18°E), et Béchar (31.50°N, -2.25°E) disposent d'un potentiel énergétique solaire des plus importants sur le territoire national et d'un climat très favorable à l'utilisation de l'énergie solaire.*

*L'objectif de ce travail est relatif à l'analyse des performances énergétiques d'une centrale à cheminée solaire au sud algérien en fonction des conditions climatiques et environnementales. Les deux sites, Adrar et Béchar ont été choisis compte tenu de la banque de données expérimentales disponible relative à la température ambiante et au rayonnement annuel dans cette région.*

*Dans le premier chapitre on présente un aperçu général sur l'énergie solaire, y est présentée l'énergie solaire sur sa base de potentiel énergétique, de rayonnement solaire au niveau du sol, et des flux: directes, diffus et total. Les techniques et les instruments de mesure du rayonnement solaire, ainsi que la méthode de calcul du rayonnement solaire global sur une surface horizontale ont été également présentés. Une cartographie du potentiel solaire dont dispose l'Algérie est également présentée.*

*Le deuxième chapitre comporte des généralités sur les cheminées solaires, les différents composants de la centrale cheminée solaire (collecteur, turbine et la cheminée), ainsi que le principe de fonctionnement de la centrale et le système de stockage, les différents projets de cheminées solaires dans le monde et le coût de la production d'énergie.*

*Le troisième chapitre concerne une revue bibliographique sur l'état de l'art dans le domaine des cheminées solaires, y sont décrits les travaux se rapportant à la détermination des performances énergétiques de ces centrales par utilisation de différents modèles mathématiques.*

*Le quatrième chapitre est relatif au modèle mathématique utilisé pour le calcul des performances de la tour solaire. On prendra comme référence de calcul le modèle de Jorg Schlaich et son équipe [3] compte tenu de son travail pionnier sur les plans, théorique et expérimental, de la modélisation des centrales à cheminée solaire, CCS.*

*Le cinquième chapitre est relatif à une analyse comparative des performances énergétiques d'une centrale à cheminée solaire, sur les sites de Béchar et Adrar.*

*Enfin, on termine par une conclusion générale faisant part d'une synthèse de tout le travail réalisé ainsi que les objectifs atteints, les difficultés rencontrées et les perspectives du futur.*

*Chapitre I*

*Généralités*

*Sur l'énergie solaire*

## I.1. Introduction :

Depuis l'antiquité, l'homme a eu toujours recours au soleil pour identifier approximativement le temps et l'emplacement. De nos jours et avec la découverte des photocellules, ce nouveau dispositif a exigé de l'homme une connaissance approfondie des périodes d'ensoleillement quotidien en fonction du temps et de l'endroit afin de tirer, un profit maximum de l'énergie solaire.

## I.2. Le Soleil :

Le soleil est une sphère gazeuse composée presque totalement d'hydrogène. Son diamètre est de 1 391 000 km (100 fois celui de la Terre) et sa masse est de l'ordre de  $2 * 10^{27}$  tonnes. Toute l'énergie du Soleil provient de réactions thermonucléaires qui s'y produisent transformant ainsi, à chaque seconde, 564,106 tonnes d'hydrogène en 560,106 tonnes d'Hélium, la différence de 4 millions de tonnes est dissipée sous forme d'énergie ( $E = mC^2$ ), Ce qui représente une énergie totale de  $36 * 10^{22}$  kW. La Terre étant à une distance de  $150 * 10^6$  km du Soleil, elle reçoit une énergie de  $1,8 * 10^{17}$  W [1].

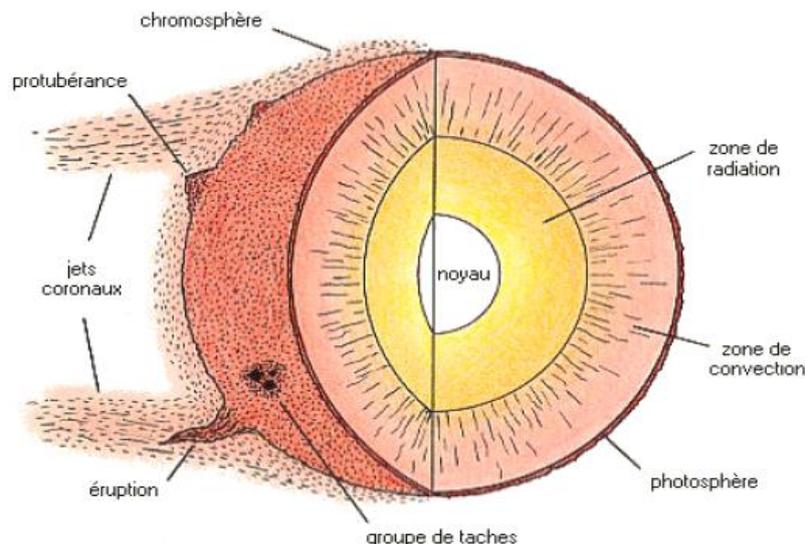


Figure (I. 1) : Structure interne et atmosphère du Soleil.

## I.3. La constante Solaire :

La valeur du rayonnement solaire " $I_{CS}$ ", reçu par une surface perpendiculaire aux rayons solaires placée à la limite supérieure de l'atmosphère terrestre (soit à environ 80 km d'altitude) varie au cours de l'année avec la distance Terre/Soleil. Sa valeur moyenne " $I_0$ " appelée constante solaire est de l'ordre de  $1354 \text{ W/m}^2$ . En première approximation, on peut calculer la valeur de " $I_C$ " en fonction du numéro du jour de l'année " $n_j$ " par la relation suivante [2] :

$$I_{CS} = I_0[1 + 0.033 * \cos(0.984 * n_j)] \quad (1.1)$$

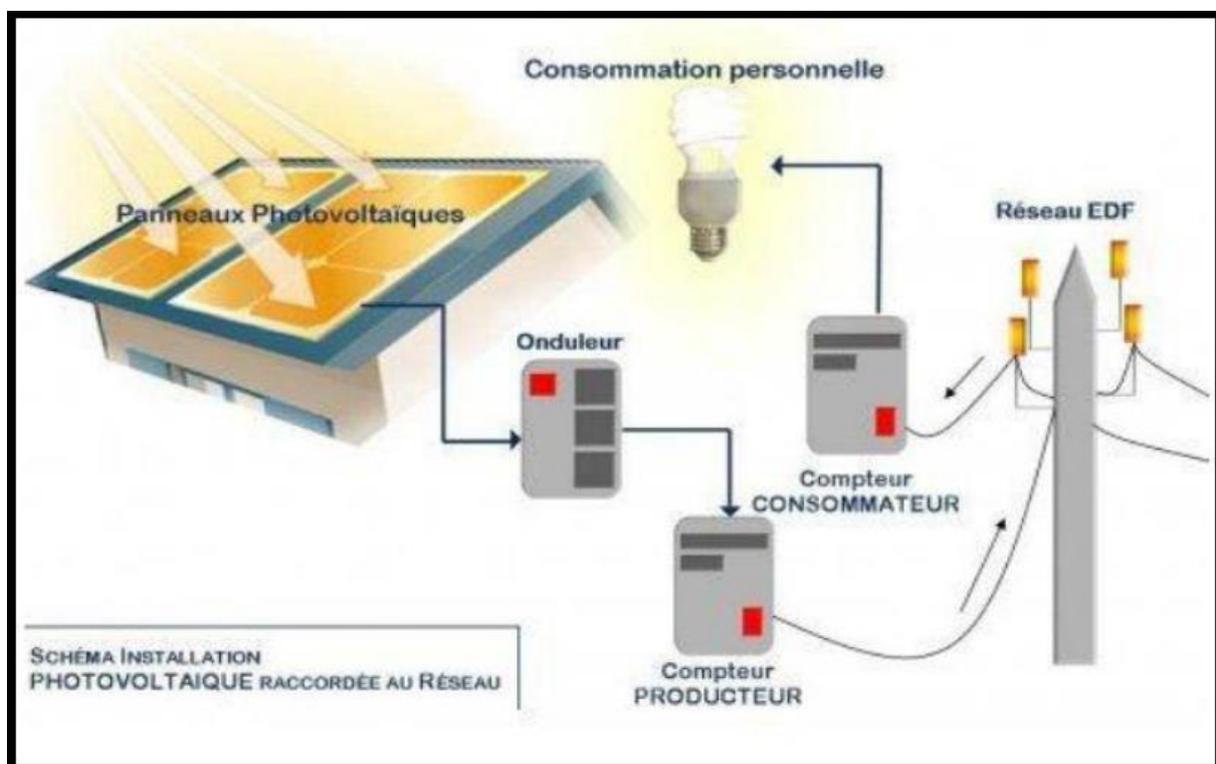
#### I.4. Energie solaire :

L'énergie solaire provient de la fusion nucléaire qui se produit au milieu du Soleil. Elle se propage dans le système solaire et dans l'univers sous la forme d'un rayonnement

Électromagnétique. Sur terre, grâce à divers procédés, elle peut être transformée en une autre forme d'énergie utile pour l'activité humaine, notamment en chaleur ou en électricité, c'est la raison pour laquelle, l'expression « énergie solaire » est souvent employée pour désigner l'électricité ou l'énergie thermique obtenue à partir de cette dernière.

##### I.4.1. Solaire photovoltaïque :

L'énergie solaire photovoltaïque désigne l'électricité produite par transformation d'une partie du rayonnement solaire avec une cellule photovoltaïque.



**Figure (I. 2) :** Schéma d'une installation photovoltaïque

La figure I.2 montre le schéma d'une installation photovoltaïque. Une cellule photovoltaïque est un composant électronique qui, exposé à la lumière, génère une tension électrique, ces cellules se présentent sous la forme de deux fines plaques. Le courant qui en ressort est continu. Cet effet photovoltaïque a été découvert par Alexandre Edmond Becquerel en 1839.

L'énergie produite sera durable et ne devra nécessiter aucun entretien. Elle peut répondre aux besoins en énergie électrique d'une maison. [3]

#### **I.4.2. Solaire thermique :**

Le solaire thermique consiste à utiliser le rayonnement solaire en le transformant en énergie thermique [4]. Les systèmes solaires correspondants sont :

➤ **Centrales solaires thermodynamiques :**

Le principe est de concentrer le rayonnement solaire par des miroirs pour chauffer un fluide à haute température (plusieurs centaines de degrés) afin de générer de la vapeur par échange thermique pour ensuite produire de l'électricité au moyen d'une turbine et/ou pour produire de la chaleur utilisable pour l'industrie comme le dessalement d'eau de mer et la production d'hydrogène.



**Figure (I. 3) :** Tour solaire de Californie.

Cette technologie permet précisément une production électrique 24H/24 grâce aux technologies de stockage de la chaleur (sels en solution, eau, graphite, etc.) mais présente par contre l'inconvénient d'avoir un faible rendement qui pourrait atteindre 20% dans le cas idéal et un coût de construction qui reste très élevé. La figure (I.4) montre le principe de fonctionnement d'une centrale thermique avec stockage.

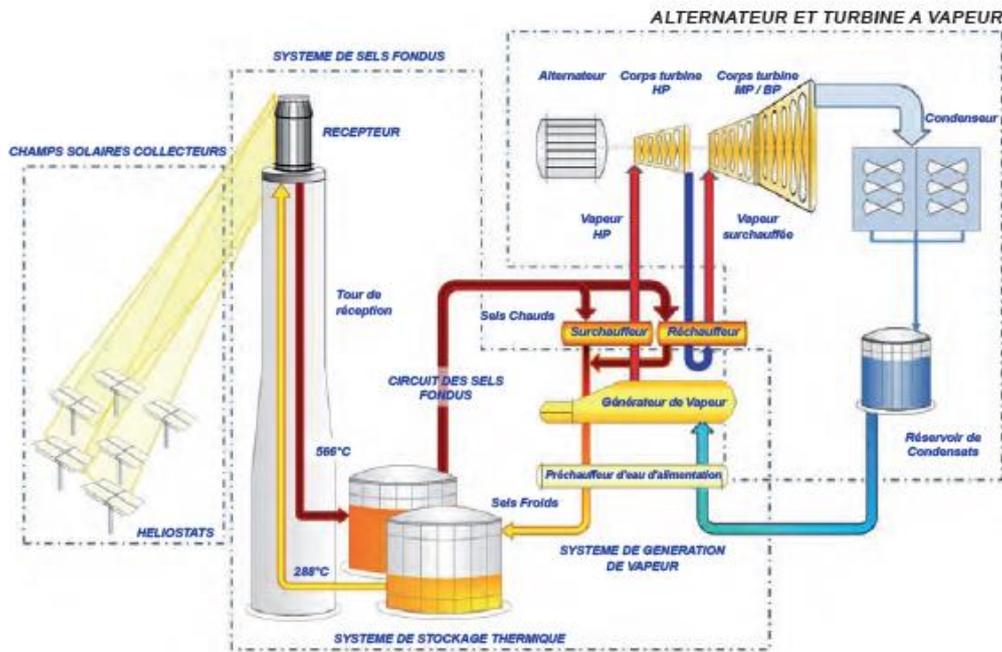


Figure (I. 4) : Principe de fonctionnement d'une centrale solaire avec stockage.

➤ **Capteurs solaires :**

Le principe général est de concentrer les rayons solaires en un seul endroit. Ceux-ci sont alors piégés par des capteurs solaires thermiques vitrés qui transmettent l'énergie solaire à des absorbeurs métalliques. Ces mêmes absorbeurs réchauffent alors un réseau de tuyaux où circule un fluide caloporteur. Un échangeur de chaleur va ensuite chauffer à son tour de l'eau stockée dans un cumulus et l'eau ira alimenter le chauffe-eau et les systèmes de chauffages solaires. La figure (I.5) montre le schéma d'un chauffe-eau solaire [3].

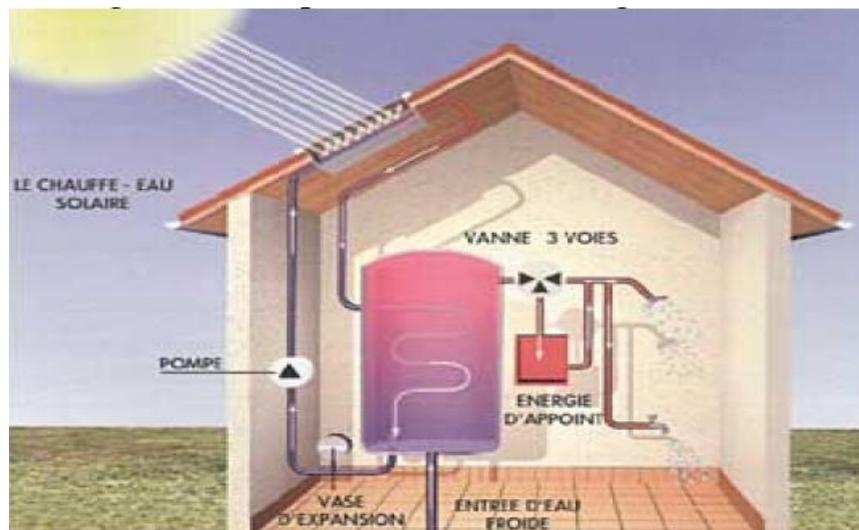


Figure (I. 5) : Schéma d'un chauffe-eau solaire.

### ➤ Cheminée solaire :

Les cheminées solaires sont des centrales électriques qui utilisent la force d'un courant d'air ascendant. L'air est chauffé **directement par effet de serre** dans un collecteur exposé au soleil. La masse volumique de l'air diminue sous l'effet de la température et un écoulement sera ainsi généré sous l'effet de variation de densité. L'air sera ainsi accéléré vers le milieu du collecteur pour passer ensuite dans la cheminée à travers des turbines qui actionnent les générateurs pour produire de l'électricité. La figure (I.6) montre le schéma de principe d'une cheminée solaire [3].

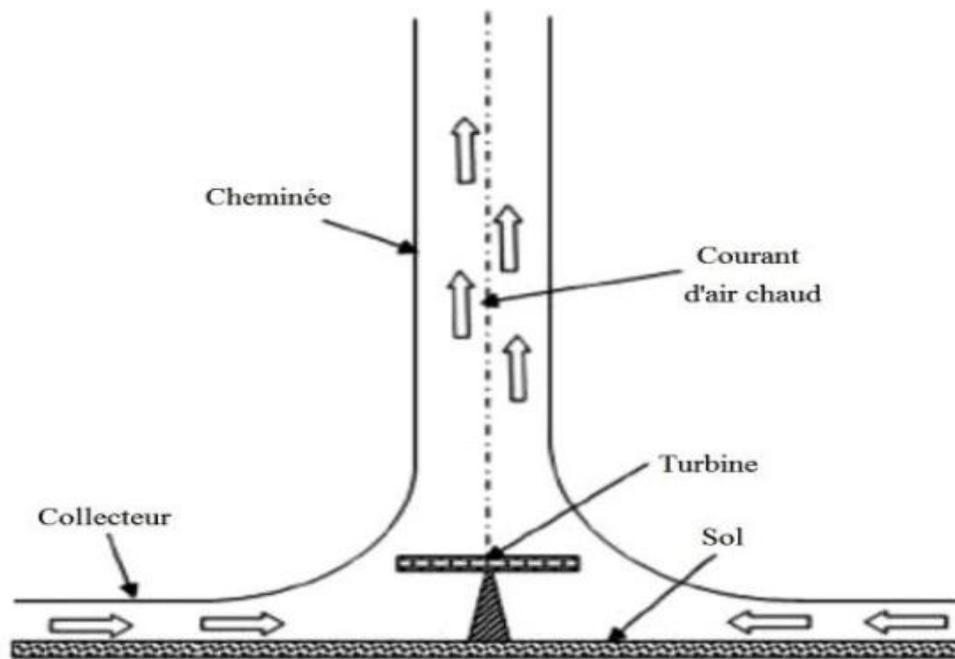


Figure (I. 6) : Schéma d'une centrale à cheminée solaire.

## I.5. Aspect géométrique de l'énergie solaire :

### I.5.1. Les mouvements de la terre :

Dans l'univers tout est en mouvement. On peut décomposer le mouvement de la terre en deux mouvements [5] :

#### I.5.1.1. Mouvement de rotation :

La terre tourne autour de l'axe des pôles (Pôle Nord, Pôle Sud) dans le sens trigonométrique. L'alternance des jours et des nuits est une manifestation immédiate de ce mouvement. On définit le jour solaire comme la durée moyenne entre deux passages consécutifs du soleil au méridien d'un lieu, ce jour est divisé en 24 intervalles égaux appelés heures. La rotation de la terre s'effectue avec une période de :

$$Tr = 23h 56 mn 04 s \approx 24h .$$

La vitesse linéaire de rotation à l'équateur est :

$$Vr \approx 0,465 \text{ km/s},$$

Elle est variable en fonction de latitude  $\varphi$  telle que :

$$Vr(\varphi) = Vr(\cos(\varphi))$$

### I.5.1.2. Mouvement de translation :

La terre est en rotation sur elle-même puis elle tourne autour du soleil en une période  $Tt = 365 \text{ jours } 5 \text{ h } 48 \text{ mn } 40 \text{ s} \approx 365,25 \text{ jours}$ . Elle décrit une orbite elliptique dont le soleil occupe l'un des foyers. Cette orbite est située dans un plan appelé plan de l'écliptique où le soleil est presque au centre. Elle est légèrement aplatie, elle correspond à un cercle de rayon moyen de 150 millions de Kilomètres. La terre tourne autour du soleil avec une vitesse moyenne  $V_t \approx 29,77 \text{ km/s}$  [vitesse maximale en hiver  $30,27 \text{ km/s}$  et minimale en été  $29,77 \text{ km/s}$ ]. Ce mouvement s'effectue dans le sens trigonométrique direct et provoque le cycle des saisons. Le plan équatorial, perpendiculaire à l'axe des pôles et passant par le centre de la terre, fait avec le plan de l'écliptique un angle constant appelé obliquité et noté  $\delta_0$  Qui est égal à  $23,45^\circ$  [5].

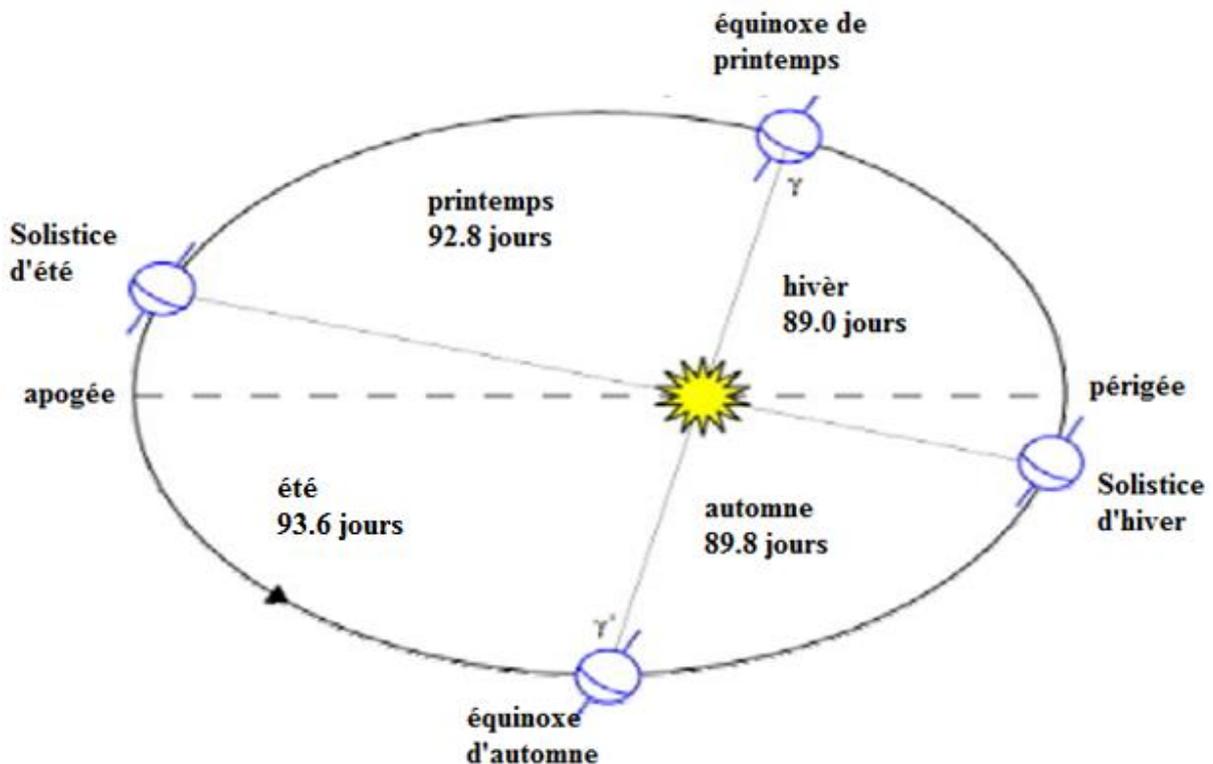


Figure (I. 7) : Mouvements de la terre [5].

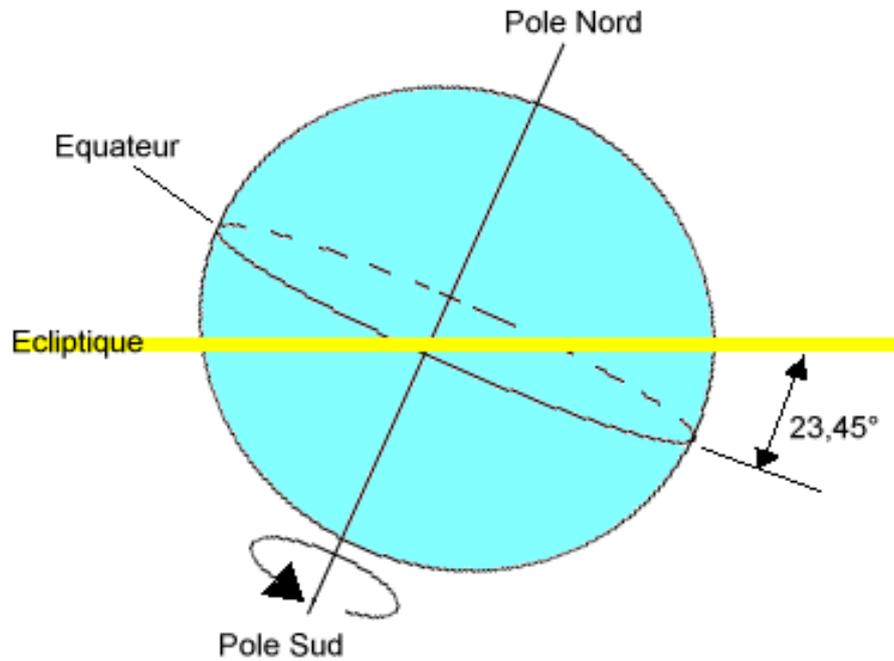


Figure (I. 8) : Angle d'inclinaison de l'axe de la terre [5].

### I.5.2. Distance Terre-Soleil :

La variation de la distance terre-soleil en fonction de la date est donnée par la formule suivante [7] :

$$d_{TS}(N) = 1 - 0.017 \cos [(360/365) \cdot (N - 2)] \quad (1.2)$$

Avec:

$N$ : Le numéro du jour de l'année compté à partir du 1<sup>er</sup> janvier, il varie de 1 à 365 ou 366 selon l'année :

**Année civile :  $N = (1 \text{ jusqu'à } 365) \text{ jours}$**

**Année bissextile :  $N = (1 \text{ jusqu'à } 366) \text{ jours}$**

**$d_{TS}(\text{min}) = 0,983 \text{ UA}$  Vers le 2 janvier (Périgée).**

**$d_{TS}(\text{max}) = 1,017 \text{ UA}$  Vers le 5 juillet (Apogée).**

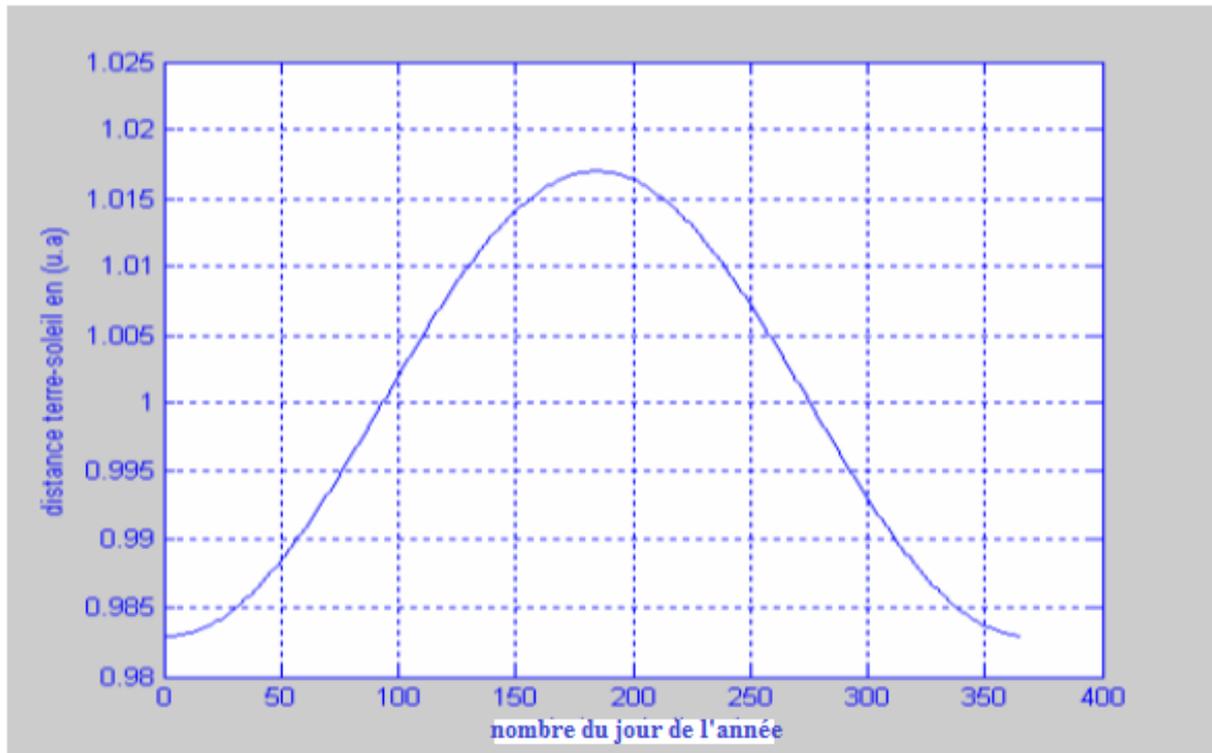
Avec :

$$1\text{UA} = 149\,597\,890 \pm 500\text{km} \approx 150 \text{ million km}$$

$$= 500 \text{ secondes lumière}$$

$$= 8.3 \text{ mn} - \text{lumière}$$

Et  $d_{TS}$ , est la distance entre le soleil et la terre.



**Figure (I. 9) :** Variation de la distance terre –soleil en fonction du nombre du jour de l'année

### I.5.3. Repérage d'un site à la surface terrestre :

Les coordonnées géométriques utilisées pour déterminer la localisation d'un point sur la surface terrestre sont :

La latitude et la longitude, qui sont calculées en angle et qui s'expriment en degrés, minutes et secondes d'angle.

➤ **La latitude  $\Phi$  :**

Donne la localisation d'un point par rapport à l'équateur, elle varie de  $0^\circ$  à l'équateur. Elle représente la distance angulaire du site S par rapport au plan de l'équateur.

$\Phi$  Varie de  $-90^\circ$  à  $+90^\circ$

Tel que :

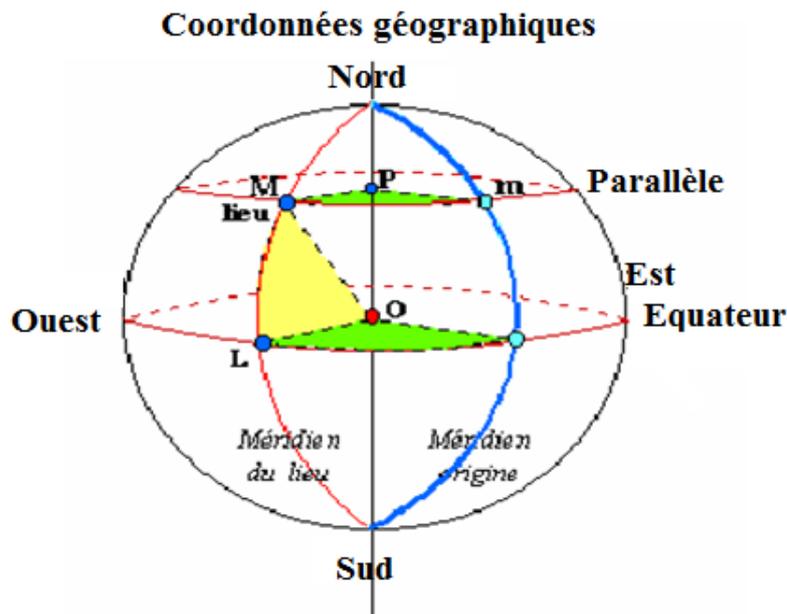
$$\begin{cases} \Phi > 0 \text{ Vers le Nord} \\ \Phi < 0 \text{ Vers le Sud} \end{cases}$$

➤ **La longitude  $\psi$  :**

Permet de localiser un point à l'Est ou à l'Ouest d'une ligne Nord- Sud de référence appelée le méridien Greenwich.  $\psi$  Varie de  $-180^\circ$  à  $+180^\circ$

Tel que :

$$\begin{cases} \psi > 0 \text{ à l'Est du méridien de Greenwich} \\ \psi < 0 \text{ à l'Ouest du méridien de Greenwich} \end{cases}$$



**Figure (I. 10) :** Repérage d'un site sur la surface terrestre [6].

#### **I.5.4. Détermination de la direction du soleil :**

Pour un lieu donné on repère la direction du soleil de deux manières :

- par rapport au plan horizontal du lieu désigné par les coordonnées horizontales liées à un point donné de la Terre.
- par rapport au plan équatorial de la terre désigné par les coordonnées équatoriales.

##### **I.5.4.1. Coordonnées horizontales :**

###### **a - L'azimut du soleil (a):**

Est l'angle mesuré dans le sens des aiguilles d'une montre entre le point cardinal Sud (dans l'hémisphère nord) ou Nord (dans l'hémisphère sud) et la projection sur le plan horizontal local de la droite reliant la terre au soleil. Il est compté de  $0^\circ$  à  $360^\circ$  de l'ouest en est, ou de  $0^\circ$  à  $180^\circ$  à partir du sud vers l'ouest.

Note : l'azimut solaire est négatif le matin (direction Est), nul ou égal à  $180^\circ$  à midi et positif l'après-midi (direction Ouest), sur tout le globe. Il diffère de l'**azimut géographique**, le quel est toujours mesuré dans le sens des aiguilles d'une montre à partir du Nord, indépendamment de l'hémisphère du point d'observation [7].

###### **b- La hauteur du soleil (h) :**

C'est l'angle que fait la direction du soleil avec sa projection sur le plan horizontal.

La hauteur du soleil varie à chaque instant de la journée et de l'année selon la relation suivante:

$$\sin(h) = \cos(\delta) \cdot \cos(\Phi) \cdot \cos(\psi) + \sin(\Phi) \cdot \sin(\delta) \quad (1.3)$$

$\Phi$ , varie entre  $90^\circ$  et  $-90^\circ$

Tel que :

$h$ , est la hauteur du soleil.

$\delta$ , la déclinaison du soleil.

$\Phi$ , la latitude de lieu.

$\psi$ , la longitude de lieu.

- Zénith:  $h = +90$

- Nadir:  $h = -90$

$h > 0$  : Correspond au jour

$h < 0$  : Correspond à la nuit

$h = 0$  : Correspond au lever et au coucher du soleil.

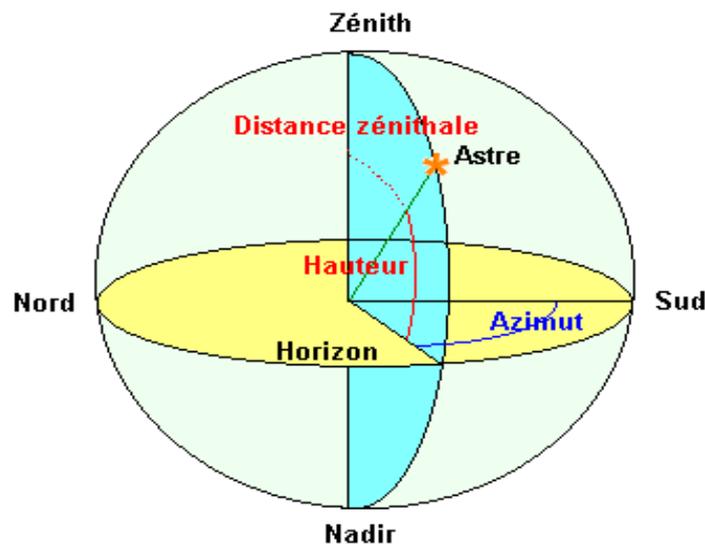


Figure (I. 11) : Coordonnées horizontales [5].

#### I.5.4.2. Coordonnées équatoriales :

##### a- L'angle horaire (H) :

C'est l'angle que font sur le plan équatorial les projections de la direction du soleil et de la direction du sud pour le lieu considéré figure (I.11). Il rend compte de la rotation quotidienne de la terre autour de l'axe des pôles et on a la relation:

1 heure de temps =  $15^\circ$  d'angle horaire.

$H < 0$  Le matin

$H > 0$  Après midi

$H = 0$  À midi

### b- La déclinaison du soleil $\delta$ :

C'est l'angle de la direction du soleil avec le plan équatorial figure (I.12).  $\delta$  Varie entre deux valeurs extrêmes :

$$-\delta_0 \leq \delta \leq \delta_0$$

Avec :

$$\delta_0 = 23,27^\circ$$

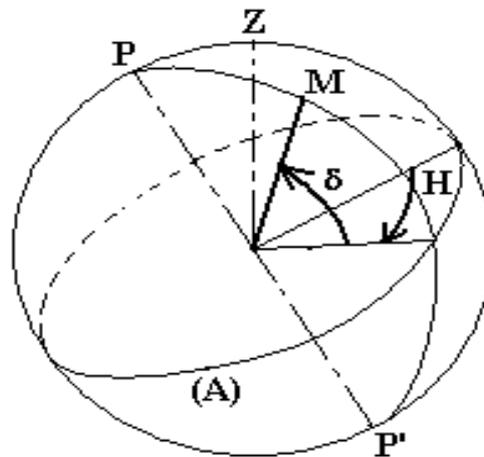


Figure (I. 12) : Coordonnées équatoriales.

La variation de la déclinaison du soleil au cours de l'année est représentée sur la figure (I.13).

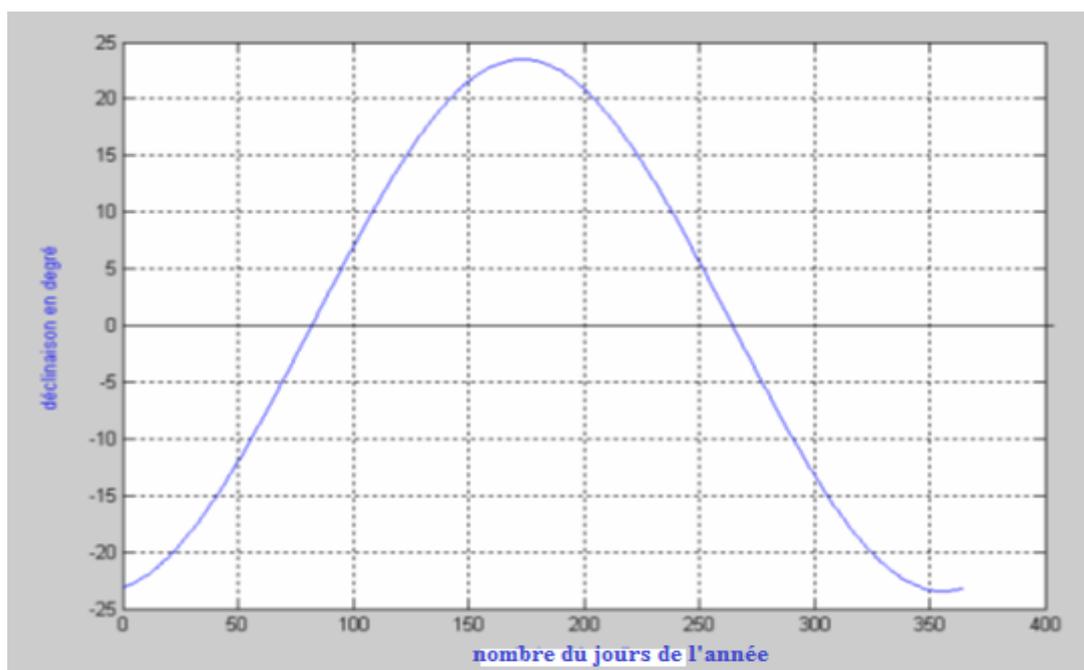


Figure (I. 13) : Variation de la déclinaison en fonction du jour de l'année.

La déclinaison  $\delta$  (N), en fonction du jour de l'année, est représentée par la formule approchée suivante :

$$\sin(\delta) = 23,45 \cdot \sin((2 \cdot \pi / 365) \cdot (284 + N)) \quad (1.4)$$

La déclinaison varie sinusoïdalement au cours de l'année. Elle est maximum ( $23,27^\circ$ ) le 21 juin, au solstice d'été; minimum ( $-23,27^\circ$ ), le 21 décembre, au solstice d'hiver. La déclinaison est nulle le 21 mars et le 21 septembre, aux équinoxes de printemps et d'automne, périodes de variation rapide de la déclinaison faibles d'un jour à l'autre.

### **I.5.5. Rayonnement solaire :**

L'énergie du rayonnement solaire est de type électromagnétique avec des longueurs d'onde s'étalant de l'ultraviolet à l'infrarouge. Avant d'atteindre le sol, le rayonnement solaire est atténué par l'atmosphère terrestre (nuages, aérosols, vapeur d'eau et polluant divers) [3].

#### **I.5.5.1. Types de rayonnement solaire :**

Le rayonnement solaire peut être réfléchi, diffusé, absorbé ou direct :

##### **➤ Réfléchi :**

Par la surface terrestre, c'est-à-dire renvoyé dans une direction privilégiée. Lorsque le rayonnement réfléchi par la surface l'est dans une seule et même direction, la réflexion est dite spéculaire. La réflexion spéculaire se produit uniquement sur des surfaces lisses, dont les aspérités ont une taille inférieure à la longueur d'onde du rayonnement incident. Le sol réfléchit plutôt le rayonnement de manière anisotrope [3].

##### **➤ Diffusé :**

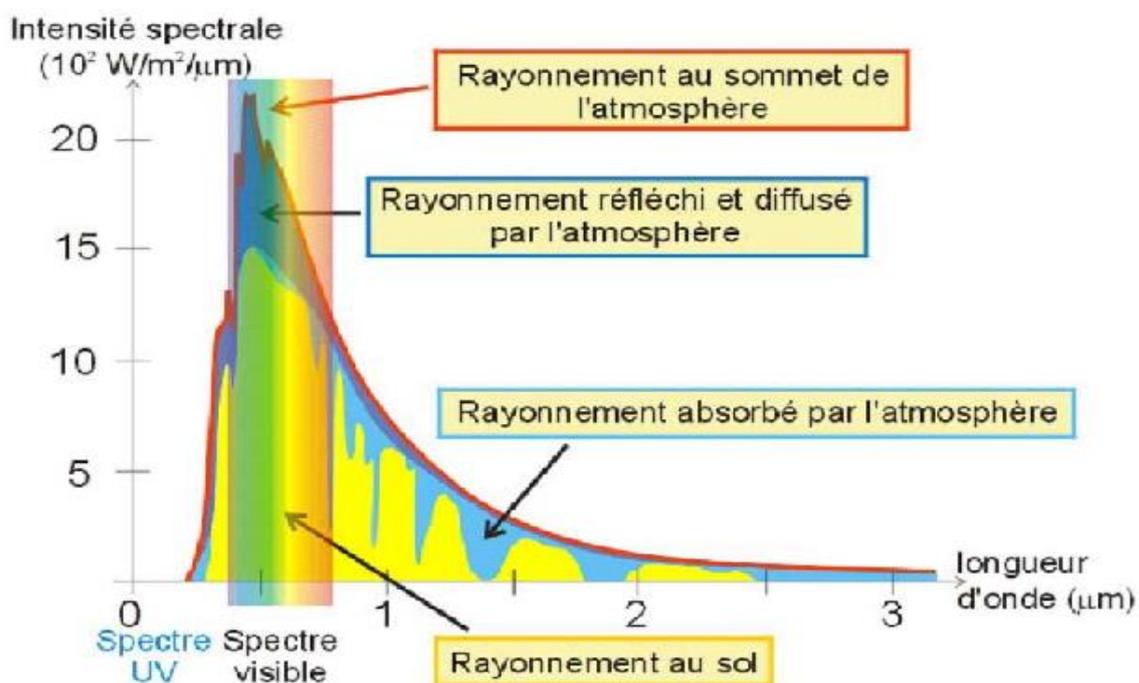
C'est-à-dire renvoyé dans toutes les directions. Le phénomène de diffusion se produit dans un milieu contenant de fines particules ou des molécules et dépend fortement de la taille des particules considérées. Par exemple, l'influence des molécules est plus intense pour les courtes longueurs d'onde (bleu) que pour les grandes (rouge), en raison de la loi de diffusion de Rayleigh en «  $\lambda^{-4}$  », où  $\lambda$  est la longueur d'onde. C'est la raison pour laquelle la voûte céleste apparaît en général bleue et le Soleil couchant rougeâtre (les rayonnements violet et bleu ayant été diffusés). Les molécules diffusent la lumière dans toutes les directions. Cependant, deux directions sont privilégiées: la diffusion avant et la diffusion arrière. Pour les particules les plus grosses (cas des gouttelettes de nuages), la diffusion se fait majoritairement en avant.

➤ **Absorbé :**

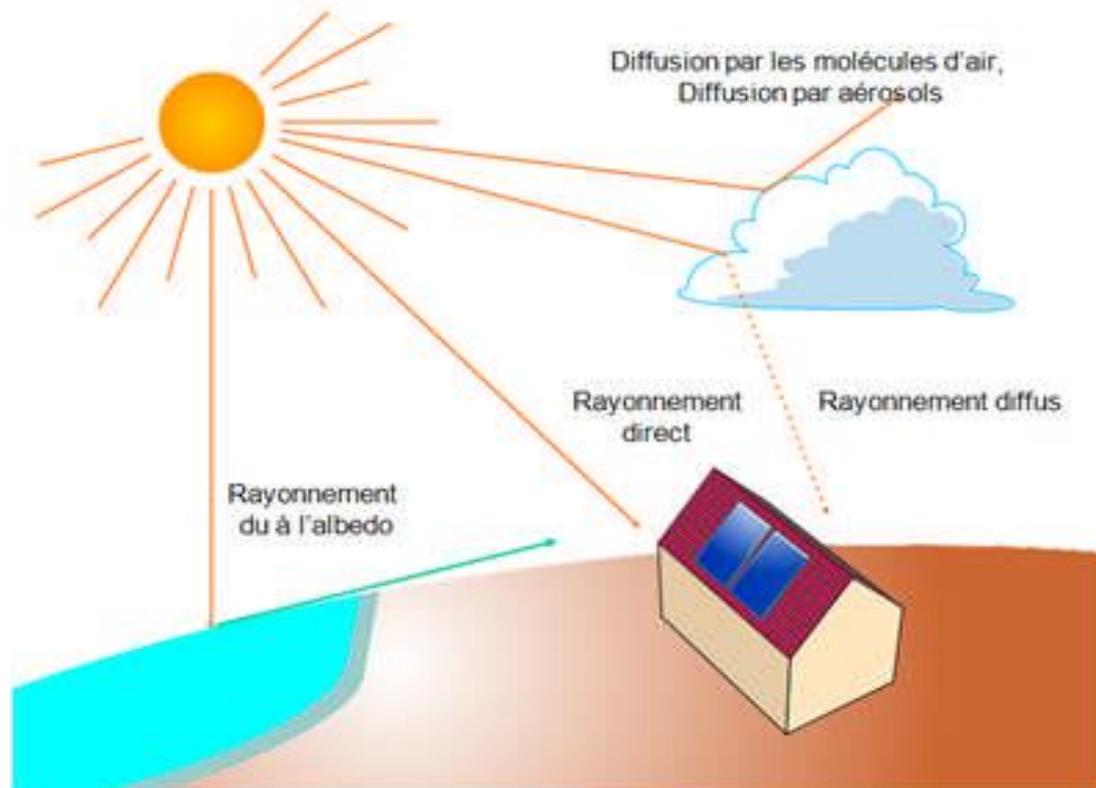
Par les composants gazeux de l'atmosphère. Cette absorption est dite sélective, car elle s'opère pour des valeurs de longueur d'onde bien précises. Elle est due essentiellement à la vapeur d'eau, à l'ozone, au dioxyde de carbone et, à un degré moindre, à l'oxygène.

➤ **Direct :**

C'est celui qui arrive au sol sans avoir subi de diffusion. La composante du rayonnement solaire direct reçu à la surface terrestre est montrée sur la figure (I.14). Ce rayonnement s'éloigne de façon notable des autres rayonnements, atteignant la limite supérieure de l'atmosphère, en particulier du fait de l'absorption par les constituants gazeux de l'atmosphère. Dans certaines bandes de longueurs d'ondes, le rayonnement est atténué ou même annulé. Les principales bandes d'absorption sont dues à l'ozone entre 0,2 et 0,3  $\mu\text{m}$  (dans le domaine ultraviolet), au dioxyde de carbone autour de 2,75  $\mu\text{m}$  et 4,25  $\mu\text{m}$ , mais surtout à la vapeur d'eau dont l'absorption est prépondérante (en particulier autour de 0,9  $\mu\text{m}$ , de 1,1  $\mu\text{m}$ , de 1,4  $\mu\text{m}$ , de 1,9  $\mu\text{m}$ , de 2,4 à 2,9  $\mu\text{m}$  et de 3 à 4  $\mu\text{m}$ ) et qui module principalement l'allure du spectre solaire reçu au sol.



**Figure (I. 14) :** Spectres du rayonnement solaire moyen incident au sommet de l'atmosphère (courbe rouge) et à la surface de la Terre (jaune). La fraction du rayonnement absorbée dans l'atmosphère est en bleu, celle qui est rétrodiffusée en violet.



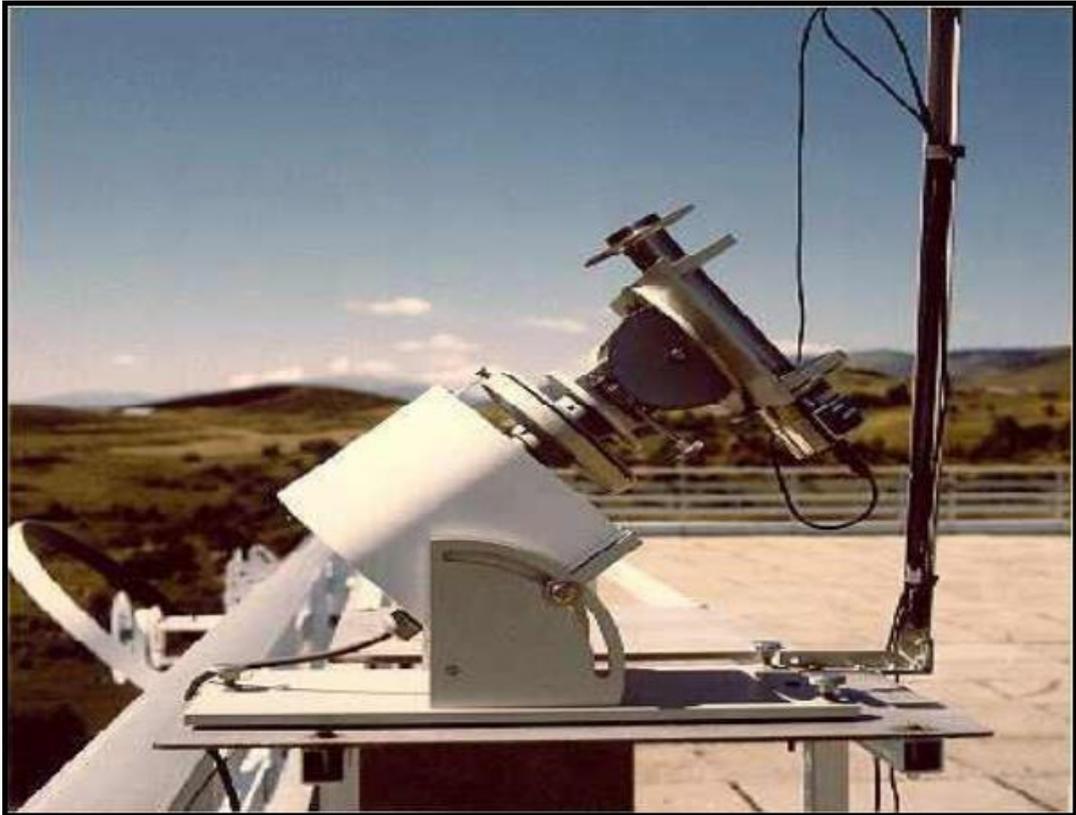
**Figure (I. 15) :** Schéma représentant les composantes du rayonnement solaire [3].

#### **I.5.5.2. Instruments de mesure du rayonnement solaire :**

De façon générale, la mesure de flux global d'irradiation s'effectue dans les stations météorologiques sur le plan horizontal à l'aide d'une pyranomètre. Cet instrument collecte le rayonnement arrivant sur une surface horizontale noircie qui convertit le rayonnement reçu en chaleur puis en électricité.

##### ➤ **Mesure du rayonnement solaire direct au sol :**

Le pyrhéliomètre est un instrument destiné à mesurer l'intensité du **rayonnement solaire direct**. L'instrument est en permanence orienté vers le Soleil et ne mesure pas le rayonnement directement issu du soleil, à l'exclusion de celui issu du ciel ou de la terre. Il est généralement constitué par une thermopile (ensemble des thermocouples) peinte en noir, donc très absorbante, montée sur un système de suivi. La différence de température entre cette surface et le corps de l'instrument est proportionnelle à l'éclairement énergétique du rayonnement direct. La figure (I.16) montre la photo d'un pyrhéliomètre.



**Figure (I. 16) :** Photo d'un pyrhéliomètre.

➤ **Mesure du rayonnement global et du rayonnement diffus :**

Le pyranomètre est un capteur de flux thermique utilisé pour la mesure de la quantité d'énergie solaire en lumière naturelle et est notamment utilisé en météorologie [8]. Il permet de mesurer la puissance du rayonnement solaire total en watts par mètre carré ( $W/m^2$ ) en provenance d'un angle solide de 2 stéradians. Le domaine spectral couvert s'étend de 0,3 à 3  $\mu m$ . Le rayonnement reçu est converti en chaleur par la surface noircie.

La différence de température entre cette surface et le corps de l'instrument est proportionnelle à l'éclairement énergétique du rayonnement global. Elle est mesurée par une thermopile constituée de plusieurs thermocouples montés en série. La mesure du rayonnement solaire diffus est faite à l'aide du même instrument, auquel on adjoint un écran occultant le rayonnement solaire direct. Selon les cas, cet écran peut être, soit un disque ou une sphère dirigée en permanence vers le Soleil, soit une bande pare-soleil parallèle au plan équatorial et déplacée en fonction de la déclinaison solaire. La figure (I.17) montre la photo d'un pyranomètre.



Figure (I. 17) : Photo d'un pyranomètre.

### I.5.5.3. Méthode pour le calcul du rayonnement solaire globale sur une surface horizontale :

➤ **Modèle de Lacis & Hansen :**

La formule générale proposée par Lacis & Hansen pour le calcul du rayonnement solaire global sur un plan horizontal est donnée par l'équation (1.4).

$$G = I_{SC} * \text{Cos}\theta_Z \left[ \frac{(0.647 - \rho_s - \alpha_0)}{(1 - 0.0685\rho)} + 0.353 - \alpha_\omega \right] \quad (1.5)$$

$I_{SC}$  est la constante solaire extra-terrestre calculée par :

$$I_{SC} = I_0 [1 + 0.033 * \text{cos}(0.984 * n_j)] \quad (1.6)$$

Avec,  $I_0$  est la constante solaire moyenne égale à  $1367 \text{ W/m}^2$  et  $n_j$ , le numéro de jour dans l'année ( $n_j = 1$  pour le 1<sup>er</sup> Janvier et  $n_j = 365$  pour le 31 Décembre).

$\theta_Z$ , est l'angle zénithale,  $\theta_Z = 90^\circ - h$  ou  $h$  est la hauteur du soleil.

Le coefficient  $\alpha_0$  correspondant à l'absorption du rayonnement solaire direct par la couche d'ozone, est calculé par la relation (1.7) suivante.

$$\alpha_0 = \frac{0.02118 U_0}{1 + 0.042 U_0 + 3.23 * 10^{-4} U_0^2} + \frac{1.082 U_0}{(1 + 138.6 U_0)^{0.805}} + \frac{0.0658 U_0}{1 + (103.6 U_0)^2} \quad (1.7)$$

Où :  $U_0$ , est l'épaisseur de la couche d'ozone corrigée par le trajet optique du rayonnement solaire à travers cette couche et définie par:

$$U_0 = 0.01 * l * m_r(1.8)$$

Où :  $m_r$  est la masse d'air optique relative donnée l'équation (1.9)

$$m_r = [Cos\theta_z + 0 + 0.15(93.885 - \theta_z)^{-1.253}]^{-1} \quad (1.9)$$

Et,  $l$ , représente la quantité d'ozone à la verticale du lieu (épaisseur de la couche d'ozone réduite (m) NTP) [13].

$$l = \left\{ 235 + \left[ 150 + 40\sin(0.9856(n_j - 30)) + 20\sin(3L) \right] \left[ \sin^2(1.28\varphi) \right] \right\} / 1000$$

$L$ , et  $\varphi$  sont respectivement la longitude et la latitude du lieu.

$\alpha_w$ , représente le coefficient d'absorption du rayonnement direct par la vapeur d'eau, est donné par l'équation (1.11):

$$\alpha_w = \frac{2.9 X_w}{(1+141.5 X_w)^{0.635} + 5.925 X_w} \quad (1.11)$$

$X_w$ , est l'épaisseur d'eau condensable corrigée par trajet optique du rayonnement à travers cette couche, donnée par :

$$X_w = m_a * 0.01 * U_w \quad (1.12)$$

$U_w$ , est l'épaisseur d'eau condensable à la verticale du lieu (m). Elle est donnée par l'équation (1.13), [13].

$$U_w = 0. \frac{493}{T} HR * \exp(26.23 - \frac{5416}{T}) \quad (1.13)$$

Avec,  $m_a$  la masse d'air corrigée exprimée par:

$$m_a = m_r \left( \frac{P}{1013} \right)^{0.75} * \left( \frac{273}{T} \right)^{0.5} \quad (1.14)$$

$P$ , est la pression atmosphérique (mbar). Elle peut être calculée par :

$$P = P_0 * \exp(-0.0001184 * z) \quad (1.15)$$

$P_0$ , est la pression atmosphérique au niveau de la mer ( $P_0 = 101,300 \text{ k pa}$ ).

$z$ , l'altitude du site en (m), par rapport au niveau de la mer

$T$ , la température ambiante en (K) et  $R$ , l'humidité relative (%).

## I.6. L'énergie solaire en Algérie :

L'Algérie s'engage avec détermination sur la voie des énergies renouvelables afin d'apporter des solutions globales et durables aux défis environnementaux et aux problématiques de préservation des ressources énergétiques d'origine fossile.

Ce choix stratégique est motivé par l'immense potentiel en énergie solaire. Cette énergie constitue l'axe majeur du programme qui consacre au solaire thermique et au solaire

photovoltaïque une part essentielle. Le solaire devrait atteindre d'ici 2030 plus de 37% de la production nationale d'électricité.

Selon une étude prospective effectuée par l'Agence spatiale allemande (DLR), notre pays dispose d'une énergie thermo-solaire de plus de  $169,44 \frac{TWh}{an}$  et de plus de  $13,90 TWh/an$  d'énergie photovoltaïque car La durée moyenne d'ensoleillement dans le Sahara algérien est de plus de 3500 heures, Au moment où la consommation actuelle de l'Algérie en énergie, obtenue essentiellement du gaz et du pétrole, est de 25 à 30  $TWh /an$ ..Le potentiel de l'Algérie dans le domaine des énergies renouvelables notamment de type solaire est énorme et ne demande qu'à être exploité [3].La figure (I.18) montre la carte du potentiel solaire en Algérie.

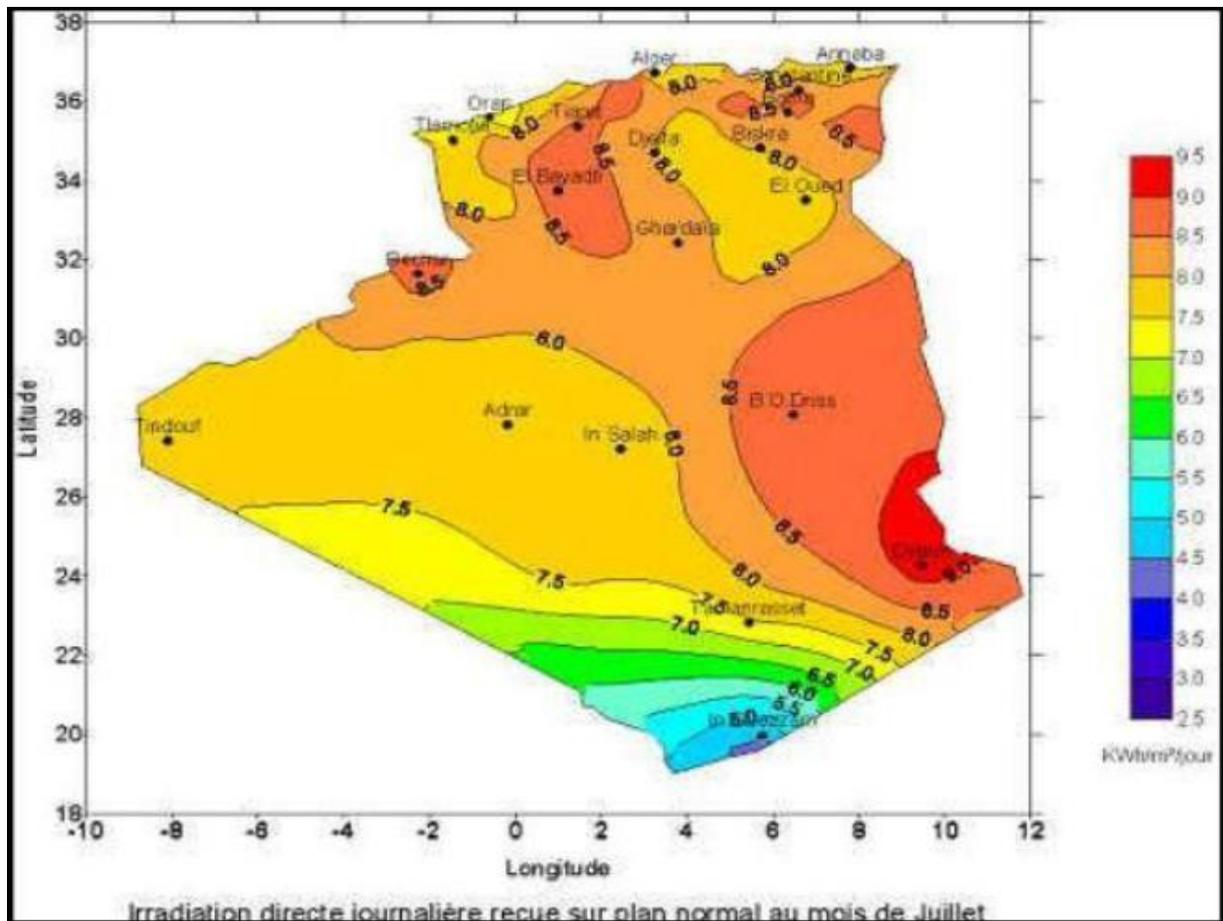


Figure (I. 18) : Carte du potentiel solaire en Algérie [3].

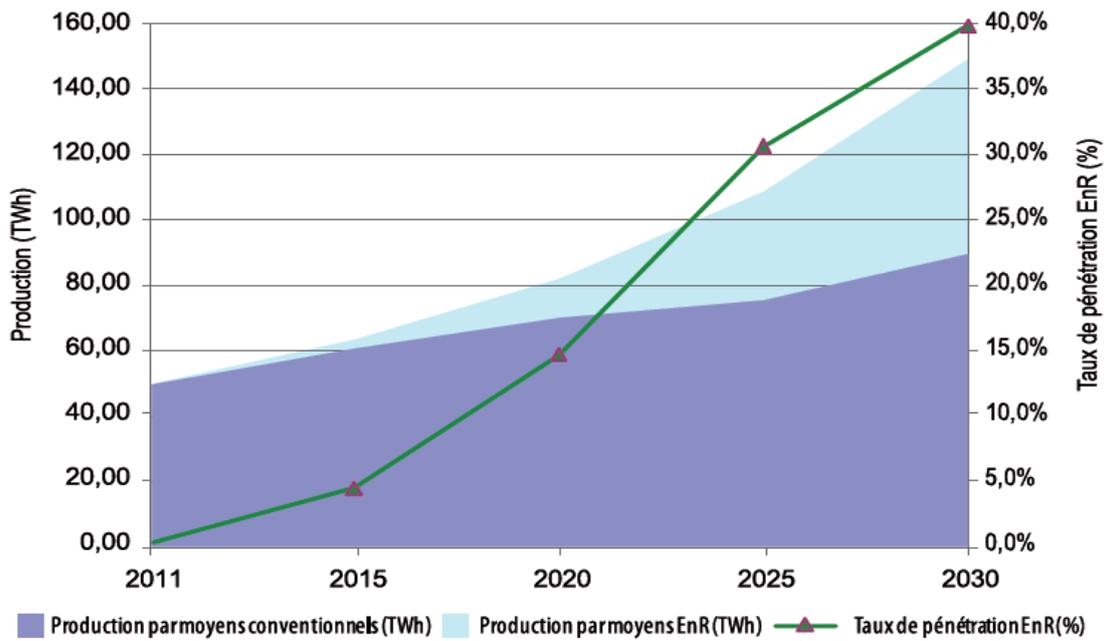


Figure (I. 19) : Pénétration des EnR dans la production nationale en *TWh*.

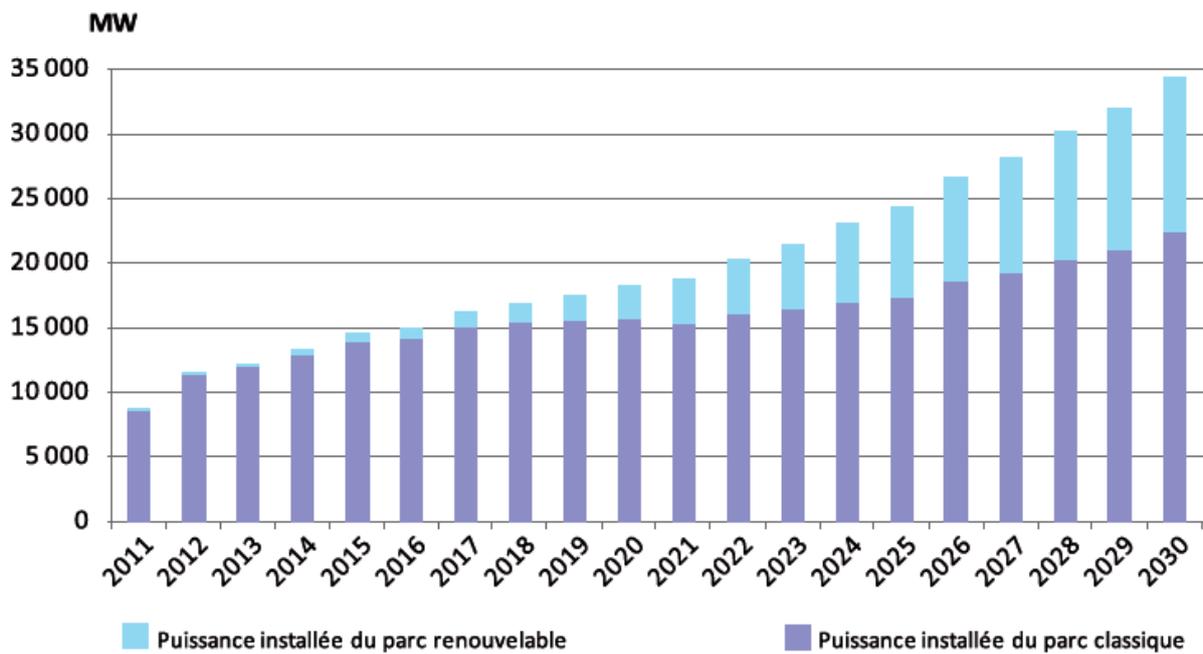


Figure (I. 20) : Structure du parc de la production nationale en *MW*.

### **I.6.1 Dispositifs Algériens de soutien aux énergies renouvelables selon les lois adoptés et les décrets :**

Le gouvernement algérien a décrété, durant l'année 2004, un important décret sur la diversification des énergies. Cette loi encourage la production et l'utilisation des énergies renouvelables en Algérie par de nombreuses mesures dans une vision globale du développement durable surtout avec les scénarios énergétiques dans le futur avec l'épuisement du pétrole dans le monde. Durant ce siècle, la diversification est une consigne de conseil mondial de l'énergie.

Le Décret exécutif N° 04-92 du 4 Safar 1425 correspondant au 25 mars 2004 relatif aux coûts de diversification de la production d'électricité vient après le décret de 2002 qui a permis l'ouverture du secteur au privé. Il est constitué de 18 articles définissant les notions des énergies renouvelables, l'organisme de régulation et le régime spécial [3]. Un des objectifs de cette loi est d'attirer grâce à des mesures incitatives des investissements directs privés, étrangers ou locaux dans la génération électrique, l'article 11 du décret instaure une prime pour l'encouragement d'investissement dans cet article: afin de couvrir les surcoûts découlant de la production d'électricité produite à partir d'énergies renouvelables et au titre des coûts de diversification. Il est attribué aux producteurs d'électricité à partir des énergies renouvelables, une prime pour chaque kWh produit, commercialisé ou consommé. Cette prime est variable selon le choix d'énergie renouvelable où la priorité a été donnée aux créneaux purement solaires et éoliens avec une prime de 300 % du prix par kWh de l'électricité tel qu'élaboré par l'opérateur du marché comme l'indiquent les articles du décret de 12 à 16. Pour l'énergie renouvelable à partir de l'hydraulique, la prime est de 100 kWh d'électricité.

*Chapitre II*  
*Les centrales à cheminée*  
*solaires*

## II.1. Introduction :

La cheminée solaire (CS) est une centrale de production de l'énergie électrique à partir de l'énergie solaire. Elle repose sur l'idée d'exploiter l'énergie cinétique des mouvements de convection naturelle de l'air chauffé par le soleil. La centrale à cheminée solaire est un concept destiné à produire de l'électricité à grande échelle et à coût réduit.

## II.2. Historique :

La CCS a été proposée pour la première fois par Cabanyes, et ensuite décrite dans une publication par Günter. Depuis 1975, plusieurs brevets ont été accordés à Lucie en Australie, au Canada, en Israël et aux Etats-Unis. Schlaich a également présenté cette technologie dans un congrès en 1978, pour concevoir et construire, par la suite, avec ses coéquipiers le premier prototype d'une CCS à Manzanares en Espagne entre 1981 et 1982. Ce prototype doté d'une tour de 194.6 m de hauteur, d'un collecteur de 244 m de diamètre et d'une turbine à rotor unique à quatre pales, orientée verticalement, installée à la base de la tour. Ce prototype a fonctionné jusqu'à 1989 en produisant une puissance maximale de 50 kW, en vérifiant ainsi la faisabilité et la praticabilité des CCS. Depuis lors, des études numériques, analytiques et expérimentales ont été multipliées pour bien comprendre le comportement des cheminées solaires dans le but de construire des prototypes qui réalisent le meilleur rendement en matière de production de l'électricité [9].

## II.3. Principaux éléments de la cheminée solaire :

Les principaux composants de la centrale sont le collecteur solaire, la cheminée qui est placée au centre du collecteur et la turbine.

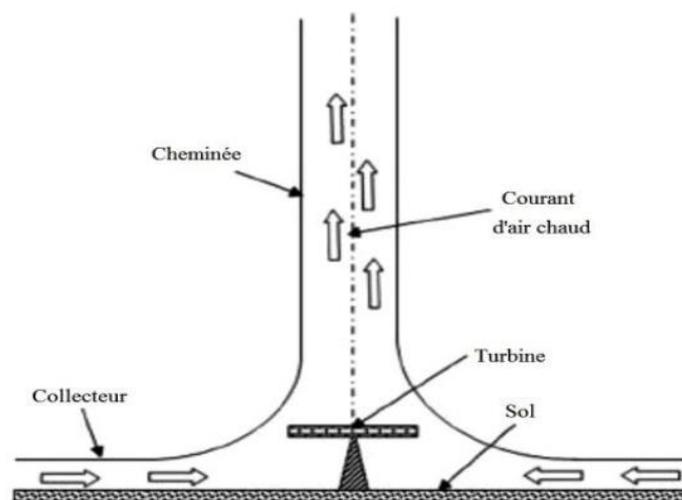
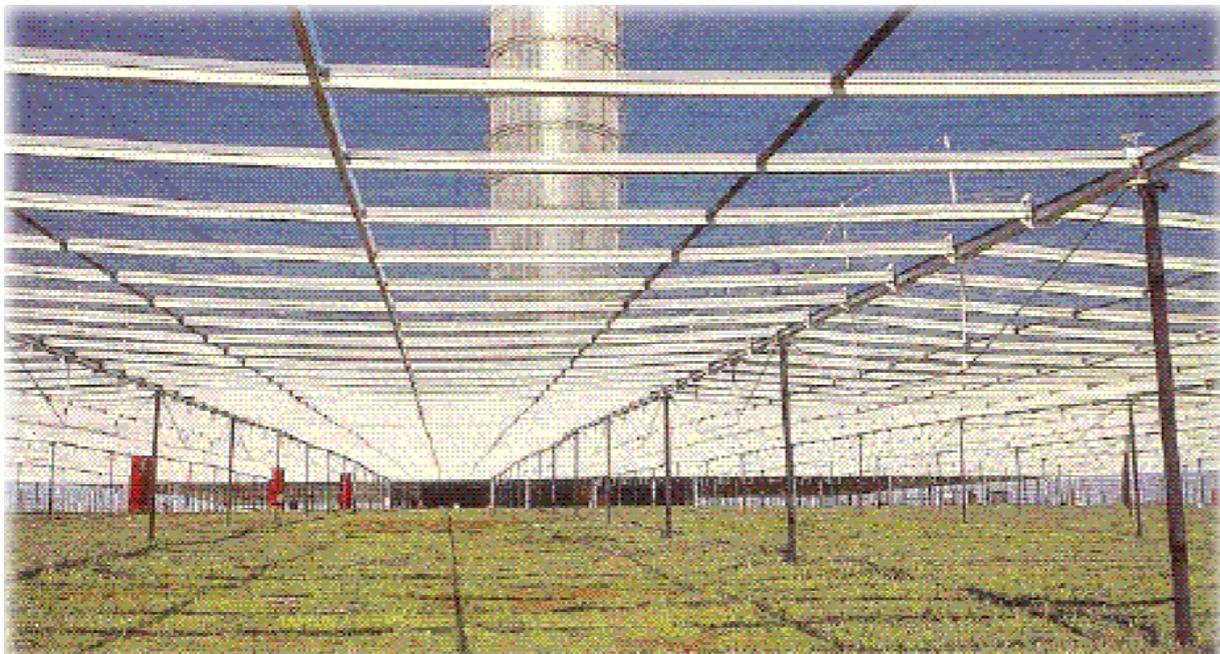


Figure (II. 1): Schéma d'une centrale cheminée solaire.

### II.3.1. Le collecteur :

Un toit en vitre ou en film plastique et la terre naturelle en dessous forment un collecteur d'air. Le collecteur est ouvert à la périphérie pour permettre l'introduction de l'air frais. Le toit du collecteur (qui est située en quelques mètres au-dessus de la terre a pour but de rassembler les rayons solaires pour réchauffer la masse d'air à l'intérieur du collecteur. Donc l'ensemble du collecteur fonctionne sous le principe de la serre qui est appliquée dans l'agriculture où on l'appelle la serre agricole. Au milieu du collecteur, est placée une cheminée verticale avec un joint étanche entre sa base et le toit. La hauteur de toit augmente au voisinage de la base de cheminée, afin que l'air soit détourné en mouvement vertical. Il est avantageux d'augmenter la capacité du toit de collecteur, en fournissant un double vitrage près de la cheminée [10].

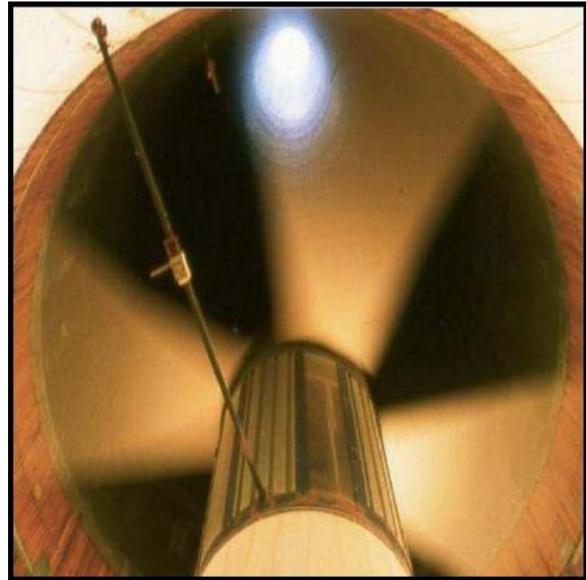
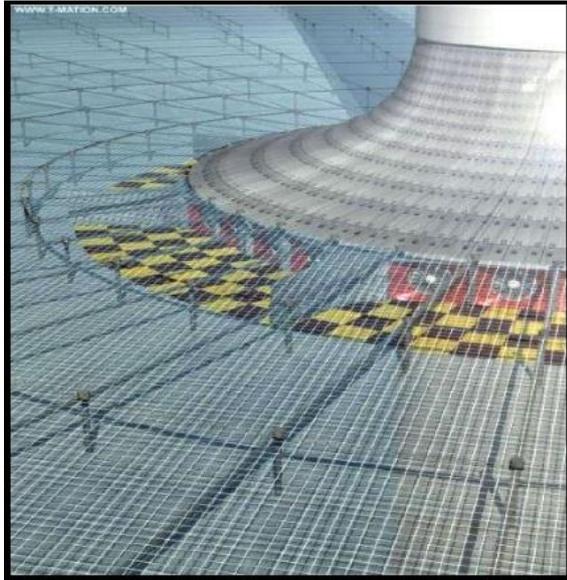


**Figure (II. 2) :** Vue intérieure du collecteur solaire [10].

### II.3.2. La turbine :

La turbine est située sur le parcours de l'écoulement du fluide. Elle transforme l'énergie cinétique du fluide en énergie mécanique. Celle-ci sera ensuite transformée en énergie électrique par le biais d'un générateur.

Les turbines éoliennes sont placées, soit horizontalement dans le collecteur, soit verticalement dans la cheminée. Afin d'obtenir le maximum d'énergie à partir de l'air chauffé, les aubages des turbines doivent couvrir toute la section de la cheminée. Pour ces considérations, une grande turbine ou plusieurs petites turbines devraient être utilisées au pied de la cheminée.



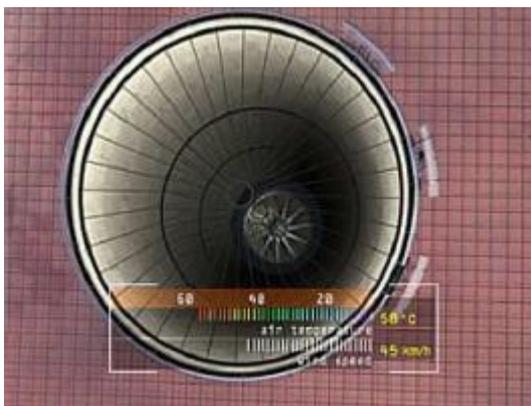
**Figure (II.3) :** Vue des turbines horizontales. **Figure (II.4):** Vue d'une turbine verticale [3].

### II.3. 3. La cheminée :

La cheminée est le moteur réel de l'équipement .Pour créer un écoulement d'air sous forme de vent, il faut engendrer une différence de pression.

Il faut que la hauteur de la cheminée soit plus élevée, pour atteindre un niveau de basse pression par rapport au niveau de la base. Donc la pression de l'air à la sortie de la cheminée est inférieure à celle d'entrée, ce qui augmente la vitesse d'élévation verticale de l'air chaud dans la cheminée.

La base est fixée sur la terre par des supports, qui séparent entre les entrées de l'air, ce qui permet d'augmenter la vitesse d'écoulement .La cheminée est généralement construite en béton armé [10].



**Figure (II. 5):** Vue d'une cheminée.

Le tableau (II.1) ci-dessous résume les différents paramètres [11] :

**Tableau (II. 1):** Echanges entre les différents domaines [11].

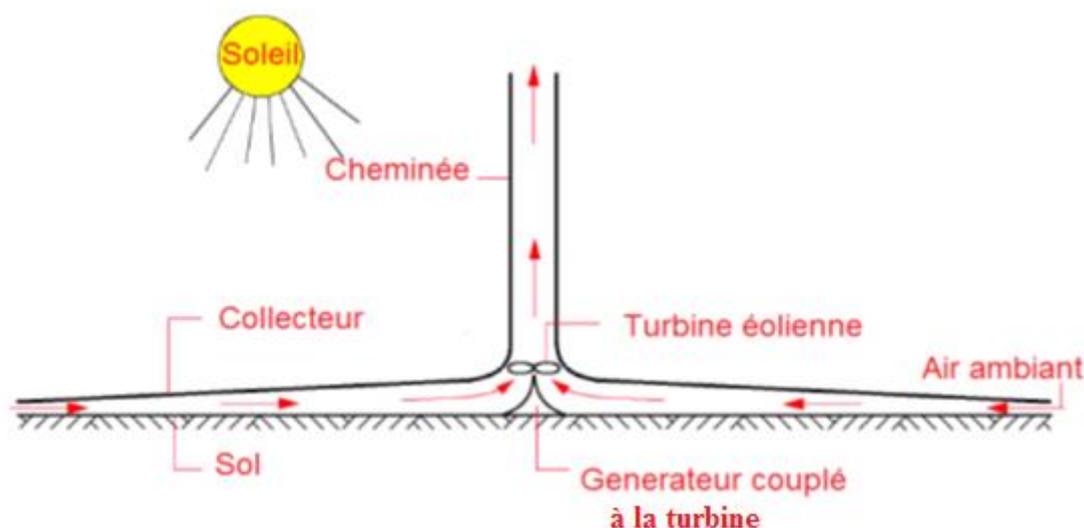
	Vitrage	Air	Sol	Paroi	Turbine
Collecteur	-Conduire l'air. -Conserver la chaleur dans le système. -Permettre l'entrée du flux solaire.	Porter l'énergie (cinétique et thermique).	-Capter le rayonnement solaire. -Stocker la chaleur. -Transmettre la chaleur. -Conduire l'air		
Cheminée		Porter l'énergie (cinétique).		Conduire l'air.	
Turbine					Récupérer l'énergie

#### II.4. Principe de fonctionnement de la cheminée solaire :

L'air est chauffé par le rayonnement solaire par effet de serre dans le collecteur qui est ouvert à la périphérie pour introduire l'air frais, et puisque l'air chaud est plus léger que l'air froid, il s'élève en haut d'une cheminée localisée au centre du collecteur.

Une turbine à la base de la cheminée est mise dans la trajectoire de l'écoulement de l'air pour convertir l'énergie cinétique de l'air écoulant en énergie mécanique, et le générateur entraîné par la turbine convertit l'énergie mécanique en énergie électrique.

Une cheminée solaire avec un terrain large pour le collecteur et une cheminée plus haute peut produire de 100 à 200 MW pendant la journée.



**Figure (II. 6):** principe de fonctionnement d'une centrale à cheminée solaire.

## II.5. Le système de stockage :

Le stockage de l'énergie thermique est assuré par des tubes noirs remplis d'eau, et mis côte à côte sur le sol. Ils sont remplis d'eau une seule fois et restent par la suite fermés, afin qu'aucune évaporation ne puisse avoir lieu.

Le transfert de chaleur entre les tubes noirs et l'eau est beaucoup plus grand que celui entre la surface et les couches profondes du sol, et puisque la capacité calorifique de l'eau ( $4.182\text{kJ/kg}$ ) est beaucoup plus grande que celle du sol ( $0.75 - 0.85\text{kJ/kg}$ ), l'eau à l'intérieur des tubes stocke une grande partie de la chaleur solaire et la libère pendant la nuit, quand l'air dans le collecteur se refroidit.

La quantité d'eau utilisée pour le stockage a un effet sur la production de l'énergie électrique. On voit que la production de l'énergie électrique atteint la valeur maximale vers midi, mais cette valeur diminue avec l'augmentation de la quantité d'eau de stockage. Dans le cas où il n'existe pas de l'eau de stockage, la production de l'énergie électrique pendant le jour est plus élevée que celle avec l'eau de stockage, mais elle se réduit pendant la nuit et devient minimale en comparaison avec la production en présence de l'eau de stockage. Dans le cas où il existe de l'eau de stockage, la production de l'énergie électrique augmente avec la diminution du volume d'eau dans les tubes de stockage pendant le jour, par exemple pour les tubes de  $5\text{cm}$  de diamètre l'énergie électrique produite pendant le jour est plus élevée que celle avec des tubes de  $10\text{cm}$  de diamètre, mais pendant la nuit, c'est l'inverse. Ce qui nous oblige de choisir une quantité convenable de l'eau de stockage.

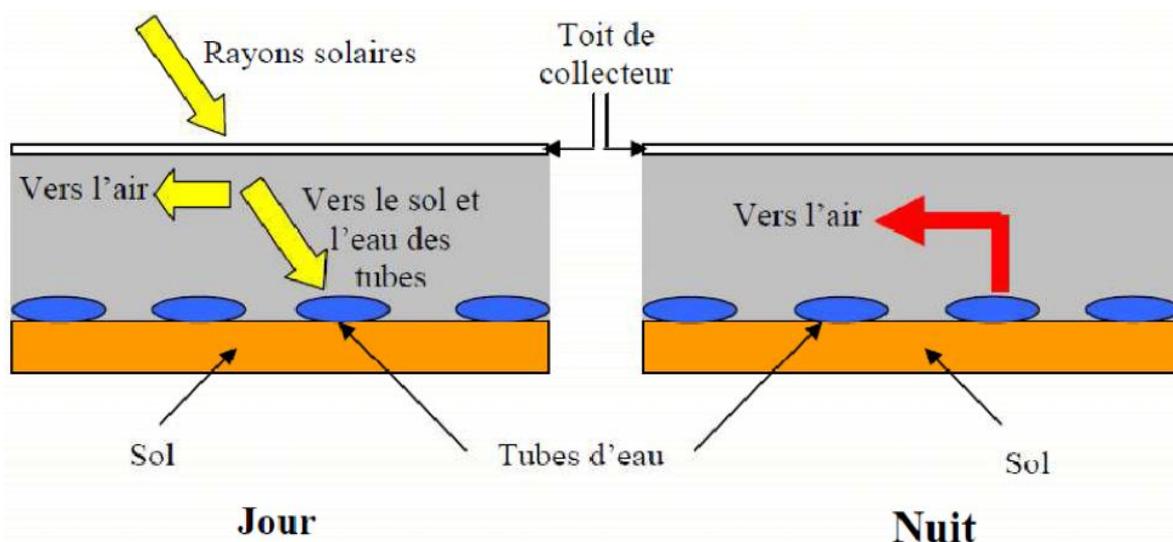


Figure (II. 7): Principe de stockage de la chaleur dans le collecteur.

## **II.6. Les avantages et les inconvénients :**

### **II.6.1. Les avantages :**

- Le collecteur peut employer tout le rayonnement solaire, direct et diffus.
- En raison du système de stockage de chaleur, la cheminée solaire actionnera 24 h sur l'énergie solaire pure.
- Les cheminées solaires sont particulièrement fiables et non exposées à décomposer, dans la comparaison avec d'autres installations de production solaires.
- Vue de la robustesse de sa structure, la cheminée solaire n'a pas besoin d'un grand entretien et fonctionne naturellement. Elle n'exige pas des carburants non renouvelables pour le fonctionnement et ne produit pas n'importe quelles émissions.
- Les cheminées solaires n'a pas besoin de l'eau de refroidissement. C'est un avantage principal dans les nombreux pays ensoleillés qui ont déjà des problèmes majeurs avec l'eau potable.
- Les matériaux de construction requis pour les cheminées solaire, principalement le béton et le verre, sont disponibles partout en quantité suffisante.
- Elle a une longue durée de vie (au moins 80 à 100 ans). La technologie d'une centrale électrique de cheminée solaire ne deviendra pas périmée facilement.

### **II.6.2. Les inconvénients :**

- L'investissement de départ est plus élevé
- La production n'est pas constante pendant le jour ou l'année.
- Aucune structure d'échelle semblable n'a été construite auparavant.
- La construction de la cheminée demande des quantités énormes de matériels. Ces quantités peuvent causer des problèmes logistiques appartenant à la disponibilité et le transport des matériels.
- Le collecteur occupe une immense surface.
- Impact visuel négatif (certains y voient une dégradation du paysage).

## **II.7. Les projets :**

Au vue de l'impact et de l'importance des énergies renouvelables, en particulier l'énergie solaire, dans le monde, de nombreux pays se sont intéressés à la production d'électricité par utilisation des CCS et ont construits des prototypes. Ces pays sont en particulier : la Chine, l'Espagne et les Etas Unis. Ci-dessous quelques projets de CCS réalisés à travers dans le monde.

### II.7.1. Le prototype de Manzanares :

Suites à des recherches théoriques et à une série d'expériences en soufflerie, une première tour solaire a été testée dans les années 1980 par le bureau d'études « Schlaich Bergermann & Partner » de Stuttgart, pouvant atteindre un pic de production électrique de  $50kW$  . Le prototype construit est situé à  $150 km$  de Madrid, à Manzanares, sur un site livré par la « Spanish utility Union Electrica Fenosa » Cette tour prototype fut réalisée avec des fonds du ministère allemand de la recherche et de la technologie « BMFT : German Ministry of Research and Technology » et a fonctionné entre 1982 et 1989 [12,13].

Le but de ce projet était de vérifier expérimentalement les résultats obtenus par les calculs théoriques et d'examiner l'influence de chaque composant sur le rendement et la puissance délivrée par une telle installation sous des conditions technologiques et météorologiques réelles. La figure II.8 montre une photo de ce prototype.



**Figure (II. 8):** Prototype de Manzanares.

La tour a été construite avec des tubes de guidages couverts par des plaques trapézoïdales d'une épaisseur de  $1.25 mm$ . Elle repose sur une base circulaire surélevée de  $10 m$  par

rapport au niveau du sol. Cette base est supportée par 8 poutres très fines pour ne pas gêner la circulation de l'air. Elle est maintenue sur 4 niveaux et dans 3 directions, avec des câbles raccordés au sol.

La turbine utilisée est posée sur une structure métallique à 9 m du niveau du sol. Elle a 4 pales ajustables en fonction de la vitesse de l'air atteinte dans la structure. L'ajustement des pales permet de régler la chute de pression à travers la turbine, afin de pouvoir obtenir une puissance électrique optimale. Le couvert du collecteur est transparent et permet une bonne circulation de l'air ; de plus, il doit aussi avoir une longue durée de vie et un prix raisonnable. Plusieurs types de plastique et de verre ont été sélectionnés afin de déterminer le meilleur matériau destiné à cette fonction. Le verre présente une meilleure résistance aux tempêtes, une longue durée de vie, en plus les pluies occasionnelles assurent son nettoyage, contrairement au plastique qui présente un coût initial relativement bas mais qui se déchire et se dilate après un certain temps.

#### **Spécifications du projet :**

- Une cheminée de 194.6 m de hauteur ;
- Rayon de la tour : 5.08 m;
- Rayon moyen de collecteur : 122.0 m ;
- Hauteur moyenne de toit : 1.85 m;
- Vitesse de l'air dans la cheminée : 12 m/s (43 km/h) ;
- Nombre de turbine: 1 ;
- Température de l'air chauffé dans la cheminée : 50 °C ;
- Puissance électrique produite : 50 kilowatts ;
- Collecteur couvert de membranes en plastique : 40.000 m<sup>2</sup> ;
- Collecteur couvert de verre : 6.000 m<sup>2</sup>.

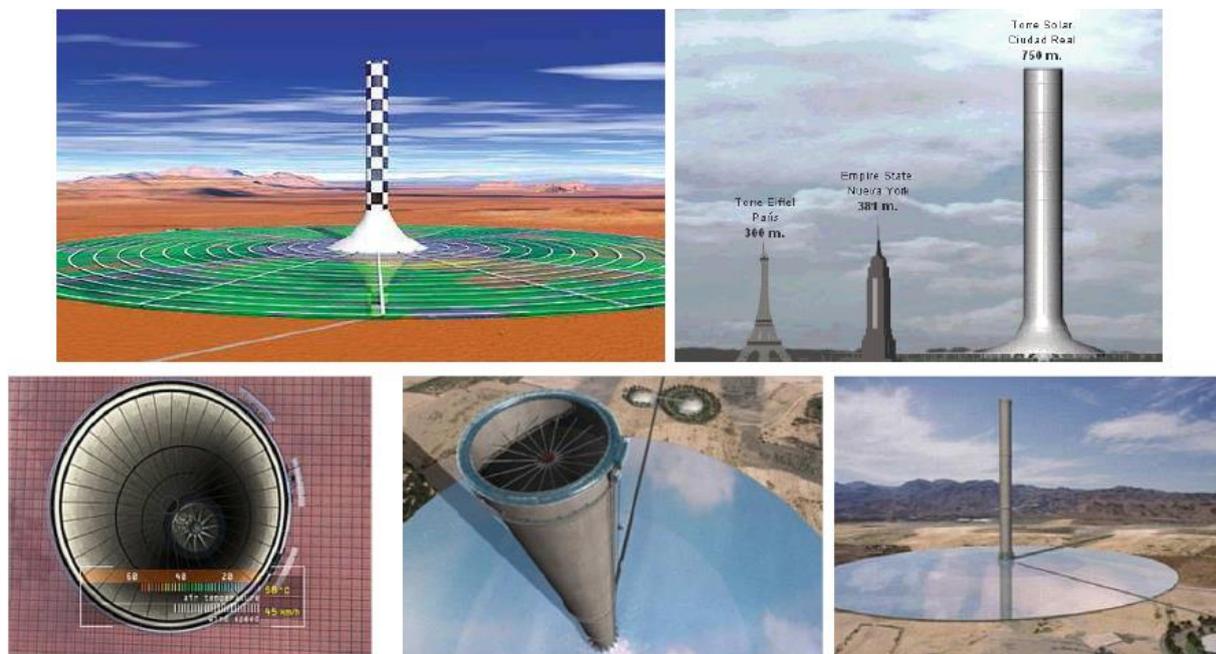
#### **II.7.2. Le projet espagnol :**

Un autre projet de tour solaire, prévu pour arriver à l'échéance avant 2011, si le financement est trouvé, est actuellement développé en Espagne dans la localité de Fuente el Fresno, un village de la Province de Ciudad Real. Les travaux devraient être menés en collaboration avec les entreprises espagnoles Campo3 et Imasa, et la compagnie allemande Schlaich Bergermann. Cette tour de 750 mètres de hauteur serait dès lors la plus haute en Europe.

➤ **Spécifications du projet :**

- 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.
- Vitesse de l'air dans la cheminée : 43 km/h.
- Puissance de l'installation : 40 MW, soit la demande en électricité d'environ 120 000 personnes.
- Coût du projet : 240 millions d'euros.

Comme tous les autres, ce projet produit un kWh beaucoup trop cher pour rendre le projet rentable sans source de revenu annexes: en l'occurrence, l'installation d'équipements de télécommunication et de surveillance contre les incendies, et tourisme [11].



**Figure (II. 9):** Vu du projet Espagnol.

### II.7.3. Le projet Australien (Buronga) :

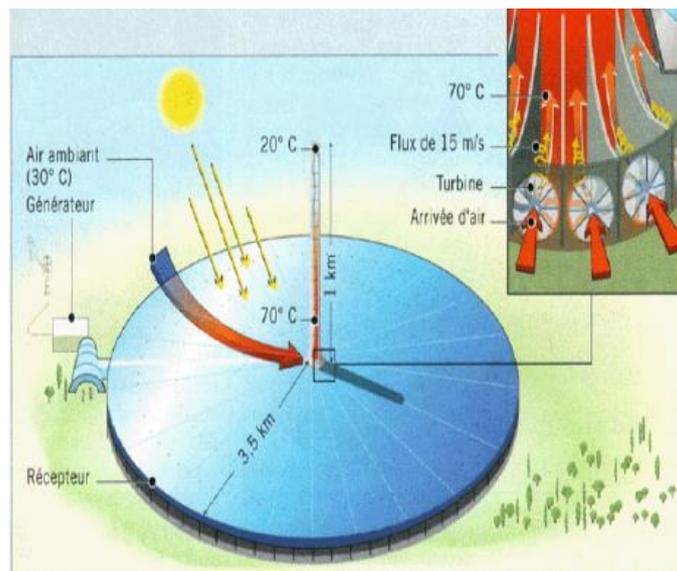
Un projet de tour solaire, appelé Projet de Buronga, prévu pour 2011, est actuellement développé en Australie par la société « Enviromission ». La cheminée a 990 mètres de hauteur et 70 mètres de diamètre. La centrale fournirait 200 MW de puissance électrique, de quoi approvisionner en électricité environ 200 000 logements. Il s'agit d'un des projets les plus ambitieux de la planète pour la production d'énergie renouvelable sûre et propre, les centrales solaires existantes ou en projet sont plutôt de l'ordre de 10 MW, soit 20 fois moins.

Le coût d'investissement serait d'environ 400 millions d'euros, ce qui implique un coût d'investissement de 2 €/W. Par comparaison, un système photovoltaïque de 2008 coute environ le triple, tandis que la récente centrale solaire thermodynamique (11 MW) a coûté 3,2 €/W, soit 1,6 fois plus. Le kWh fourni resterait néanmoins toujours cinq fois, plus cher que l'électricité de charbon, qui représente 95% de la production en Australie.

➤ **Spécifications du projet :**

- Une cheminée de 990 m de haut.
- Un collecteur de 7 km de diamètre, soit 38,5 km<sup>2</sup> de verre et de plastique.
- Température de l'air chauffé dans la cheminée : 70 °C.
- Vitesse de l'air dans la cheminée : 15 m/s (54 km/h).
- 32 turbines.
- Puissance produite : 200 MW.

Ce projet peut paraître incroyable mais ses concepteurs le disent réaliste. Les études de faisabilité par le bureau d'ingénieurs allemand SBP, basée à Stuttgart, arrivent à leur terme. Cette tour solaire serait donc construite par l'entreprise « Enviro Mission » dans le désert de Nouvelle- Galles du Sud, dans le comté de Wentsworth. Si le financement est trouvé, sa construction devrait commencer avant 2011. Récemment « Enviro Mission » s'est lancé dans le développement d'une première version plus petite et moins coûteuse (50 MW) avec une cheminée en béton précontraint haute résistance. On s'inquiète tout de même de la lenteur du projet au vu des sommes mises en jeu et des investissements déjà réunis.



**Figure (II. 10) :** Cheminée solaire de BURONGA.

#### II.7.4. Centrale cheminée d'Arizona :

La firme australienne Enviro Mission, spécialisée dans le développement de tours solaires productrices d'énergie, développe actuellement un projet technologique de grande envergure dans le désert de l'Arizona.

Faithful& Gould, société nord-américaine de conseil en construction s'est associée au projet pour ériger cette centrale solaire de 200 MW. Avec la génération de cette puissance électrique, 150 000 foyers américains pourront être alimentés. Cette nouvelle technologie fournira de l'énergie, que l'on peut considérer comme propre, pendant 80 ans avec très peu d'entretien.

La tour solaire d'Enviro Mission est constituée de 3 éléments : Le canopée, la tour et les turbines. La canopée est une énorme serre en verre où le soleil vient réchauffer l'air emprisonné sous la verrière.

La tour, placée au centre de la serre constitue le moteur thermique de cette technologie. Elle transforme la chaleur en énergie mécanique. L'air chaud, qui est plus léger que l'air froid, remonte le long de la tour pour s'échapper et se refroidit en prenant de l'altitude, créant ainsi un courant d'air ascendant continu. Plus la tour est haute, plus la vitesse du courant d'air est élevée et plus il est possible de l'exploiter.

Les turbines disposées à la base de la tour, utilisent la pression de l'air ascendant pour générer, grâce à leurs hélices, de l'électricité comme le font les centrales hydroélectriques traditionnelles. L'avantage de cette technologie est qu'elle fonctionne sur le principe du différentiel de température entre l'air chaud et l'air froid. Par ailleurs, pendant la journée, l'air sous la serre est tellement réchauffé (80 à 90°C) que la centrale continue de travailler la nuit. Cette structure gigantesque de 800 mètres de haut et 130 mètres de diamètre au sommet, sera presque aussi haute que le plus grand building de la planète : Burdj-Khalifa de Dubaï.

Actuellement en cours d'ingénierie et d'acquisition des terrains, Enviro Mission estime que le projet coûtera environ 750 millions de dollars. Cette centrale solaire générera 200 MW et son rendement sera de 60%, soit bien plus efficace que beaucoup d'autres énergies renouvelables. L'édifice sera rentable après 11 ans d'exploitation. Par ailleurs, le « Southern California Public Power Authority » a déjà accepté d'acheter de l'électricité produite par la tour d'Enviro Mission pendant les 30 prochaines années.

Si tout se passe bien, la tour solaire de l'Arizona devrait commencer à produire de l'énergie électrique en 2015. La figure (II.11) montre une photo du prototype de CCS américain [3].



**Figure (II. 11):** Photo de CCS d'Arizona [3].

### II.7.5. Projet Namibie :

Le plus grand projet de centrale solaire aérothermique au monde est actuellement à l'étude dans plusieurs universités allemandes. Une cheminée solaire de 1.500 m de haut, d'une capacité de 400 MW, associée à des plantations assurant une séquestration de  $CO_2$ , importante, devrait voir le jour en Namibie et proposer l'énergie renouvelable la moins chère du marché mondial.

Plusieurs équipes de chercheurs allemands, mettent au point, à la demande de l'énergéticien namibien « Nam Power », une centrale solaire aérothermique de 1500 m de haut. "The Greentower" est une immense serre circulaire en verre de  $25km^2$  qui chauffe l'air au sol afin de créer un courant chaud dans une cheminée centrale dotée de turbines. La nuit, la chaleur résiduelle émise par le sol suffira à maintenir la production.

L'installation devrait avoir une capacité de 400 MW et offrirait l'énergie durable la moins chère du marché : 1,5 centime d'euros/kWh entre 30° nord et sud et 2,0 centimes d'euros/kWh en moyenne aux latitudes européennes. En plus de la production d'énergie, la serre accueillera également des plantations particulièrement voraces en  $CO_2$ , qui séquestreront 5 fois plus de  $CO_2$  que n'en produit une centrale à charbon de capacité équivalente. Le but

recherché est de proposer la première source d'énergie véritablement neutre en carbone. Par ailleurs, 30.000 emplois devraient être créés autour de la centrale. Cependant, il reste à trouver les investisseurs, pour couvrir un coût global d'environ 600 millions d'euros. Les promoteurs du projet assurent un retour sur l'investissement de 50%, taux très alléchant sur un marché de l'énergie en crise.

### II.8. Coûts :

Avec l'aide et la collaboration de compagnies du BTP, de l'industrie verrière et des fabricants des turbines, un coût estimatif très précis pour une Tour Solaire de 200 MW a pu être déterminé et calculé. Ils ont chargé le cabinet "Energie Baden Württemberg" de déterminer les coûts de production comparatifs d'usines de production d'électricité à charbon et à cycle combiné sur la base des méthodes communes et identiques.

### II.9. Le couts de la production de l'énergie :

Le tableau (II.2) illustre la Comparaison entre les coûts de l'énergie produite par deux tours solaires de 200 MW, par une usine au charbon de 400 MW et par une usine a cycle combiné, d'après les données disponibles en 2002 [10].

**Tableau (II. 2):** Comparaison entre les coûts de l'énergie produite par deux tours solaires de **200 MW**, par une usine au charbon de **400 MW**

Proportion de	Cheminée solaire Cent/kWh	Charbon Cent/kWh	2xC.C Cent/kWh
Investissement	5.79	1.99	1.08
Carburant	0.00	1.98	3.36
Personnel	0.05	0.39	0.16
Entretien	0.25	0.47	0.42
Assurance	0.01	0.14	0.06
Autre couts actives	0.00	0.59	0.02
taxe	0.07	0.35	0.19
<b>Total</b>	<b>7.17</b>	<b>5.91</b>	<b>5.29</b>

#### ➤ Remarque :

La durée de vie d'une cheminée solaire est de 80-100 ans.

La durée de vie d'une usine au charbon est de 10-30 ans.

La durée de vie d'une usine à cycle combiné est de 10-30 ans.

*Chapitre III*  
*Etat de l'art*  
*sur les centrales*  
*à cheminée solaire*

### III.1 Etudes théoriques :

Le travail pionnier de J. Schlaich [15] sur le concept de la CS pour l'exploitation de l'énergie solaire en vue de la production d'électricité, a été suivi par de nombreux travaux à caractères études théoriques et / ou expérimentales pour la modélisation des CCS à grande échelle.

En effet, Schlaich et al. [16, 17] Ont étudié l'extrapolation des données expérimentales du prototype de Manzanares aux grandes centrales (5, 30 et 100 MW). En se basant sur un modèle mathématique, Schlaich a démontré qu'il n'existe pas de dimension optimale pour une cheminée solaire. Cependant si le coût de réalisation est pris en considération, la centrale peut être optimisée thermodynamiquement [16].

Une étude théorique simplifiée de la CCS a été décrite, puis des résultats de conception, de réalisation et de fonctionnement du prototype de Manzanares ont été présentés.

Des considérations techniques et des données économiques de base pour de futures installations de CCS commerciales comme celle d'Australie ont été discutées. Les auteurs ont également proposé des solutions aux contraintes que peuvent présenter les CCS, tout en justifiant les avantages de tels systèmes.

Une étude fondamentale sur le prototype de la CCS espagnol à été réalisé par Haaf et al. [18]. Dans leur article, les auteurs analysé brièvement le bilan énergétique, les critères de conceptions et l'analyse des coûts.

Haaf [19] a reporté les résultats des tests préliminaires menés sur la CCS de Manzanares. Depuis, des efforts considérables ont été déployés pour dimensionner et estimer les performances énergétiques des CCS pour démontrer leur faisabilité ainsi que leur rentabilité.

Mullet [20] a présenté une analyse pour déterminer l'efficacité globale de la cheminée solaire. Padki et Sherif [21, 22] ont mené des investigations sur la viabilité des CCS à produire de l'énergie électrique à moyenne et grande puissance et la production d'énergie en lieu rural.

Dans un autre article, les auteurs [23, 24] ont discuté les effets des paramètres géométriques et d'exploitation sur les performances énergétiques de la CCS. Ils ont proposé un modèle analytique simple pour la prédiction des performances d'une CCS avec une erreur de 6 % en

comparaison avec des prédictions, faites à base de la résolution d'un modèle mathématique composé des équations de continuité, de conservation de la quantité de mouvement et d'énergie, régissant l'écoulement unidimensionnel de l'air chaud dans la tour de la cheminée solaire.

Yan et al. [25] ont développé un modèle analytique simple, facile à exploiter où des corrélations pratiques ont été utilisées pour déterminer le débit et la vitesse d'écoulement d'air ainsi que la puissance et l'efficacité de CCS. Il est à noter, que le modèle présenté par les auteurs, considère la turbine de la cheminée solaire comme une éolienne qui, en réalité, va dévier le vent, même avant qu'il atteigne le rotor. Le rendement théorique maximum de 16/27 ou de 59%, d'après la loi de Betz, ne s'applique pas pour les turbines des cheminées solaires.

Kreetz [26] a présenté un modèle numérique incluant le cas de l'utilisation de l'eau comme moyen de stockage de l'énergie solaire dans le collecteur. Les calculs ont montré la possibilité d'un fonctionnement continu jour et nuit, de la CCS.

Pasumarthi et Sherif [27] ont fait une étude pour démontrer la viabilité de la centrale à cheminée solaire comme technologie alternative, appropriée et adaptable à des zones climatiques chaudes telles que celles de la Floride. Un modèle mathématique a été élaboré pour estimer la température et la puissance développée par les cheminées solaires ainsi que l'étude de l'effet des conditions ambiantes et des dimensions structurelles sur la puissance de sortie. Des essais ont été effectués sur un modèle expérimental, conçu à cet effet et deux types de collecteurs ont été testés: l'élargissement de la base du collecteur et l'introduction d'un absorbeur intermédiaire. Les températures expérimentales obtenues ont été trouvées plus élevées que les températures prédites théoriquement. Les auteurs ont justifié que l'une des raisons de ce comportement est dû au fait que les températures expérimentales rapportées sont les températures maximales atteintes à l'intérieur de la cheminée, tandis que le modèle théorique prédit la température moyenne de l'air.

Les mêmes auteurs [28] ont entrepris une étude en deux parties : la première, en vue de prédire les performances d'une CCS à grande échelle à Gainesville en Floride. Les auteurs ont présenté une étude théorique d'une cheminée solaire typique basée sur un modèle d'écoulement unidimensionnel pour évaluer l'effet des différents paramètres de fonctionnement et de construction sur la température de l'air, sa vitesse et la puissance

produite par la cheminée solaire. Ces derniers, ont adopté le modèle simplifié de Betz pour la turbine dans la cheminée, ce qui est incorrecte, car le fonctionnement d'un aérogénérateur dans une cheminée solaire diffère de celle installée à l'extérieur.

Dans la deuxième partie, les auteurs [29] ont présenté les résultats expérimentaux effectués sur un prototype de CS de démonstration à échelle réduite. Ils ont affirmé que la puissance produite par une cheminée solaire est directement proportionnelle au produit du gradient de température et du débit d'air. L'augmentation de la puissance produite pourra être obtenue par augmentation de la surface de captation ou par augmentation de la hauteur de la tour. Dans le cas où l'augmentation de la hauteur de la tour s'avère coûteuse, où on ne peut pas apporter une augmentation significative de débit, on a recours à d'autres artifices, tels que l'adjonction d'obstacles dans la conduite de passage d'air pour augmenter le débit d'écoulement. Le modèle mathématique proposé par ces auteurs est capable de prédire les performances de la centrale de référence de Manzanares en Espagne avec une marge d'erreur de 20 % sur la vitesse d'écoulement et de 5 à 9% sur la puissance produite.

Bernardes et al. [30] ont présenté une analyse théorique d'une cheminée solaire fonctionnant en régime stationnaire et en convection naturelle laminaire. Afin de prédire le comportement thermo-hydrodynamique de l'air, des conditions aux limites thermiques ont été imposées à l'entrée, de manière à garantir un écoulement laminaire et stationnaire le long du dispositif. Le modèle mathématique établi a été résolu par la méthode des volumes finis en coordonnées généralisées.

Après avoir effectué une recherche bibliographique assez riche, les auteurs [31] ont élaboré une analyse portant sur les cheminées solaires et visant le développement d'un modèle analytique et numérique permettant de décrire les performances des cheminées solaires. Ce modèle a été élaboré pour estimer la puissance de sortie des cheminées solaires ainsi que d'examiner l'effet de diverses conditions ambiantes et des dimensions structurelles caractéristiques sur la puissance développée. Les résultats du modèle mathématique ont été comparés avec les résultats expérimentaux collectés sur la centrale de Manzanares, pour être ensuite utilisé pour prédire les performances caractéristiques des CCS à grande échelle à caractère commerciale. Ces résultats montrent que la hauteur de la cheminée, le facteur de chute de pression à la turbine, le diamètre et les propriétés optiques du collecteur sont des paramètres importants pour la conception des cheminées solaires. Les auteurs ont déduit que

la puissance maximale peut être atteinte lorsque le facteur de chute de pression à la turbine est égal à environ 0,97.

Backström et Gannon [32] ont présenté une approche du phénomène d'écoulement d'air dans les CCS, en développant une étude unidimensionnelle d'un écoulement de fluide compressible pour le calcul de toutes les variables thermo- dynamiques régissant cet écoulement. Ils ont montré que ces variables sont dépendantes de la hauteur de la cheminée solaire, du frottement sur les parois, des pertes supplémentaires, du friction interne et de l'échange thermique entre les différents zones.

Gannon et Von Backström [33] se sont penchés sur une analyse thermodynamique idéale du cycle d'écoulement d'air, supposé comme gaz parfait isentropique, à travers une CCS. Ils sont intéressés, dans une première partie, à définir les limites de fonctionnement du système en question et ont essayé de se rapprocher du cas réel en introduisant les pertes par frottement à travers le système ainsi que les pertes cinétiques à la sortie de la cheminée et le système de turbine, tout en adoptant un modèle simple qui inclue le fort couplage existant entre le débit d'air et l'élévation de la température à travers le collecteur.

Dai et al. [34] ont présenté, dans leur article, une méthode itérative basée sur un modèle global de connaissance régissant l'écoulement d'air dans une cheminée solaire typique fictive et fonctionnant dans trois régions de l'ouest de la chine. Afin de prévoir les performances de la cheminée solaire, les auteurs ont présenté une méthode simple en se basant sur le modèle théorique des capteurs à air bien connus dans la littérature solaire. Ces modèles tiennent compte de la captation solaire, du gain utile de fonctionnement et de la puissance électrique à la sortie de la turbine.

Les auteurs ont conclu que la puissance produite est fortement influencée par l'augmentation de la radiation solaire en comparaison avec la température ambiante. La puissance produite augmente de manière non linéaire avec l'augmentation de la surface de captation et de la hauteur de la tour de la cheminée. Cette augmentation devient moins sensible dans le cas des cheminées à grande échelle par rapport aux cheminées de faibles tailles. Les auteurs ont conclu qu'une centrale cheminée solaire constituée d'un capteur à air de 500 m de rayon et d'une tour de 200 m d'hauteur et de 10 m de diamètre est capable de produire de 110 à 190 kW.

Pastohr et al. [35] ont utilisé le logiciel FLUENT (code commercial CFD) pour modéliser la CCS semblable géométriquement à celle de Manzanares dans le but d'effectuer une analyse avec plus de détail du mode de fonctionnement et du rendement du système. Ils ont confirmé que la chute de pression dans la turbine et le débit massique sont des éléments décisifs sur l'efficacité du système et ne peuvent être déterminés uniquement par l'accouplement de toutes les parties d'une centrale CCS. Les résultats numériques donnés par FLUENT rivalisent bien avec les résultats donnés par un modèle simple proposé par les auteurs, ce qui a conduit à la conclusion de pouvoir employer ce dernier tout simplement pour des études paramétriques en vigueur.

Dans l'analyse de Ming et al. [36] ont introduit un modèle numérique pour explorer l'influence de la géométrie de la CS sur les performances de la CCS. Leur modèle a permis d'évaluer les performances d'une CCS et mettre en évidence les effets de plusieurs paramètres tel que la hauteur de la cheminée solaire et son diamètre, le diamètre du collecteur ainsi que l'irradiation solaire sur la puissance développée et l'efficacité du système.

Ninic [37], a tenté de déterminer dans son étude, la dépendance du potentiel énergétique acquis de la chaleur gagnée dans le collecteur par l'air circulant dans le collecteur, l'humidité de l'air et la pression atmosphérique en fonction de la hauteur de la cheminée. Divers types de collecteurs utilisant l'air sec et humide ont été analysés.

Pretorius [38] a effectué des études approfondies sur les flux d'air et le transfert thermique dans les CCS de grande échelle. Il a montré, suite à une étude numérique, que la puissance développée est fonction de la hauteur intérieure de la toiture du collecteur et de sa forme.

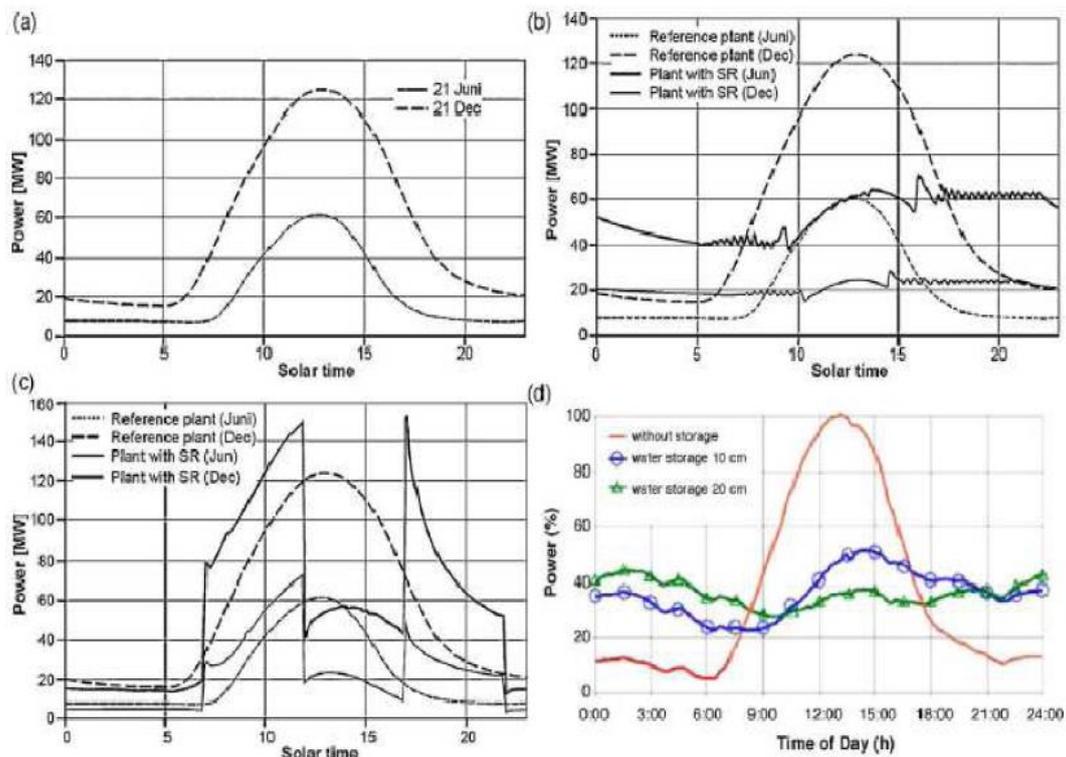
Une étude complémentaire utilisant le même modèle numérique précédent a permis à Pretorius et Kröger [39] d'évaluer l'influence des différentes expressions du coefficient de transfert thermique et autres paramètres sur les performances prédites d'une CCS. Dans cette étude, les auteurs ont critiqué l'évaluation des performances d'une CCS à grande échelle et ont présenté plus particulièrement les effets résultant de l'utilisation d'expression plus sophistiquée pour le coefficient de transfert ainsi que l'utilisation de verres de meilleure qualité pour la toiture du collecteur et de l'emploi d'un nouveau coefficient de perte plus réaliste à l'admission de la turbine.

Dans une autre étude, Pretorius, J.P., Kröger et D.G., [40] ont comparé la puissance annuelle produite, calculée avec deux estimations du coefficient de perte dû au changement de passage de section horizontale/verticale « HTVTS » « horizontal to vertical transition section » respectivement 0,25 et 0,14. Les résultats ont montré que la puissance annuelle obtenue par des calculs utilisant le coefficient de perte le plus élevé « 0.25 », était sous estimée par 0.4% uniquement.

Pretorius et al. [41] ont trouvé que la puissance annuelle calculée était moindre de 0.55% pour la même comparaison et ceci pour différentes configurations de centrales à cheminée solaire.

Le profil type de puissance développée par jour pendant l'été et l'hiver, pour une CCS, à grande échelle type (un collecteur de 5000 m de diamètre et une CS de 1000 m de hauteur et 210 m de diamètre intérieur.) [39] est illustré dans la figure III.1.a

Les profils journaliers de puissance produite d'une CCS de référence, avec toit intermédiaire secondaire pour une charge de base et de pointe ont été respectivement représentés sur la figure III.1b et c [40].



**Figure (III. 1) :** Profils de puissance à grande échelle à la fois la SCPP sans et avec une bonne performance du système de contrôle-: (a) sans la performance du système de contrôle [39], (b) avec un toit intermédiaire secondaire en tant que charge de base; (c) avec toit intermédiaire secondaire comme charge de pointe ; (d) avec supplémentaire fermée remplie d'eau du système de stockage thermique.

Les résultats ont montré que les centrales à toit intermédiaire secondaire donnent un profil de puissance de sortie journalier, plus uniforme par rapport à une centrale avec un seul toit [41].

Deux méthodes typiques et efficaces de contrôle et d'amélioration de la puissance de sortie de la CCS ont été proposées : L'instauration d'un toit secondaire sous le premier toit du collecteur [43] et l'installation de système de stockage thermique [42- 44]. L'intégration de système de stockage thermique à eau a également révélé être un bon mécanisme pour le contrôle et l'amélioration de la puissance de sortie. Ces CCS ont donné un profil de sortie journalier beaucoup plus uniforme par rapport à une CCS sans un tel système de stockage (fig. III.1).

L'étude de Chergui et al. [45] fut basée sur la modélisation du transfert thermique et de l'écoulement d'air dans les CCS avec comme hypothèse un écoulement laminaire en convection naturelle. Le modèle a été résolu par la méthode des volumes finis ce qui leur permis de déterminer le champ de vitesse et de température.

Dans l'analyse qui a été faite par, S. Larbi et al. [46] ont étudié les performances d'une CCS pour l'application dans le sud algérien. Le résultat obtenu ont montré qu'une CCS similaire à celle de Manzanares, installée dans la région d'Adrar, pourra fournir une puissance de 140 à 200 kW. Une puissance suffisante pour l'alimentation en énergie les régions isolées. L'analyse des performances de la CCS a montré que l'efficacité du collecteur et de la turbine jouent un rôle important dans la performance du système. La puissance générée dépend de l'irradiation solaire de la température ambiante, de la hauteur de la cheminée et de la surface du collecteur.

R. Petela [47] a introduit dans son modèle une analyse exergetique afin de montrer l'influence des paramètres d'entrée sur les paramètres de sortie et d'illustrer leur tendance.

Dans leur article, Zhou, Yang et al. [48] ont analysé l'effet de la hauteur maximale de la cheminée sur l'effet négatif de la convection naturelle afin de déterminer la hauteur optimale de la cheminée pour une puissance maximale. Leur modèle théorique a été validé avec les mesures du prototype de Manzanares. Leur étude a démontré que l'influence de la pression atmosphérique sur la hauteur maximale était négligeable.

Zhou et al. [49] dans leur publication, ont proposé une étude de faisabilité pour la construction d'une CCS dans la région de Qinghai (Plateau du Tibet), en appliquant un modèle mathématique simple sur différents lieux du site.

Dans l'étude de Koonsrisuk et al. [50] ont décrit la théorie « constructale » de recherche de la géométrie d'une cheminée solaire dont l'objectif est d'augmenter la production d'énergie sur la zone occupée par l'usine. Le rapport hauteur /rayon, le taux maximum de débit massique et la puissance maximale sous les contraintes d'un espace et volume fixe ont été déterminés. Les auteurs ont constaté que l'énergie produite par unité de surface est proportionnelle à la longueur échelle de la centrale. L'analyse a été validée par un modèle mathématique. Les pertes de pression ont été présentées en termes de l'échelle de longueur adimensionnelle du système, et ont été illustrés graphiquement. Les auteurs ont noté que la chute de pression à l'entrée du collecteur et à la section de transition entre le collecteur et la cheminée sont négligeable et que la perte de charge par frottement dans le collecteur peut être négligée lorsque le nombre de sveltesse ( $S_v$ ) est supérieur à.

Chiemeka Onyeka Okoye et Ugur Atikol. [58] ont étudié la praticabilité d'installer une centrale a cheminée solaire (CCS) au nord de Cyprus. La méthode utilisée pour les simulations de la production de l'électricité a été comparée et vérifié par les enregistrements expérimentaux du prototype de Manzanares, l'Espagne, avant la mise en œuvre les prévisions d'exécution pour différents tailles d'usine, diamètres de collecteur et tailles de cheminée.

L'énergie annuelle produite par la centrale cheminée solaire de 30 MW est de 94.5 GWh, qui peut couvrir les besoins annuels de l'électricité de plus de 22.128 résidences sans aucune émission de  $CO_2$ , de  $NO_x$  et de  $SO_x$ .

Sandeep K. Patel et al. [59] ont optimisé la géométrie des composants principaux du CCS en utilisant un logiciel informatique ANSYS-CFX de la dynamique des fluide (CFD) pour étudier et améliorer les caractéristiques d'écoulement à l'intérieur du CCS. La taille de la cheminée et le diamètre de collecteur du CCS ont été gardés constante à 10 m et à 8 m respectivement. L'ouverture d'admission de collecteur a été changée de 0.05 m à 0.2 m. Le diamètre de sortie de collecteur a été également changé de 0.6 m à 1 m. Le collecteurs et la cheminée ont examinés avec différents angles de divergence ( $0^\circ$ - $3^\circ$ ) et également des différentes ouvertures d'admission de cheminée de 0.6 m à 1 m. le diamètre de la cheminée à été également changés de 0.25 m à 0.3 m. basé sur le CFX informatique ils ont constaté que la meilleure configuration à été réalisés à l'aide de la cheminée avec un angle de divergence

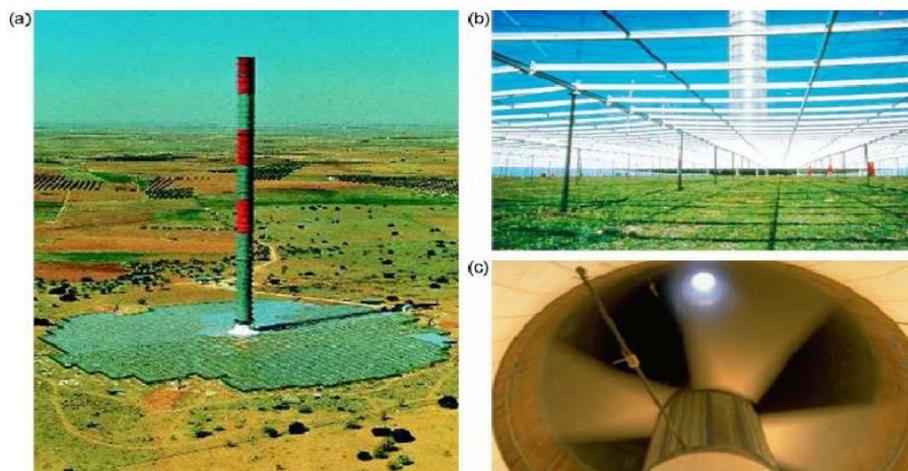
de 2° et diamètre de cheminée de 0.25 m ainsi que l'ouverture de collecteur de 0.05 m et diamètre de sortie de collecteur de 1 m. la température à l'intérieur du collecteur est plus haute pour l'ouverture inférieure ayant pour résultat un écoulement plus élevé taux et puissance.

Weibing Li et al. [60] ont développé un modèle différent des modèles existants pour analyser le coût, et l'avantage de renforcé la centrale cheminée solaire construite en Chine du nord-ouest. Basé sur des modèles et certaines prétentions, ce travail calcule la valeur nette totale (VNT) et le prix minimum de l'électricité dans chaque phase en divisant toute la période de service en quatre phases. Les résultats prouvent que le prix minimum de l'électricité dans la première phase est plus élevé que le prix du marché courant de l'électricité, mais le prix minimum dans les autres phases sont trop bas que le prix du marché courant. L'analyse indique que des avantages énormes des centrales cheminées solaire peuvent être incorporés en phases 2 - 4. En outre, l'analyse de sensibilité exécutée en cet article de découvrirai que (VNT) est très sensible aux changements dans le prix de l'électricité et le taux d'inflation solaires.

### III.2 Etudes expérimentales :

Durant ces dernières années, plusieurs prototypes expérimentaux de cheminée solaire de structures différentes, ont été conçus, réalisés et testés dans le but d'étudier expérimentalement les performances énergétiques des CCS.

Le premier prototype de centrale à cheminée solaire de 50 kW fut construit à Manzanares (Fig. III.2). Il était doté d'une cheminée métallique de 194,6 m de hauteur et de 0,00125 m d'épaisseur et un collecteur de rayon de 122 m couvert d'une toiture en PVC.



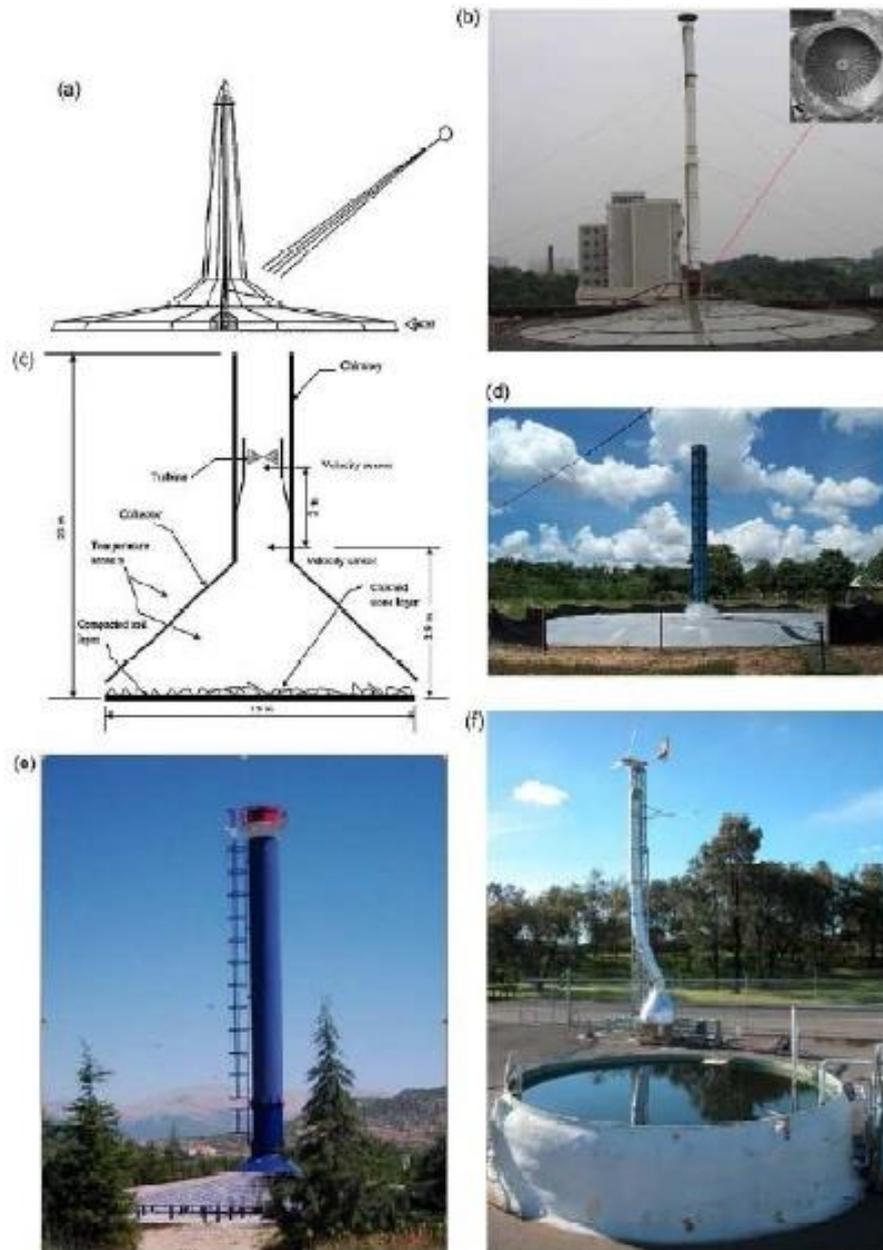
**Figure (III. 2) :** Photo de la CCS de Manzanares: a) vue globale de la centrale, b) Collecteur, c) Turbine.

Le profil de puissance produit est en étroite corrélation avec le profil d'insolation pendant la journée, pour ce prototype, sans système de stockage supplémentaire. De plus, au cours de la nuit il y'a toujours un courant ascendant en raison de la capacité de stockage thermique naturel du sol, qui peut être utilisé pour produire de l'énergie pendant les premières heures de la nuit [19].

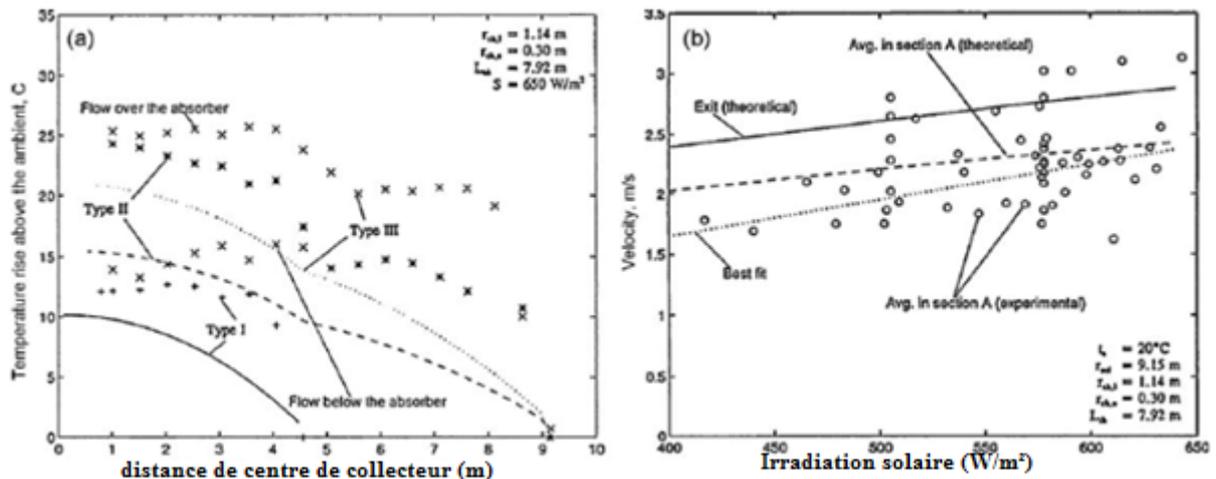
En 1983, Krisst [52] a construit une petite installation expérimentale de 10W de puissance. Le diamètre de la base du collecteur et la hauteur de la cheminée étaient de 6 m et 10 m respectivement. En 1985, un modèle à micro- échelle avec une cheminée de 2 m de haut et un diamètre de 7 cm et un collecteur de  $9 \text{ m}^2$  a été construit par Kulunk en Turquie [51].

En 1997, un dispositif de centrale à cheminée solaire a été mis en place par Pasurmarthi et Sherif [56] en Floride. Le collecteur de 9.15 m de diamètre avait une toiture en Lexan La tour cheminée à 7,92 m de haut, son diamètre diminuait graduellement de 2,44 m à l'entrée à 0,61 m au sommet.

Un absorbeur en plaque d'aluminium a été prévu pour revêtir le terrain du collecteur (Configuration de type I). Deux améliorations ont été testées sur le collecteur de configuration type I, pour augmenter la puissance de sortie. Le collecteur de configuration de base de type I a été étendu pour former le collecteur de configuration Type II de 18,3 m de diamètre. Du polyane (Visqueen) noir clair avec une transparence d'environ 60% a été utilisés respectivement comme absorbeur et toiture pour la partie d'extension du collecteur de configuration « Type II ». Un absorbeur en toile (canevas) intermédiaire a été introduit entre le toit et l'absorbeur en plaque d'aluminium à l'intérieur du collecteur de configuration de type II, pour améliorer le rendement de conversion du collecteur et former le collecteur de configuration de type III.



**Figure (III. 3) :** Figures et schéma de prototypes de CCS expérimentaux : (a) Sherif et al. [43] ; (b) Zhou et al. [53] ; (c) Ketlogetswe et al. [54] ; (d) Ferreira et al. [55]; (e) Koyun et al. [52] ; (f) Golder et al. [56].



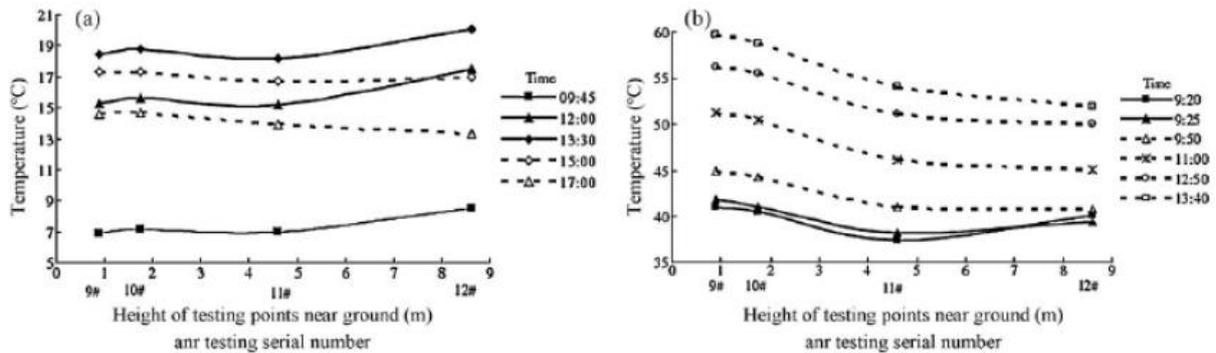
**Figure (III. 4) :** Mesures prises du prototype test de Sherif et al. (a) Le profil de température pour la configuration des trois collecteurs ; (b) La vitesse versus l'irradiation pour la 3eme configuration du collecteur.

La hausse de la température de l'air mesurée et la distribution de vitesse à différents endroits du collecteur a été illustrée dans la fig.III.5 pour les trois configurations du collecteur pour un ensoleillement de  $650$  W/m<sup>2</sup>.

L'élévation de la température de l'air du collecteur de configuration de type I, a été d'environ  $15$  °C, alors que celle du type II et III était de  $25$  et  $28$  °C, respectivement. Ceci démontre que le collecteur de configuration type I n'est pas très efficace, et que pour les collecteurs de type II et III, la variation de la température dans la section étendue était presque la même, alors que pour le collecteur dont une partie de la toiture a été couverte en Lexan, une légère amélioration a été constaté dans le collecteur de type III comparativement au collecteur de type II. Dans le collecteur de type III, l'écoulement d'air s'effectuait des deux côtés de l'extension de l'absorbeur en toile, induisant ainsi une augmentation du débit massique, et par conséquent la puissance de sortie [43].

Une installation pilote de cheminée solaire constituée d'un collecteur d'air de  $10$  m de diamètre et une cheminée de  $8$  m de hauteur a été construite à Wuhan, en Chine (Fig.III.5) en 2002 et reconstruite à plusieurs reprises. Pour une structure mise à jour, le toit du collecteur et la cheminée étaient respectivement en verre de  $4.8$  mm d'épaisseur et en PVC. La différence de température entre la sortie du collecteur et la température ambiante pouvait atteindre en général  $24,1$  °C. Un phénomène intéressant a été observé qui consiste en l'inversion de la température de l'air à la sortie de la cheminée solaire juste après le lever du soleil, et ceci pour

les journées froides ou chaudes. L'inversion de la température d'air a été formée suite au processus d'accroissement de l'irradiation solaire du point minimum pour disparaître quelque temps après, lorsque le lit de l'absorbeur est chauffé à une température suffisamment élevée pour permettre au flux d'air de briser la couche d'inversion de température et s'écouler normalement vers la sortie de la CS.



**Figure (III. 5) :** Evolution des températures de l'air dans la CS en fonction de sa hauteur Pour le prototype test de Zhou et al.

Basé sur le besoin d'un plan énergétique stratégique à long terme, Le Ministère des Sciences et de la Technologie du Botswana a conçu et construit une installation pilote de centrale à CS pour la recherche [53]. La CS a été fabriquée à partir de matériaux en polyester renforcé en fibre de verre, dont le diamètre intérieur était de 2 m et une hauteur de 22 m. Le toit du collecteur soutenu par un cadre en acier, est d'un verre clair de 5 mm d'épaisseur. L'aire du collecteur a atteint les  $160m^2$ .

Le plancher de l'absorbeur, sous la toiture, était formé de deux couches de terre compactées d'environ 10 mm d'épaisseur, et une couche de pierres concassées. La couche de pierres concassées a été étalée sur la surface supérieure de la couche de sol compacté. Cette configuration de CCS a fonctionné du 7 Octobre au 22 Novembre 2005.

Au cours de la période allant entre 6:00 h et 8:00 h, et, avec une augmentation de l'irradiation de 100 à 500 W/m<sup>2</sup>, la vitesse de l'air augmente progressivement pour atteindre une valeur élevée et rester alors presque constante jusqu'à environ 14:00 h, malgré l'augmentation de l'insolation vers 12:00 h, à un pic maximum de 950 W/m<sup>2</sup>. Environ 47% de l'énergie solaire incidente est absorbée et stockée par le sol et libéré plus tard lorsque la température locale diminue. La différence de température a augmenté de 2°C à 6H 00 à 7,5 °C à midi, et la

vitesse de l'air a varié de 1 à 2,5 m / s avec l'installation du diffuseur et de 2 à 4 m / s avec diffuseur désinstallé.

Une installation électrique à CS a été construite avec une CS de 11 m de hauteur et 1 m de diamètre, sur le campus de l'Université Fédérale de Minas Gerais, à Belo Horizonte, Brésil [53, 55].

La structure de la CS a été construite en cinq modules en bois de 2,2 m de haut chacune, recouverte intérieurement et extérieurement avec de la fibre de verre. Le capteur solaire d'un diamètre de 25 m et une hauteur de 0,5 m a été construit à partir d'un film en plastique soutenue par une structure tubulaire en acier.

Une station pilote de CCS a également été construite sur le campus de l'Université de Suleyman Demirel, à Isparta, Turquie. Elle avait une cheminée solaire de 15m de haut et 1,2 m de diamètre et un collecteur de 16 m de diamètre avec une toiture en verre [51].

*Chapitre IV*  
*Modélisation mathématique*  
*des flux énergétiques*  
*dans les centrales*  
*à cheminée solaire*

## IV.1. Introduction :

Plusieurs facteurs, tels que les conditions environnantes du site d'implantation de la centrale cheminée solaire « CCS », les dimensions, les matériaux utilisés dans la construction des composants de la tour et du collecteur solaire, la nature du sol sous le collecteur solaire, pourraient influencer les performances d'une installation cheminée solaire. Le choix de la turbine ainsi que le système de contrôle de l'installation sont aussi des éléments importants dans la production d'électricité.

La plupart des études effectuées [3] se focalisent sur la détermination du rendement de ces centrales en fonction des paramètres caractéristiques ainsi que sur l'analyse de l'interdépendance des différentes parties constituantes des CCS en définissant les paramètres influents sur la puissance générée.

Plusieurs modèles théoriques ont été proposés dans la littérature [3] afin de prédire les performances des centrales cheminées solaires. On se propose dans ce chapitre d'étudier l'un de ces modèles mathématiques. On prendra comme référence de calcul, le modèle de **Jorg Schlaich** [24] compte tenu de son travail pionnier dans le domaine et de la validation de ses résultats théoriques avec les données expérimentale.

Pour formuler un phénomène physique, on utilise souvent des équations mathématiques. Ces dernières représentent une modélisation de ce phénomène. Une formulation mathématique doit obligatoirement exprimer le comportement de ce phénomène dans l'espace et dans le temps.

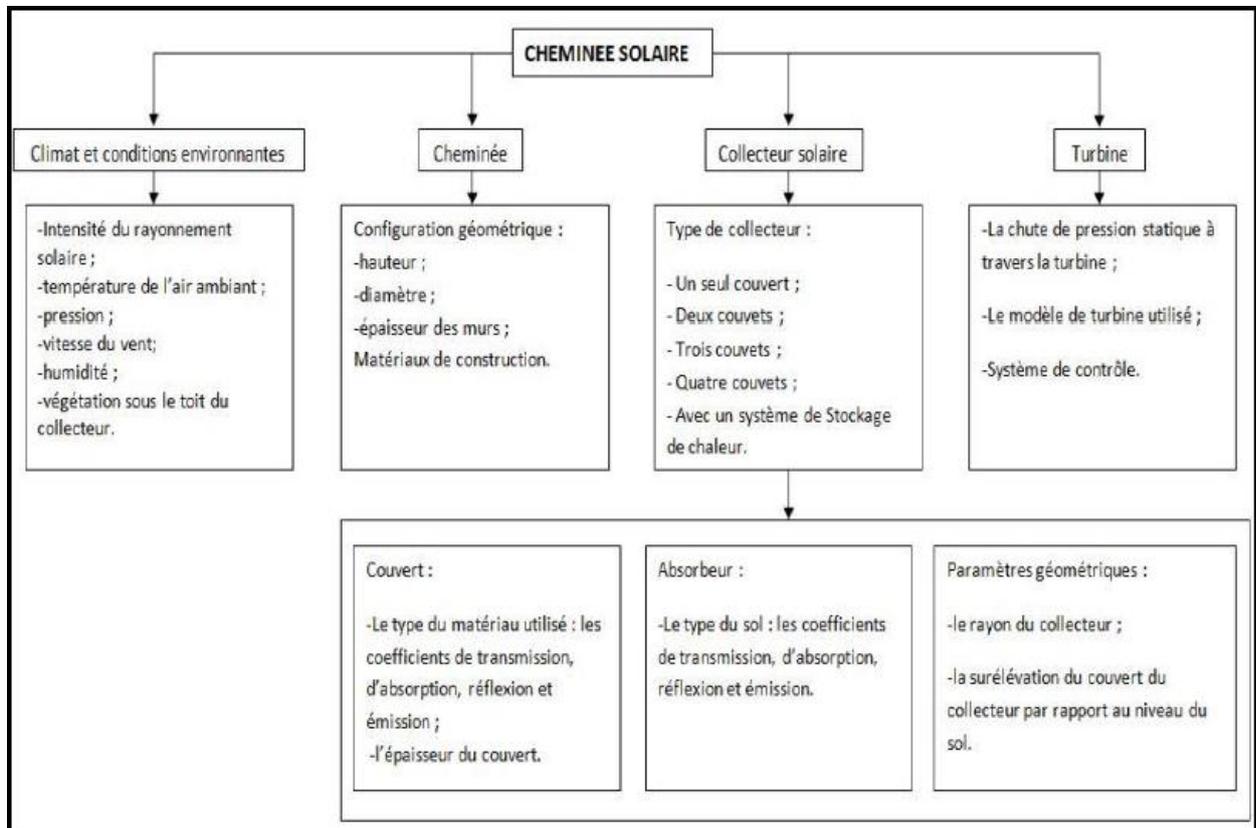
En mécanique des fluides, on suppose que le fluide est un milieu continu, ce qui permet d'utiliser les lois classiques de conservation, à savoir

- Conservation de la masse.
- Conservation de la quantité de mouvement.
- Conservation de l'énergie.

Ce chapitre présente aussi les équations mathématiques générales gouvernantes de l'écoulement en régime laminaire, il s'agit de la convection naturelle.

## IV.2. Paramètres influençant le fonctionnement d'une centrale cheminée solaire :

Il existe plusieurs paramètres qui peuvent agir sur les performances des centrales chemines solaires. La Figure (IV.1) schématise ces différents paramètres.



**Figure (IV. 1) :** Paramètres influençant le fonctionnement d'une CCS [3].

- Le site choisi pour l'implantation de la cheminée solaire permet de fixer un très grand nombre de paramètres environnementaux ainsi que la nature du sol sous le couvert du collecteur.
- L'intensité du rayonnement solaire qui est la source d'énergie pour le fonctionnement de la cheminée solaire représente un paramètre décisif pour le choix du site de construction. Les cheminées solaires sont destinées pour les zones arides (désert) où la température ambiante est très élevée et où d'immenses surfaces libres sont disponibles.
- Les dimensions de la cheminée et principalement sa hauteur, jouent un rôle très important sur la puissance générée par une centrale à cheminée solaire.
- Le choix des matériaux de construction s'impose, dans la mesure du possible, par sa disponibilité dans la région de construction de la centrale cheminée solaire. Les pertes de chaleur à travers les parois d'un mur cheminée mince engendrent une diminution

des performances de la centrale, le choix d'un mur épais conduit à des coûts de construction exorbitants. Un critère d'optimisation doit être établi pour trouver un compromis entre l'aspect technologique et économique.

- Le collecteur solaire peut être construit avec un nombre allant de 1 à 4 couverts, selon la nécessité. Un nombre de couvert plus important réduit les pertes de chaleur vers le milieu ambiant mais augmente aussi le coût de construction.
- Aussi les turbines utilisées pour la conversion d'énergie sont des turbines à étage de pression.

### IV.3. Modélisation mathématique :

En mécanique des fluides, on suppose que le fluide est un milieu continu, ce qui permet d'utiliser les lois classiques de conservation, à savoir

- Conservation de la masse.
- Conservation de la quantité de mouvement.
- Conservation de l'énergie.

#### IV.3.1. Hypothèses simplificatrices :

Les hypothèses considérées dans la formulation mathématique sont basées sur:

- L'écoulement est laminaire et bidimensionnel.
- L'écoulement est incompressible axisymétrique en régime stationnaire.
- Les parois de la tour "cheminée" sont supposées adiabatiques ( $Q = 0$ ).
- Du fait que les vitesses sont relativement faibles en convection naturelle, le terme de la dissipation visqueuse est négligeable.
- Toutes les propriétés du fluide sont constantes sauf la masse volumique  $\rho$  qui varie linéairement avec le gradient de température  $T$  selon l'approximation de Boussinesq :

$$\rho = \rho_0 \{1 - \beta\} \quad (4.1)$$

Où :

$$\beta = -\frac{1}{\rho_0} \left( \frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_\rho \quad (4.1.a)$$

Avec:

$\beta$ , terme d'expansion thermique

#### IV.3.2. Formulation mathématique :

L'écoulement bidimensionnel d'un fluide visqueux incompressible est régi par des équations de base qui sont respectivement :

- Conservation de la masse.
- Conservation de la quantité de mouvement.
- Conservation de l'énergie.

Ces équations sont à partir de l'équation de transport généralisée et d'après les hypothèses précédentes qui est donnée par:

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = \mathbf{S}_\phi \quad (4.2)$$

Où  $\mathbf{S}_\phi$  est le terme source (taux d'augmentation de  $\phi$ ) et  $\mathbf{J}$  le flux de convection et de diffusion donné par :

$$\mathbf{J} = \rho \bar{U} \phi - \Gamma \vec{\nabla} \phi \quad (4.3)$$

Tal que :  $\phi$ , est la temperature de diffusion.

On peut trouver ainsi à partir de ce modèle de base les équations régissant :

#### IV.3.2.1. Equation de continuité (conservation de la masse) :

C'est l'équation qui exprime la loi de la conservation de la masse pour un volume de contrôle.

L'équation de conservation de la masse pour un fluide incompressible est obtenue en posant  $\phi = 1$  et  $\mathbf{S} = \mathbf{0}$ , alors l'équation devient :

$$\nabla \cdot \bar{U} = 0 \quad (4.4)$$

Cette équation peut s'écrire en coordonnées cartésiennes comme suit :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (4.5)$$

#### IV.3.2.2. Equation de la conservation de la quantité de mouvement :

Le principe de conservation de la quantité de mouvement permet d'établir les relations entre les caractéristiques du fluide et son mouvement et les causes qui le produisent. Où on peut indiquer que le taux de variation de quantité de mouvement contenu dans le volume de contrôle est égal à la somme de toutes les forces extérieures qui lui sont appliquées.

On retrouve l'équation de la quantité de mouvement en substituant  $\phi$  par  $\mathbf{U}(\mathbf{u}, \mathbf{v})$ ,  $\Gamma$  par  $\mu$  et  $\mathbf{S} = \nabla \mathbf{P}$  dans l'équation (4.2) on obtient alors :

$$\nabla \cdot (\bar{U} \mathbf{U}) = -\frac{1}{\rho} \nabla \mathbf{P} + \nu \nabla^2 \bar{U} \quad (4.6)$$

Cette équation peut s'écrire sous la forme explicite suivante :

Selon l'axe des abscisses  $\mathbf{X}$ :

$$\mathbf{u} \frac{\partial u}{\partial x} + \mathbf{v} \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (4.7)$$

Selon l'axe des ordonnées  $Y$  :

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + g\beta(T - T_0) \quad (4.8)$$

$T_0$ , température de référence.

#### IV.3.2.3. Equation de l'énergie :

L'équation de conservation d'énergie est obtenue à partir du premier principe de la thermodynamique. Ce principe met en relation les différentes formes d'énergie.

On obtient l'équation de l'énergie en remplaçant  $\phi$  par  $T$ , et  $\Gamma$  par  $\lambda/C_p$  et  $S = 0$  dans l'équation (4.2) on obtient alors :

$$\nabla \cdot (\rho \bar{U} T) = \nabla \cdot \left( \frac{\lambda}{c_p} \nabla T \right) \quad (4.9)$$

Ou encore :

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (4.10)$$

$$a = \frac{\mu}{P_r} + \frac{\mu_T}{\sigma_T}$$

**Tableau (IV. 1) :** Les valeurs de  $\phi$ ,  $\Gamma_\phi$  et  $S_\phi$  pour l'équation de transport dans le plan (XY).

Equation de:	$\phi$	$\Gamma_\phi$	$S_\phi$
Continuité	$1$	$0$	$0$
Quantité de mouvement X	$u$	$\mu$	$-\frac{\partial p}{\partial x}$
Quantité de mouvement Y	$v$	$\mu$	$-\frac{\partial p}{\partial y} + \rho_0 g \beta (T - T_0)$
Energie	$T$	$a$	$0$

## IV.4. Détermination des performances énergétiques :

### IV.4.1. Hypothèses communes à l'ensemble des modèles :

Les hypothèses adoptées sont :

- Le régime est stationnaire.
- Les éléments du collecteur sont considérés à une température moyenne.
- La couverture du collecteur est opaque aux radiations infrarouges.
- Les propriétés physiques des composants du système (collecteur, cheminée et aéro-turbine) sont indépendantes de la température.
- L'effet de la poussière, des impuretés et de l'ombre sur l'absorbeur sont négligeables.
- Le collecteur est considéré comme étant la superposition de deux surfaces planes.

- L'écoulement dans le collecteur est considéré comme un écoulement entre deux plans parallèles).
- L'effet d'évaporation dans le collecteur est négligeable ;
- L'écoulement est axisymétrique ;
- Le gradient transversal de la température dans le collecteur est négligeable ;
- L'air est considéré comme étant un gaz parfait ;
- Les transferts thermiques conductifs dans le sens de l'écoulement sont négligeables ;
- Le ciel est considéré comme corps noir ;
- L'unique gain de chaleur dans le système est le gain net acquis dans le collecteur ;
- Les pertes par frottement dans le collecteur et la cheminée sont considérées négligeables.

#### **IV.4.2. Description du modèle de J. Schlaich et al [24]:**

L'un des modèles pionniers dans la modélisation des centrales à cheminée solaire est celui développé par Jorg Schlaich et son équipe [24], pour l'étude de la centrale à cheminée solaire dont le prototype est celui de Manzanares. Bien que le modèle étudie un cas idéal, il reproduit les bilans énergétiques au niveau des différents composants de la centrale et permet de déduire l'influence des principales variables caractéristiques de la centrale sur son rendement global et analyse les limites de ses performances.

##### **IV.4.2.1. Approche pour le calcul du rendement de la centrale cheminée solaire :**

Le rendement total  $\eta$  est défini comme étant le produit des trois rendements individuels suivants [15,17] :

$$\eta = \eta_{coll} * \eta_C * \eta_{wt} \quad (4.11)$$

$\eta_{coll}$ , est le rendement du collecteur, en d'autres mots c'est l'efficacité avec laquelle les radiations solaires sont converties en chaleur.

$\eta_C$ , est le rendement de la cheminée, il décrit l'efficacité de la transformation de la chaleur délivré par le collecteur en énergie dans l'écoulement.

$\eta_{wt}$ , est le rendement de l'aérogénérateur, la turbine.

##### **IV.4.2.2. Le collecteur :**

Le collecteur de la cheminée solaire convertit les radiations solaire incidente,  $G$  sur la surface du collecteur,  $A_{coll}$ , en énergie thermique,  $\dot{Q}$ .

➤ **Puissance thermique :**

La chaleur dégagée par unité de temps, à la sortie du collecteur est exprimée par la relation suivante :

$$\dot{Q} = \dot{m} * C_p * \Delta T \quad (4.12)$$

Où :

$\dot{Q}$  : Gain en puissance thermique de l'air.

$\dot{m}$  : Débit massique de l'air.

$C_p$  : Chaleur spécifique de l'air.

$\Delta T$  : Différence de température entre l'entrée et la sortie du collecteur.

Tel que :

$$\dot{m} = \rho_{coll} * V_c * A_c \quad (4.13)$$

Avec :

$\rho_{coll}$  : Masse volumique de l'air à la sortie de collecteur.

$V_c = V_{coll}$  : Vitesse de l'air à l'entrée de la cheminée et à la sortie de collecteur.

$A_c$  : Section de passage.

➤ **Rendement énergétique du collecteur :**

Le rendement énergétique du collecteur peut s'exprimer comme étant le rapport entre le gain en puissance calorifique  $\dot{Q}$ , et les radiations solaires  $G$  ( $w/m^2$ ) multiplié par la surface du collecteur  $A_{coll}$  :

$$\eta_{coll} = \frac{\dot{Q}}{G * A_{coll}} \quad (4.14)$$

Avec :

$G$  : Rayonnement solaire incident mesuré en ( $w/m^2$ )

$A_{coll}$  : Surface du collecteur.

En combinant les équations (4.12), (4.13), (4.14), on aura :

$$\eta_{coll} = \frac{\rho_{coll} * V_c * A_c * C_p * \Delta T}{G * A_{coll}} \quad (4.15)$$

➤ **Flux de chaleur transmis par le collecteur à l'air :**

En appliquant un bilan thermique sur le collecteur on aura :

$$\dot{Q} = \alpha * A_{coll} * G - \beta * \Delta T * A_{coll} \quad (4.16)$$

Tel que :

$\alpha$  : Coefficient d'absorption effective du rayonnement solaire du collecteur.

$\beta$  : Coefficient de perte énergétique englobant les pertes par convection, par radiation et par stockage de sol (Pertes corrigée en(  $W/m^2K$ ).

En combinant les équations (4.14) et (4.16) on aura :

$$\eta_{coll} = \alpha - \frac{\beta \cdot \Delta T}{G} \quad (4.17)$$

➤ **Vitesse d'écoulement d'air :**

A partir des équations (4.15) et (4.17) on déduit la vitesse d'écoulement d'air à la sortie du collecteur :

$$V_C = \frac{\alpha \cdot A_{coll} \cdot G - \beta \cdot \Delta T \cdot A_{coll}}{\rho_{coll} \cdot A_C \cdot C_p \cdot \Delta T} \quad (4.18)$$

**IV.4.2.3. La cheminée :**

La cheminée est l'élément moteur de la centrale cheminée solaire. C'est un tube de pression avec des pertes par frottements, considérées négligeables. La cheminée a pour rôle de convertir l'énergie thermique fournie à l'air dans le collecteur en énergie cinétique (mouvement de l'air dans le système). La colonne d'air chaud présente dans toute la structure est liée au milieu ambiant par le collecteur à l'entrée et par la cheminée à la sortie. Le poids de cette colonne qui est plus léger que celui normalement occupé par l'air ambiant, provoque une élévation de cette colonne d'air chaud (Effet de tirage de la cheminée). En effet l'air chaud à l'intérieur de la cheminée est poussé vers le milieu ambiant à la sortie de la cheminée, et comme conséquence, un appel d'air se fait par l'entrée du collecteur.

➤ **Vitesse d'écoulement d'air dans la cheminée :**

L'application de l'équation de conservation de la quantité de mouvement sur une section de la tour cheminée donne :

$$\rho_c V_C \frac{d(V_C)}{dz} = - \frac{dp}{dz} - (\rho_c - \rho_e) * g \quad (4.19)$$

De l'équation (4.19) et après transformation on peut déduire l'expression de la vitesse de l'écoulement dans la cheminée :

$$V_C = \sqrt{\frac{2}{\rho_c} \left( - \int_0^{H_C} dp - \int_0^{H_C} (\rho_c - \rho_e) * g * dz \right)} \quad (4.20)$$

Avec :

$g$  : Accélération due à la gravité.

$H_C$  : Hauteur de la cheminée.

$\rho_e$  : Masse volumique de l'air dans l'environnement extérieur.

$\rho_c$  : Masse volumique de l'air dans la cheminée.

En éliminant la turbine et en considérant les pertes par frottement négligeables dans la cheminée vue le rapport optimal entre la surface et le volume de cette dernière, on obtient la vitesse maximale de l'écoulement du fluide :

$$V_{C,max} = \sqrt{-\frac{2}{\rho_c} \left( \int_0^{H_c} (\rho_c - \rho_e) * g * dz \right)} \quad (4.21)$$

Ainsi, on peut déduire une expression pratique pour la vitesse maximale appliquant l'hypothèse de Boussinesq :

$$V_{C,max} = \sqrt{2 * g * H_c * \frac{\Delta T}{T_0}} \quad (4.22)$$

Avec :

$T_0$  : Température ambiante.

$\Delta T$  : Différence de température entre l'entrée et la sortie du collecteur.

➤ **Rendement de la cheminée :**

Le rendement de la tour (cheminée) est consécutif de l'effet de tirage cité précédemment dû à l'élévation de la colonne d'air chaud dans la cheminée, une différence de pression  $\Delta p_{tot}$  est ainsi créée entre la base de la cheminée (l'écoulement sortant du collecteur) et l'environnement extérieur exprimée par :

$$\Delta p_{tot} = g * \int_0^{H_c} (\rho_e - \rho_c) * dh \quad (4.23)$$

Avec :

$\Delta p_{tot}$  : Variation de la pression totale avec l'augmentation de la hauteur de la cheminée.

La différence de pression  $\Delta p_{tot}$  peut être divisée en deux composantes, statique et dynamique, en négligeant les pertes par frottement et on aura :

$$\Delta p_{tot} = \Delta p_s + \Delta p_d \quad (4.24)$$

La différence de pression statique diminue dans la turbine, alors que la composante dynamique décrit l'énergie cinétique de l'écoulement d'air dans la cheminée.

Si on suppose que  $\Delta p_s = 0$  la différence de pression totale sera alors la pression induisant l'accélération du mouvement d'air dans la cheminée étant donné que :

$$\Delta p_{tot} = \Delta p_d$$

L'énergie contenue dans le fluide s'exprime sous la forme :

$$P_{tot} = \Delta p_{tot} * V_{C,max} * A_c \quad (4.25)$$

Ce qui permet d'écrire :

$$\eta_c = \frac{P_{tot}}{\dot{Q}} \quad (4.26)$$

Si la turbine est éliminée, l'écoulement atteint une vitesse maximale  $V_{C,max}$  et toute la différence de pression est utilisée pour accélérer l'air dans la cheminée, donc transformée en énergie cinétique :

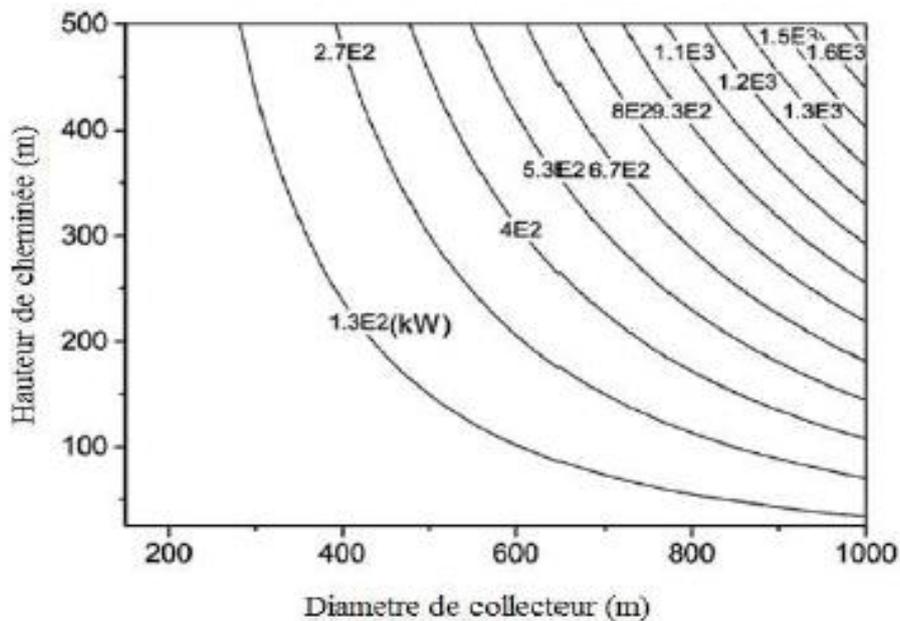
$$P_{tot} = \frac{1}{2} \dot{m} * V_{C,max}^2 \quad (4.27)$$

En combinant l'équation (4.26) avec (4.12) et (4.22) et (4.27) on aura déduit ainsi le rendement de la cheminée :

$$\eta_c = \frac{g * H_c}{C_p * T_0} \quad (4.28)$$

**Remarque :**

Le rendement de la cheminée ne dépend que de la hauteur de la cheminée, il n'est pas influencé par l'augmentation de la vitesse de l'écoulement et de la température dans le collecteur.



**Figure (IV. 2) :** L'effet de la hauteur de la cheminée et du diamètre du collecteur sur la Production de la puissance électrique pour un éclairement solaire de  $600W/m^2$ .

➤ **Puissance et perte de pression totale :**

La puissance totale peut être établie par la combinaison des équations (4.12), (4.13), (4.26) et (4.28) :

$$P_{tot} = \eta_c * \dot{Q} = \frac{g * H_c}{C_p * T_0} * \rho_{coll} * V_C * A_C * C_p * \Delta T \quad (4.29)$$

En associant les deux équations (4.15), (4.19) on aura :

$$\Delta p_{tot} = \rho_{coll} * g * H_c * \frac{\Delta T}{T_0} \quad (4.30)$$

Cette équation montre l'analogie avec le tube de pression de la centrale dont le gradient de pression est  $\Delta p = \rho_{H_2O} * g * H$ . Ce qui justifie ainsi l'appellation de la centrale à cheminée solaire par : *Centrale hydroélectrique du désert*.

#### IV.4.2.4. La turbine (aéro-génératrice) :

La turbine installée à la base de la cheminée a pour rôle de convertir l'énergie du mouvement du flux d'air ascendant en énergie de rotation.

##### ➤ Chute de pression :

La chute de pression statique à travers la turbine peut être exprimée, en première approximation, avec l'équation de Bernoulli :

$$\Delta P_s = \Delta P_{tot} - \frac{1}{2} \rho_c * V_c^2 \quad (4.31)$$

##### ➤ Puissance théorique :

La puissance théorique de la turbine est donnée par la relation :

$$P_{Wt} = V_c * A_c * \Delta P_s \quad (4.32)$$

Par analogie avec la puissance électrique,  $W = I * E$  le débit volumétrique  $Q_V = A_c * V_c$  correspond à l'intensité du courant, alors que le gradient  $\Delta P_s$  représente la tension électrique,  $E$ , les termes  $\Delta P_s$  et  $V_c$  sont couplés par l'équation (4.32). Ainsi :

$$Q_V = \sqrt{\frac{\rho_k}{2} (\Delta P_{tot} - \Delta P_s)} \quad (4.33)$$

La figure montre l'évolution du débit,  $Q_V$ , avec  $\Delta P_s$ .

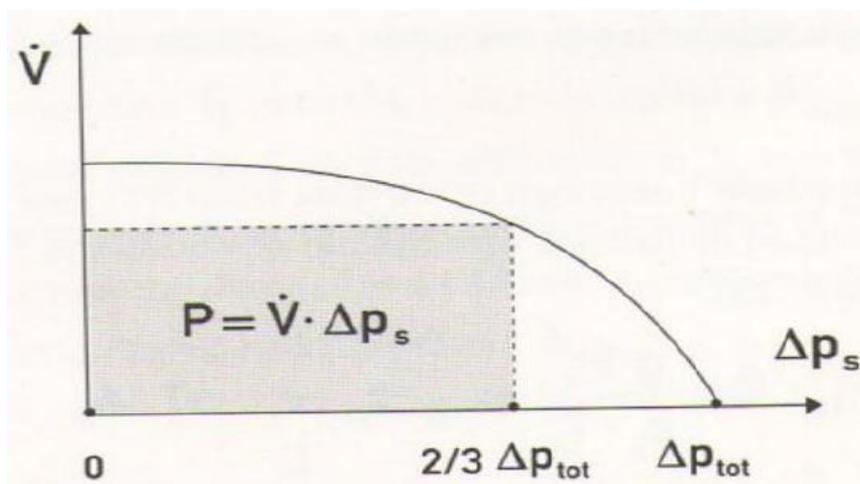


Figure (IV. 3) : Evolution du débit,  $Q_V$  ( $\dot{V}$ ) en fonction de  $\Delta P_s$

➤ **Puissance maximale :**

La puissance  $P = Q_V * \Delta P_s$  est égale à l'aire du rectangle représenté dans la Figure (IV.3)

Elle s'annule pour  $\Delta P_s = 0$  (court-circuit en analogie avec la puissance électrique). Pour :

$\Delta P_s = \Delta P_{tot}$  pas de charge installée  $P_{Wt}$  prend alors un maximum entre ces deux extrêmes :

$$P_{Wt} = \Delta P_s * \sqrt{\frac{\rho k}{2} (\Delta P_{tot} - \Delta P_s)} \quad (4.34)$$

La dérivation de l'équation (3.34) permet de calculer le point optimal :

$$\Delta P_s = \frac{2}{3} \Delta P_{tot} \quad (4.35)$$

La puissance maximale est atteinte quand  $2/3$  de la différence de pression totale est utilisée par la turbine. Ce qui correspond à la condition de **ppm** « point de puissance maximum » pour une centrale hydroélectrique. Néanmoins, le terme,  $\Delta P_s$ , n'est pas indépendant de  $V_c$ , dans la cheminée solaire, mais couplé comme l'indique l'équation (4.21). En remplaçant  $\Delta P_s$  par l'optimum trouvé dans l'équation (4.35), on déduit l'expression de la vitesse du fluide pour un point de puissance maximal :

$$P_{Wt,PPM} = \sqrt{\frac{2}{3} * \frac{\Delta P_{tot}}{\rho_c}} \quad (4.36)$$

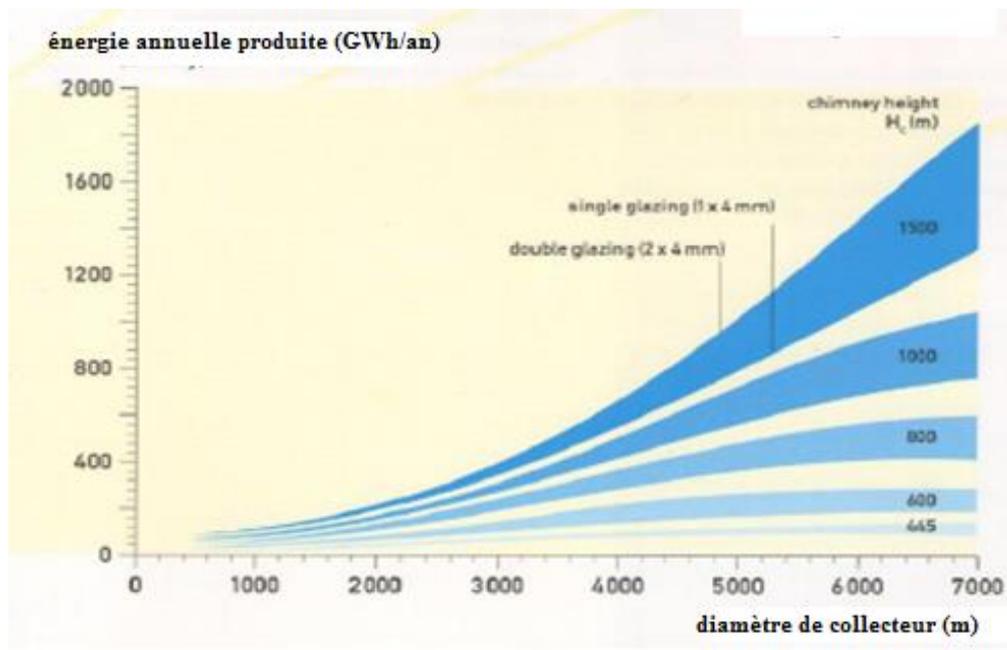


Figure (IV. 4) : Energie électrique produite dans la CCS en fonction du diamètre du collecteur et de la hauteur de la cheminée.

La puissance mécanique prise par la turbine est:

$$P_{Wt,max} = \frac{2}{3} * \eta_{coll} * \eta_c * A_{coll} * G$$

$$P_{Wt,max} = \frac{2}{3} * \eta_{coll} * \frac{g * H_c}{C_p * T_0} * A_{coll} * G \quad (4.37)$$

- Ainsi, la puissance électrique produite par la centrale cheminée solaire est proportionnelle au terme  $H_c * A_{coll}$ . Le volume est inclus dans la hauteur de la cheminée et la surface du collecteur. La même puissance pourrait être obtenue avec différentes combinaison de la hauteur de la cheminée et du diamètre du collecteur. Il n'y aura pas de dimension optimale comme le montre ci- bien la figure (IV.4) ci- dessus.

Les dimensions optimales peuvent être déterminées uniquement par l'introduction de Chaque composant de la centrale (collecteur, cheminée, composants mécaniques) dans un site particulier.

➤ **Puissance électrique fournie au réseau :**

C'est la puissance nette fournie. Elle peut être exprimée comme le produit de la puissance maximale récupérée à l'arbre de la turbine multipliée par le rendement qui, englobe le rendement des pales de la transmission et du générateur.

$$P_{\text{électrique}} = P_{Wt,max} * \eta_{Wt} \quad (4.38)$$

➤ **Exemple d'application numérique (prototype de Manzanares) :**

- Hauteur de cheminée :  $H_c = 194.6 \text{ m}$
- Diamètre de collecteur :  $D_{coll} = 244 \text{ m}$
- Eclairement solaire :  $G = 600 \text{ W/m}^2$
- Rendement de turbine :  $\eta_{Wt} = 0.8$
- Efficacité du collecteur :  $\eta_{coll} = 0.6$
- Chaleur spécifique d'air :  $C_p = 1006 \frac{J}{kg * K}$
- Température ambiante :  $T_0 = 20C^\circ = 293 \text{ K}$
- Accélération de gravité :  $g = 9.81 \text{ m/s}^2$

$$P_{\text{électrique}} = \frac{2}{3} * 0.8 * 0.6 * \frac{9.81}{1006 * 293} * 194.6 * 46759.5 * 600$$

$$= 58.14 \text{ kW}$$

- Une autre étude de performance de la cheminée solaire est réalisée sur quatre variables dimensionnelles [14] :

$D_C$  : Diamètre de la cheminée [m].

$R_{coll}$  : Rayon du collecteur [m].

$H_C$  : Hauteur de la cheminée [m].

$H_{coll}$  : Hauteur du collecteur [m].

**Tableau (IV. 2) :** la puissance de la turbine en fonction des variables dimensionnelles et pour un éclairement solaire constant de  $G = 1000W/m^2$ .

Ref	$D_C(m)$	$R_{coll(m)}$	$H_C(m)$	$H_{coll(m)}$	$P_{Wt}(MW)$
1	5	122	195	0.25	0.067
2	10	565	300	0.25	4.6
3	10	565	500	0.30	5.4
4	25	700	800	0.30	51.7
5	25	800	1000	0.30	62
6	25	800	1000	0.30	84.1
7	25	800	1000	0.50	84.2
8	30	800	1000	0.50	132.1

#### IV.5. Conclusion :

Le rendement global de la centrale est défini comme la puissance récupéré à l'arbre de la turbine sur l'énergie solaire reçue par le collecteur :

$$\eta = \frac{\text{puissance à l'arbre de la turbine}}{\text{Energie solaire reçue}} \quad (4.39)$$

Aussi on peut conclure que le rendement est proportionnel à la hauteur de la centrale et à la surface du collecteur, par contre il est inversement proportionnel à la température à l'entrée du collecteur.

*Chapitre V*  
*Calcul des performances*  
*énergétiques des centrales*  
*à cheminée solaire*

## **V.1 Introduction :**

Le présent chapitre est relatif au calcul des performances énergétiques d'une centrale cheminée solaire par utilisation du modèle de Schlaich [24] développé au chapitre III. La banque de données relative aux conditions météorologique est celle de la région d'Adrar et Béchar.

La Wilaya d'Adrar est située dans le sud-ouest de l'Algérie. Elle est en superficie la deuxième plus grande wilaya d'Algérie avec 427 368 km<sup>2</sup>. Majoritairement occupée par le Sahara, la wilaya est peu peuplée avec seulement 432 193 habitants (estimation 1er janvier 2011).

Le mot Adrar signifie en langue berbère "montagne". Au nord de la wilaya se trouve les wilayas de Ghardaïa et d'El Bayedh, à l'ouest les wilayas de Béchar et de Tindouf, à l'est la wilaya de Tamanrasset et au sud la Mauritanie et le Mali. La Wilaya d'Adrar a pour principale économie l'agriculture avec notamment son système d'irrigation la « foggara ». La Wilaya dispose notamment d'un important potentiel en énergies renouvelables grâce à une bonne durée d'ensoleillement (9,2 h par jour) et aux caractéristiques physiques du vent (permanence, force 2 à 6 m/s, unidirectionnel...). La wilaya est composée de 11 Daïras, 28 Communes et 299 Ksars (villages).

La wilaya de Béchar est située à l'ouest de l'Algérie en plein désert saharien. La population totale de la wilaya est estimée, selon le dernier recensement, à 273 208 habitants et la superficie totale de la wilaya est de 162 200 km<sup>2</sup>.

La wilaya de Béchar est entourée au nord par la wilaya de Naâma, à l'Est par la wilaya d'El Bayadh, à l'Ouest par le Maroc et au Sud par les wilayas d'Adrar et de Tindouf.

Les principaux reliefs de la wilaya sont composés de :

- Montagnes : Djebel Antar (1 953 m), Djebel Grouz (1 835 m), Djebel Béchar (1 206 m).
- Oueds : Oued Namous, Oued Zouzfana, Oued Béchar, Oued Guir, Oued Saoura et Oued Daoura.
- Vallées : Vallée de la Zouzfana, Vallée du Guir, Vallée de la Saoura.
- Regs (vastes étendues rocailleuses) : Regs Guir et Regs Daoura.
- Ergs (massifs dunaires) : Grand Erg Occidental, Erg Erraoui, Erg El Atchane et Erg Iguidi.

Le climat de la wilaya de Béchar est de type désertique continental qui se caractérise par un été très chaud (+45°C) et un hiver très froid (2°C à 3°C). Les précipitations sont de faible

niveau avec 60 mm/an. Les vents de sables sont très fréquents et violents pouvant atteindre la vitesse de 100 km/h.

L'économie de la wilaya de Béchar est surtout portée sur l'agriculture (palmiers-dattiers) et le tourisme. La wilaya dispose également de ressources minières non négligeables avec notamment le calcaire (Djebel Madjouz), les schistes (Benzireg), l'argile, le sable (Taghit, Ksabi, Tabelbala et Béni Abbès), les grès (Oued Sfala), l'agate (Béchar), le cuivre (Bou Kais, Benzireg), le plomb (Benzireg, Bou Kais), le fer (chaîne de l'augarta), le manganèse (Guetara), le charbon (bassin de Béchar Kenadsa, bassin Nezarif), le sel (Sebkhat El Mellah), l'eau minéral (Moughel).

Les infrastructures routières dont dispose la wilaya sont les suivantes : 1 108 km de routes nationales, 486 km de chemins de wilaya, 184.2 km de chemins communaux, 842 km de pistes non classés et 140 km de pistes frontalières.

Afin de mieux apprécier le potentiel de la région d'Adrar et de Béchar, un calcul de performances énergétiques d'une tour solaire qui serait implantée dans la région sera ainsi réalisé.

## V.2 Calcul de la puissance électrique de la CCS :

La puissance électrique de la CCS est le produit de la puissance maximale récupérée à l'arbre de la turbine multipliée par le rendement qui, englobe le rendement des pales de la transmission et du générateur.

$$P_{\text{électrique}} = P_{Wt,max} * \eta_{Wt} \quad (5.1)$$

Avec :

$$P_{Wt,max} = \frac{2}{3} * \eta_{coll} * \frac{g * H_c}{C_p * T_0} * A_{coll} * G \quad (5.2)$$

### V.2.1 Données géométriques et techniques :

Les performances énergétiques de la centrale à cheminée solaire utilisant les données climatiques de la région d'Adrar ont été déterminées sur la base des données techniques du prototype de Manzanares. Le modèle mathématique est celui de J. Schlaich et al. [15].

Le tableau (V.1) résume les données géométriques et techniques de la CCS.

**Tableau (V. 1) :** Données géométriques et techniques de la CCS.

Paramètres	$H_c$ (m)	$D_{coll}$ (m)	$D_c$ (m)	$A_{coll}$ (m <sup>2</sup> )	$\Delta T$ (K)	$C_p$ ( $\frac{J}{Kg * K}$ )	$g$ (m/S <sup>2</sup> )	$\eta_{coll}$	$\eta_{Wt}$
Valeurs	195	240	10	45000	17	1006	9.81	0.6	0.8

### V.2.2. Calcul de la puissance électrique pour un rayonnement et une température constants :

Pour un rayonnement solaire  $G = 400 \text{ w/m}^2$  et une température de  $T_0 = 30^\circ\text{C} = 303 \text{ K}$

$$P_{\text{électrique}} = P_{Wt,max} * \eta_{Wt}$$

$$P_{\text{électrique}} = \frac{2}{3} * \eta_{coll} * \frac{g * H_c}{C_p * T_0} * A_{coll} * G * \eta_{Wt}$$

$$P_{\text{électrique}} = \frac{2}{3} * 0.6 * \frac{9.81 * 195}{1006 * 303} * 45000 * 400 * 0.8$$

$$P_{\text{électrique}} = 36.148 \text{ kW}$$

### V.2.3 Calcul de la puissance électrique pour un rayonnement variable et une température constant :

Dans cette partie on calcule la puissance électrique pour un rayonnement solaire,  $G$  variable, et pour  $T_0 = 30^\circ\text{C} = 303 \text{ K}$

Tableau (V. 2) : Résultats de calcul de la puissance électrique.

$T_0(\text{K})$	$G(\text{w/m}^2)$	$P_{\text{électrique}}(\text{kW})$
303	200	18.074
303	400	36.148
303	600	54.222

#### V.2.3.1 Puissance électrique produite en fonction de rayonnement solaire :

La figure (V.1) montre l'évolution de la puissance électrique produite en fonction de rayonnement solaire. On note que la puissance électrique varie linéairement en fonction de rayonnement c'est-à-dire que la puissance électrique est proportionnelle au rayonnement solaire.

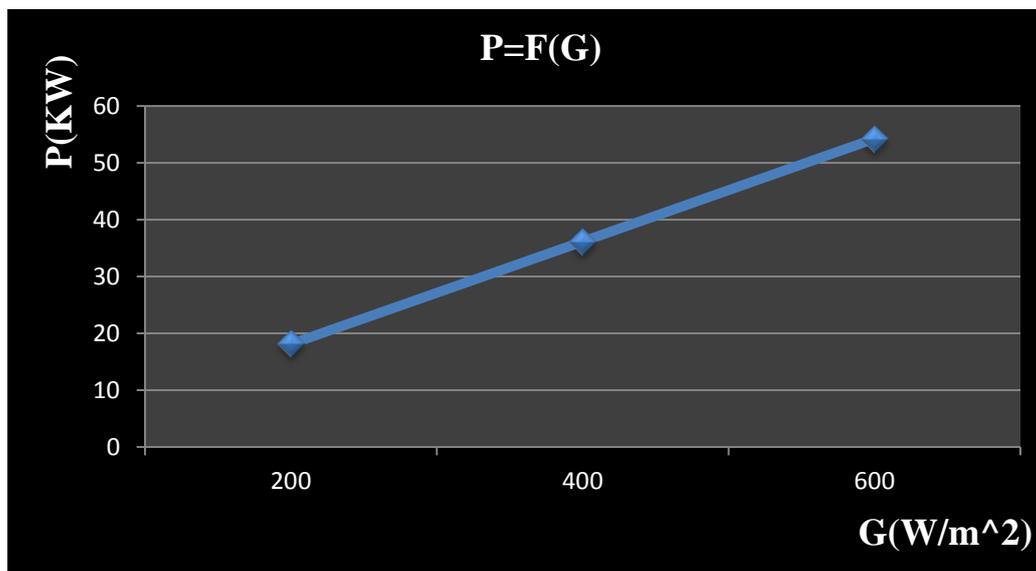


Figure (V. 1) : Variation de la puissance électrique en fonction de rayonnement solaire.

### V.2.4 Calcul de la puissance électrique pour un rayonnement constant et une température variable :

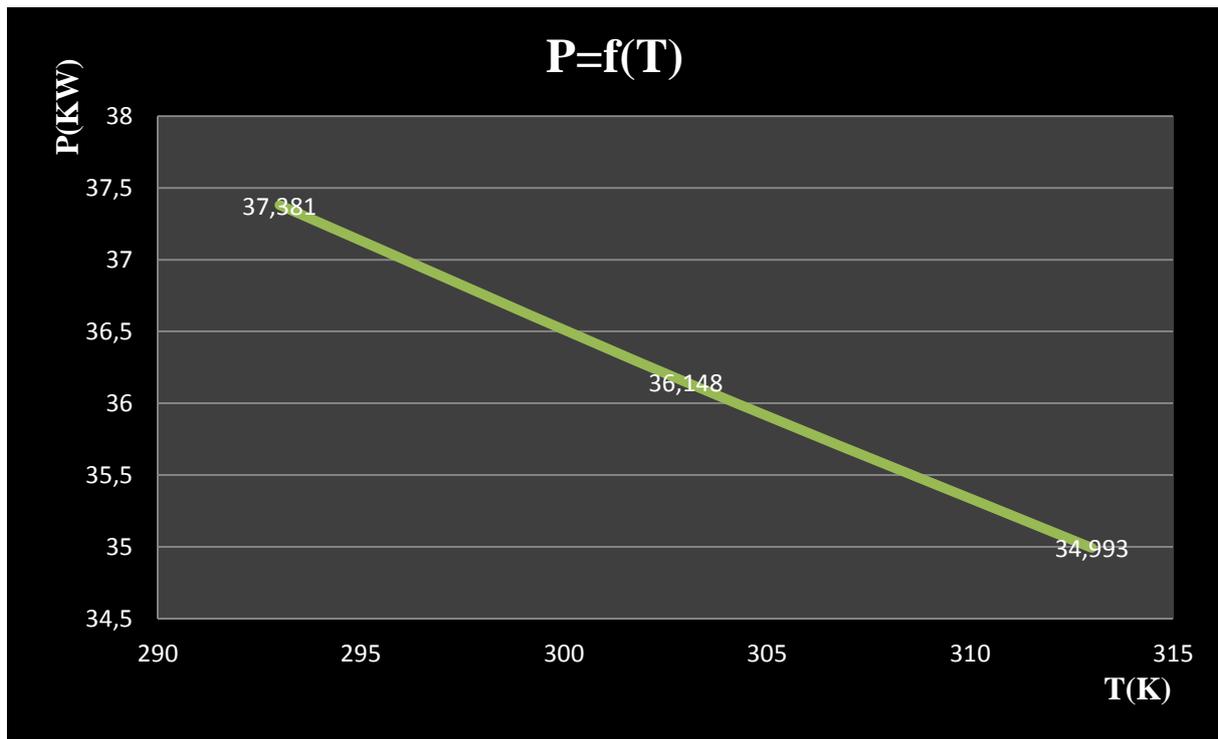
La puissance électrique est calculée pour un rayonnement solaire constant :  $G = 400 \text{ W/m}^2$  et pour une température variable  $T_0$ .

**Tableau (V. 3) :** Résultats de calcul de la puissance électrique pour une température variable.

$G(\text{w/m}^2)$	$T_0(\text{K})$	$P_{\text{électrique}}(\text{kW})$
400	293	37.381
400	303	36.148
400	313	34.993

#### V.2.4.1 La puissance électrique produite en fonction de la température :

La figure (V.2) montre l'évolution de la puissance électrique produite en fonction de la température. La puissance électrique varie légèrement, par contre l'écart de la température est important. Alors on déduit que la température n'influe pas sur la puissance électrique produite.



**Figure (V. 2) :** Variation de la puissance électrique en fonction de la température.

#### V.2.5 Conclusion :

Des calculs établies dans les paragraphes précédents, on peut conclure que le rayonnement solaire a une grande influence sur la puissance électrique produite, c'est-à-dire que la

puissance électrique augmente linéairement avec le rayonnement solaire, mais que la température ambiante n'influe pas assez sur la puissance électrique produite.

### V.3 Calcul des performances de la tour solaire d'Adrar :

#### V.3.1 Données géométriques et techniques de la CCS d'Adrar :

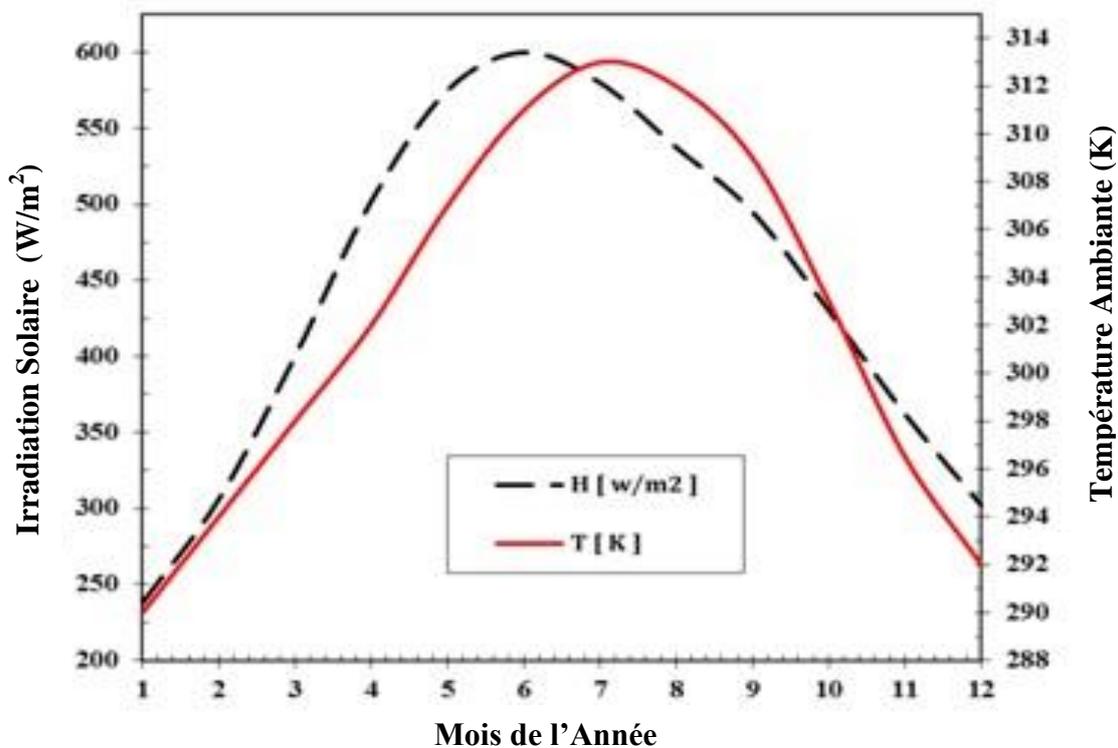
Les performances énergétiques de la centrale à cheminée solaire utilisant les données climatiques de la région d'Adrar et Béchar ont été déterminées sur la base des données techniques d'une CCS d'une puissance de (30 MW). Le modèle mathématique utilisé est celui de J. Schlaich et al. [15]. Le tableau V.4 donne les caractéristiques techniques de la CCS.

**Tableau (V. 4) :** Données géométriques et techniques de la CCS d'Adrar.

Paramètres	$H_c$ (m)	$D_{coll}$ (m)	$D_c$ (m)	$A_{coll}$ (m <sup>2</sup> )	$\Delta T$ (K)	$C_p$ ( $\frac{J}{kg \cdot K}$ )	$g$ (m/S <sup>2</sup> )	$\eta_{coll}$	$\eta_{wt}$
Valeurs	750	2200	84	3800000	25	1006	9.81	0.6	0.8

#### V.3.2 Données météorologique du site :

La figure (V.3) montre les variations moyennes mensuelles sur la température ambiante et l'irradiation solaire pour la ville d'Adrar.



**Figure (V. 3) :** Variation de l'irradiation solaire et de la température ambiante au cours du temps. Moyennes mensuelles du site d'Adrar.

Le tableau (V.5) résume les moyennes mensuelles des températures et de l'irradiation solaire de la wilaya d'Adrar.

Tableau (V. 5) : Valeurs des moyennes mensuelles, de la température ambiante et de l'irradiation solaire de la ville d'Adrar.

Les Mois	$T_0(K)$	$G(w/m^2)$
Janvier	290	240
Février	294	305
Mars	297.8	395
Avril	302	500
Mai	307	575
Juin	311	600
Juillet	313.3	580
Aout	312	535
Septembre	309	493
Octobre	303	425
Novembre	296.7	365
décembre	292	300

### V.3.3 Calcul de différents paramètres :

#### V.3.3.1 Le collecteur :

Les calculs des performances du collecteur, suivant les variations de la température et du rayonnement solaire mensuelles, sont représentés sur le tableau (V.6) ci- dessous.

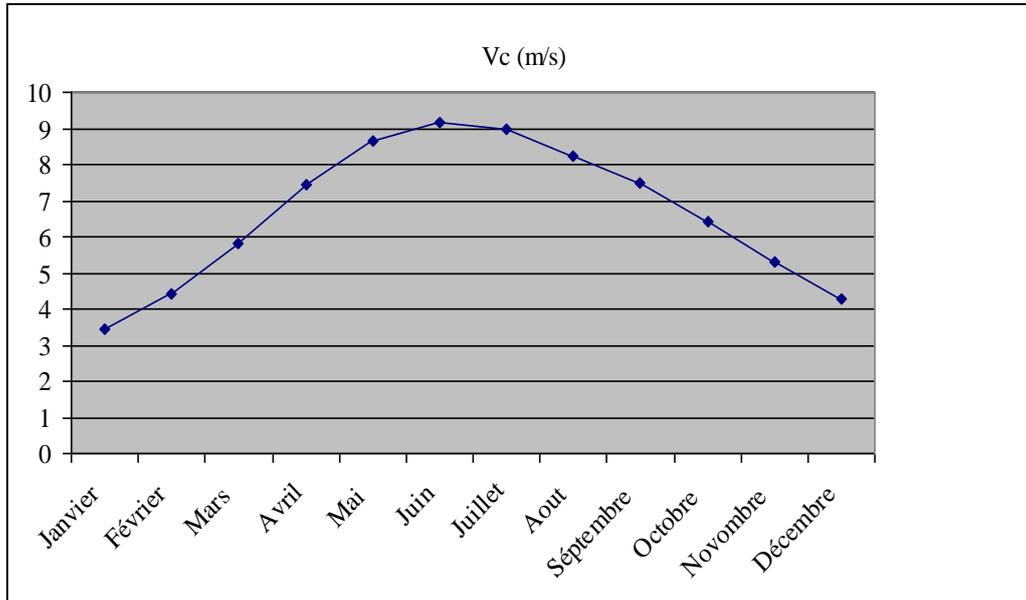
Tableau (V. 6) : Résultats de calcul des performances du collecteur.

Les Mois	$\dot{Q}(W)$	$\dot{m}(kg/s)$	$V_{colli}(m/s)$
Janvier	547200000	21757,4553	3,45458103
Février	695400000	27650,0994	4,40196357
Mars	900600000	35809,1451	5,81168338
Avril	1140000000	45328,0318	7,4420451
Mai	1311000000	52127,2366	8,64497295
Juin	1368000000	54393,6382	9,17179521
Juillet	1322400000	52580,5169	8,9896376
Aout	1219800000	48500,994	8,24718787
Septembre	1124040000	44693,4394	7,46698862
Octobre	969000000	38528,827	6,40859758
Novembre	832200000	33089,4632	5,32548783
décembre	684000000	27196,8191	4,29383593

#### V.3.3.1.1 Vitesse d'écoulement d'air dans le collecteur :

La figure (V.3) montre l'évolution de la vitesse d'écoulement d'air dans le collecteur en fonction des différents mois de l'année. On note que la vitesse d'écoulement d'air dans le collecteur est maximale pour les mois de juin et juillet. Elle est minimale pour le mois de

janvier. L'écoulement d'air dans le collecteur est proportionnel à l'augmentation de la température ambiante,  $T_0$ .



**Figure (V. 4) :** Variation de la vitesse de l'air à la sortie de collecteur – Entrée de la cheminée au cours de l'année.

### V.3.3.2 La cheminée :

Les performances de la cheminée en fonction des données mensuelles, sur la température et le rayonnement solaire, sont données dans le tableau (V.7).

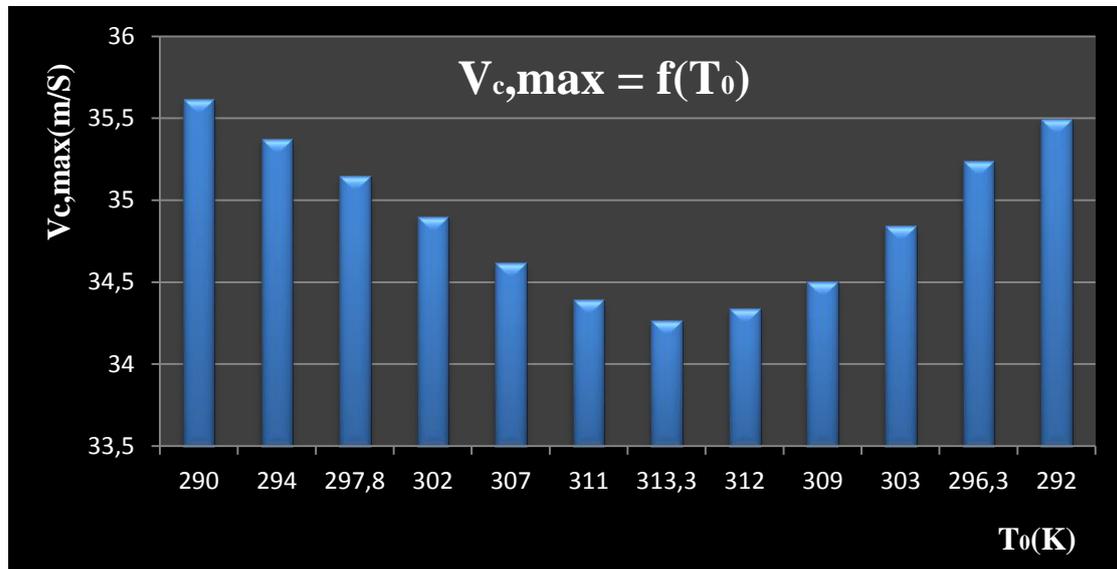
**Tableau (V. 7) :** Résultats relatifs au calcul des performances de la cheminée.

Les mois	$V_{C,max}(m S^{-1})$	$\Delta p_{tot}(Pa)$	$\Delta P_s(Pa)$	$P_{tot}(W)$	$\eta_c$
Janvier	35,6164917	69,9642675	46,642845	13800041	0,02521937
Février	35,3733729	88,3060019	58,8706679	17298946	0,02487625
Mars	35,1469619	113,631515	75,7543433	22117678	0,02455883
Avril	34,9017068	142,833665	95,2224435	27607698	0,02421728
Mai	34,6163242	162,915612	108,610408	31231770	0,02382286
Juin	34,3929908	168,902121	112,601414	32170513	0,02351646
Juillet	34,2665152	162,67164	108,44776	30869865	0,02334382
Aout	34,3378296	150,362844	100,241896	28593434	0,02344108
Séptembre	34,5041154	139,229649	92,8197659	26604529	0,02366867
Octobre	34,8440656	121,208106	80,8054037	23389096	0,02413735
Novembre	35,2358142	105,266719	70,1778126	20541320	0,02468315
décembre	35,4943079	87,1553151	58,1035434	17131900	0,02504664

#### V.3.3.2.1 Vitesse d'écoulement d'air dans la cheminée :

La figure V.4 montre l'évolution de la vitesse maximale d'écoulement d'air dans la cheminée en fonction de la température ambiante  $T_0$ . On note que la vitesse de l'air dans la cheminée est inversement proportionnelle à la température ambiante  $T_0$ . Pour les faibles valeurs de la

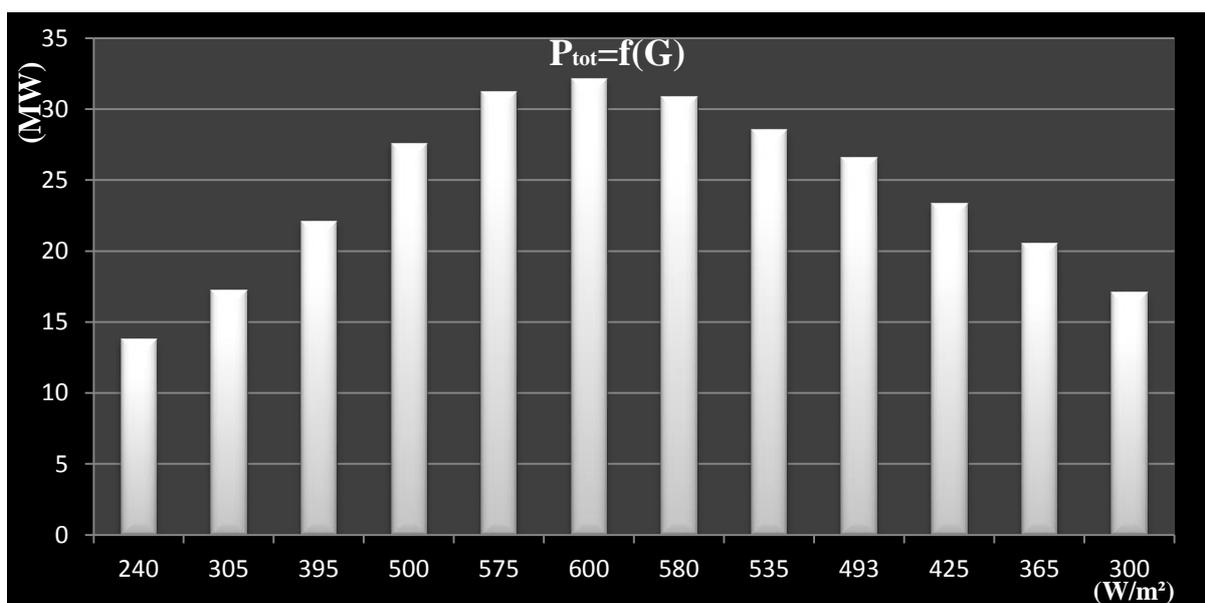
température, la vitesse maximale de l'écoulement d'air est maximale, la valeur minimale de la température ambiante est 290 K qui correspond à une vitesse maximale de 35.62 m/s. Pour une température maximale 313.3K, elle correspond à une vitesse minimale de 34.27 m/s.



**Figure (V. 5):** Variation de la vitesse maximale de l'air dans la cheminée en fonction de la Température ambiante  $T_0$ .

### V.3.3.2 Puissance totale :

La figure (V.5) donne l'évolution de la puissance totale fournie (de l'air) en fonction de l'irradiation solaire  $G(W/m^2)$ . On note que cette évolution est proportionnelle à l'irradiation solaire. Elle est de l'ordre de **32 MW** au mois de juin quand le rayonnement solaire est maximal, atteignant les **600  $W/m^2$** . Par ailleurs, le minimum de puissance est relatif au mois de Janvier où on a **14 MW** pour un rayonnement de **240  $W/m^2$** .



**Figure (V. 6) :** Evolution de la puissance totale en fonction de l'irradiation solaire.

### V.3.3.2.3 Rendement de la cheminée :

La figure (V.6) donnant l'évolution du rendement de la cheminée en fonction de la température ambiante,  $T_0$ , montre que le rendement de la cheminée est inversement proportionnel à la température ambiante  $T_0$ . Il diminue au fur et à mesure que la température augmente durant les différents mois de l'année où il est de l'ordre de 2.52 % pour le mois de Janvier et atteint 2.33% au mois de Juillet où la température est relativement élevée (40°C).

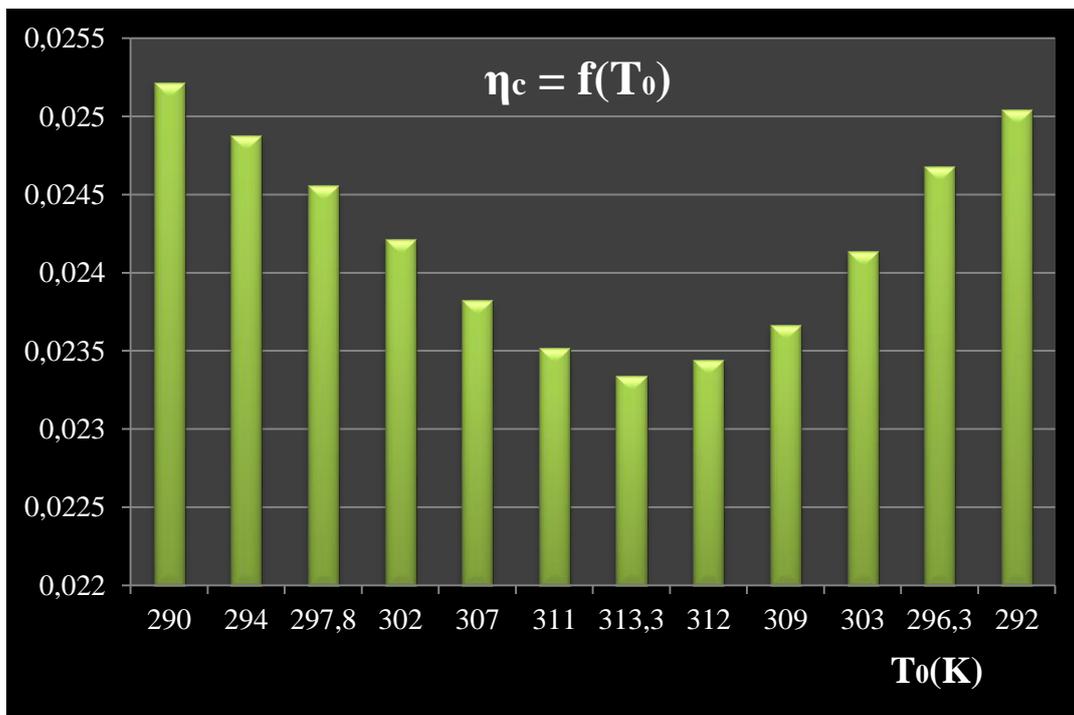


Figure (V. 7) : Rendement de la cheminée en fonction de la température  $T_0$

### V.3.3.3 La turbine :

La puissance récupérée au niveau de la turbine, le rendement global ainsi que la puissance électrique récupérée sont montrés dans le tableau (V.8).

Tableau (V. 8) : Résultats relatifs au calcul des performances de la turbine et le rendement global.

Les mois	$P_{Wt,max}$ (W)	$P_{électrique}$ (W)	$\eta_{glob}$
Janvier	9200027,42	7360021,94	0,0121053
Février	11532630,7	9226104,6	0,0119406
Mars	14745118,9	11796095,2	0,01178824
Avril	18405132,1	14724105,7	0,01162429
Mai	20821180,4	16656944,3	0,01143497
Juin	21447009,3	17157607,4	0,0112879
Juillet	20579910,3	16463928,2	0,01120503
Aout	19062289,7	15249831,8	0,01125172
Septembre	17736352,8	14189082,2	0,01136096
Octobre	15592730,7	12474184,6	0,01158593
Novembre	13694213,4	10955370,7	0,01184791
Décembre	11421266,9	9137013,54	0,01202239

### V.3.3.3.1 Rendement global :

Le rendement global est le produit des trois rendements : celui du collecteur, de la cheminée et celui de la turbine. Les calculs ont été faits en considérant les rendements, du collecteur et de la turbine, comme invariants ( $\eta_{coll} = 0.6$  et  $\eta_{Wt} = 0.8$ ). L'évolution du rendement global en fonction de la température ambiante est montrée dans la figure (V.8).

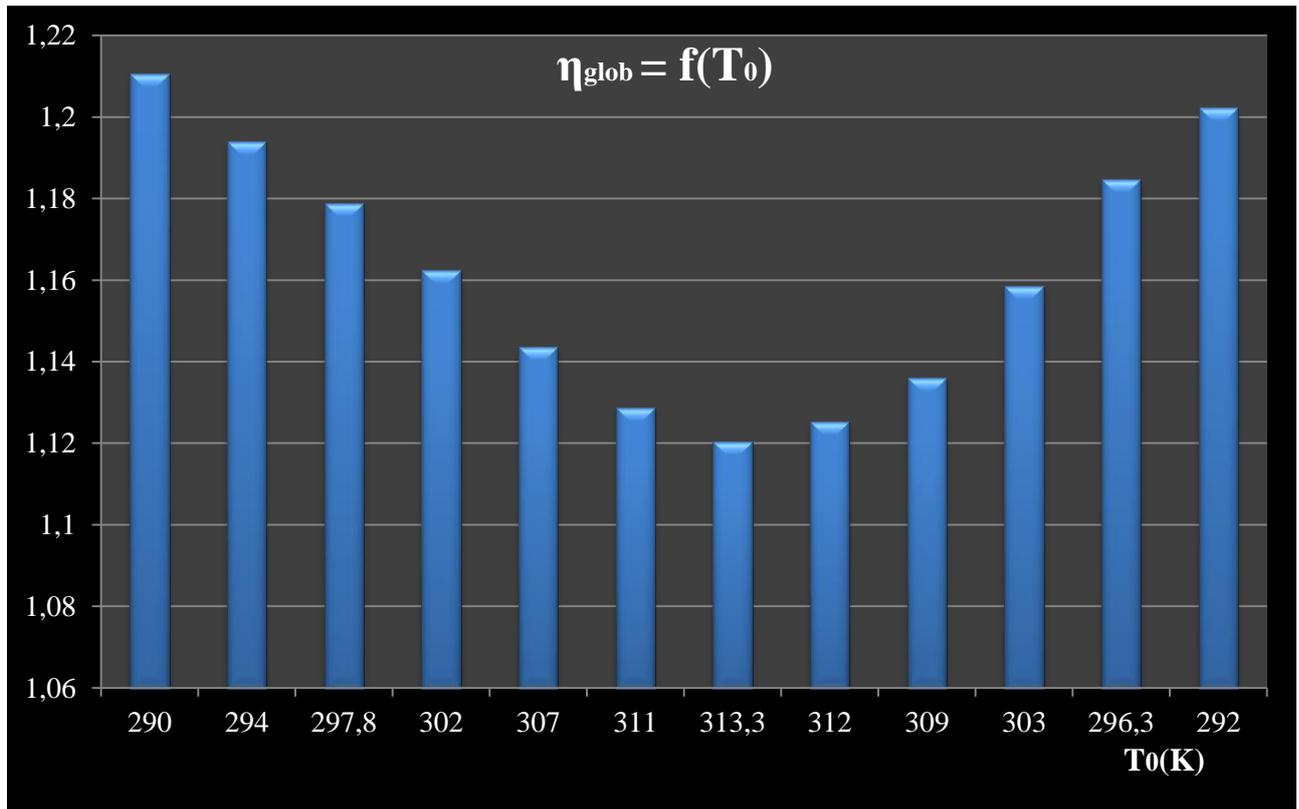


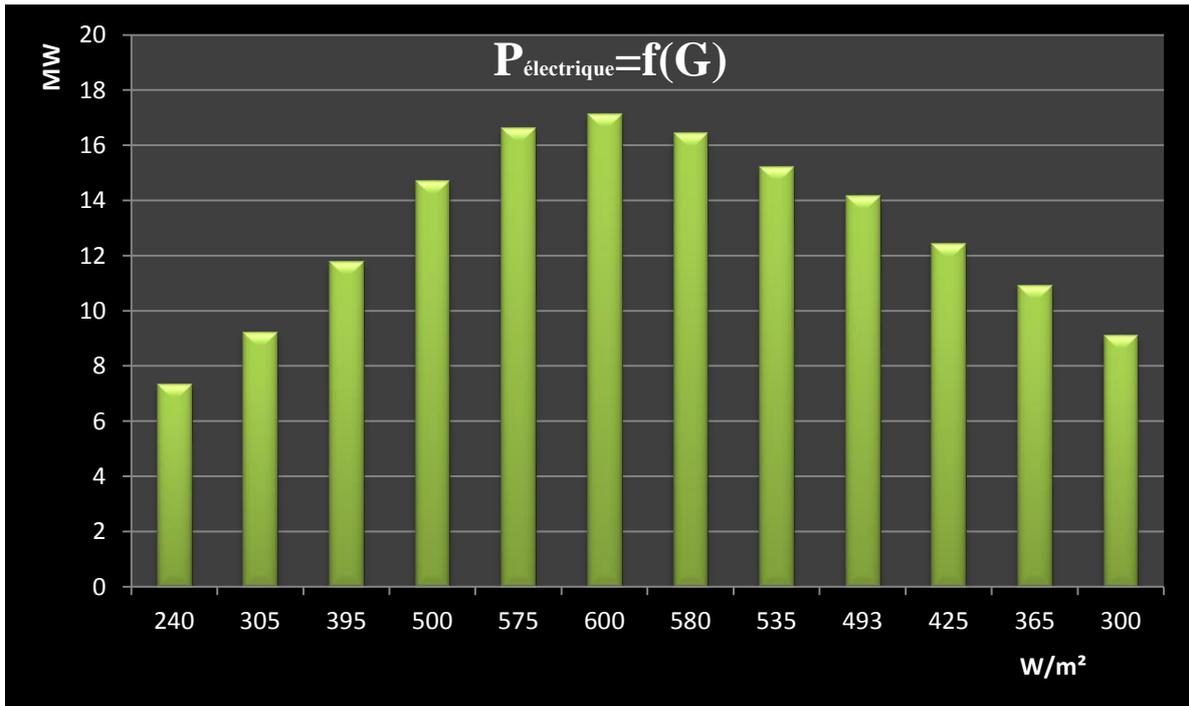
Figure (V. 8) : Evolution du rendement global en fonction de la température ambiante.

### V.3.3.3.2 Puissance électrique produite:

La figure (V. 9) montre la variation de la puissance électrique produite en fonction du rayonnement solaire.

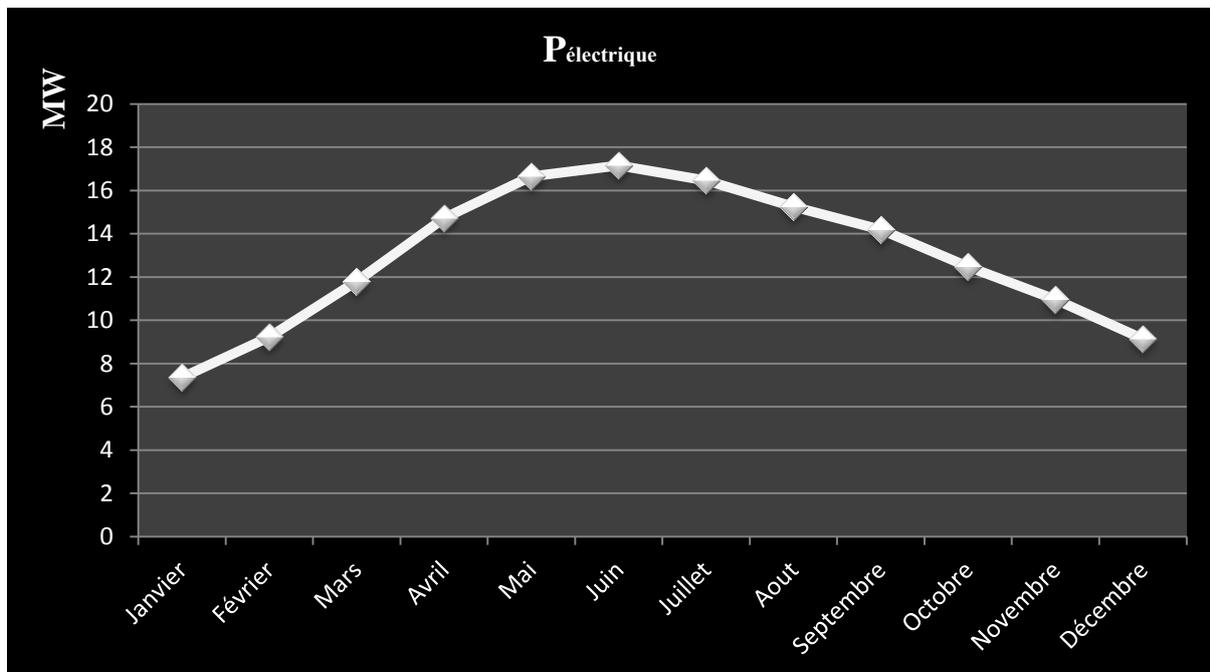
La figure (V.9) montre que la puissance électrique produite est proportionnelle au rayonnement solaire. Pour un rayonnement maximal de  $600 \text{ W/m}^2$ , la puissance électrique produite est maximale, elle est égale à **17.16 MW**.

La puissance électrique produite elle est minimale au mois de janvier **7.36 MW** qui correspond au rayonnement minimale de  $240 \text{ W/m}^2$ .



**Figure (V. 9) :** Variation de la puissance électrique produite en fonction du rayonnement Solaire.

La figure (V.9) montre que la puissance électrique produite par la tour solaire relative au site d’Adrar varie selon les saisons de l’année. Elle est minimale en hiver et augmente pour atteindre son maximum en été (aux mois de juin et juillet). La puissance décroît ensuite pour le restant des mois de l’année.

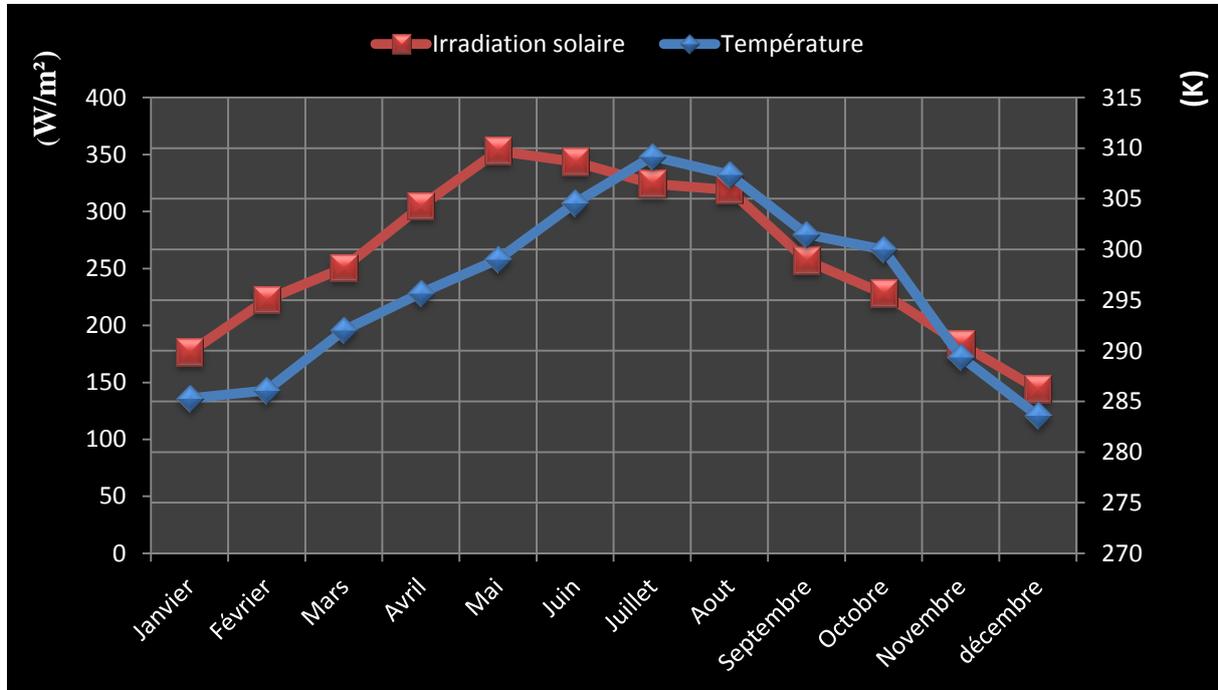


**Figure (V. 10) :** Puissance électrique moyenne produite durant l’année au site d’Adrar.

## V.4 Calcul des performances de la tour solaire de Béchar :

### V.4.1 Données météorologique du site :

Le tableau (V.9) résume les moyennes mensuelles, de la température ambiante et de l'irradiation solaire, de la wilaya de Béchar.



**Figure (V. 11) :** Variation de l'irradiation solaire et de la température ambiante au cours du temps. Moyennes mensuelles du site de Béchar.

**Tableau (V. 9) :** Valeurs des moyennes mensuelles de la température ambiante et de l'irradiation solaire de la ville d'Adrar de l'année 2013.

Les Mois	$T_0(K)$	$G(w/m^2)$
Janvier	285.3	176.4
Février	286.1	222.7
Mars	292	250.6
Avril	295.7	304.6
Mai	299	353
Juin	304.6	343.5
Juillet	309.2	324.3
Aout	307.4	319
Septembre	301.5	257
Octobre	300	227.8
Novembre	289.4	183.6
décembre	283.6	144

#### V.4.2 Calcul de différents paramètres :

##### V.4.2.1 Le collecteur :

Le calcul des performances du collecteur suivant les variations de la température ambiante et du rayonnement solaire mensuelles sont montrés sur le tableau (V.10) ci- dessous.

**Tableau (V. 10) :** Résultats de calcul des performances du collecteur.

Les Mois	$\dot{Q}(MW)$	$\dot{m}(kg/s)$	$V_{coll}(m/s)$
Janvier	402192000	15991,7296	2,53911706
Février	507756000	20189,1054	3,21415504
Mars	571368000	22718,4095	3,6871085
Avril	694488000	27613,837	4,53369387
Mai	804840000	32001,5905	5,30726165
Juin	783180000	31140,3579	5,25085276
Juillet	739404000	29399,7614	5,02644737
Aout	727320000	28919,2843	4,91748211
Septembre	585960000	23298,6083	3,89252754
Octobre	519384000	20651,4513	3,4350083
Novembre	418608000	16644,4533	2,67879333
décembre	328320000	13054,4732	2,06104124

##### V.4.2.1.1 Vitesse d'écoulement d'air dans le collecteur :

La figure (V.10) montre l'évolution de la vitesse d'écoulement d'air dans le collecteur en fonction des différents mois de l'année. On note que la vitesse d'écoulement d'air dans le collecteur est maximale pour les mois de Mai et Juillet. Elle est minimale au mois de Décembre, c'est-à-dire que l'écoulement d'air dans le collecteur est proportionnel à l'augmentation de la température ambiante,  $T_0$ .

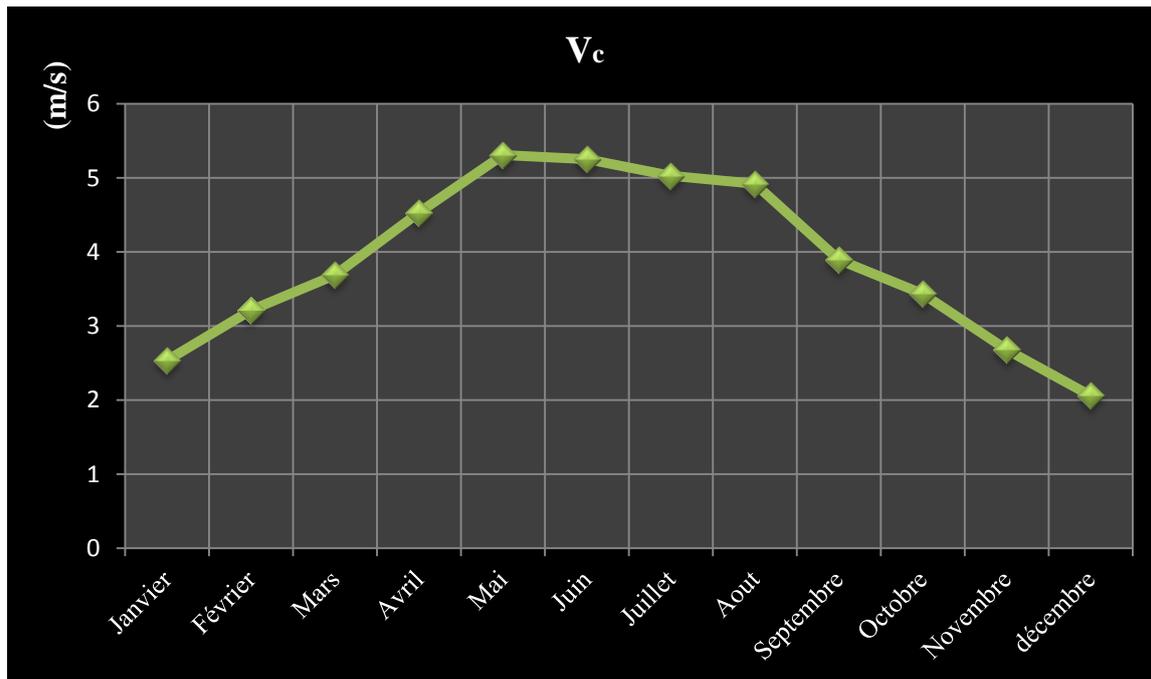


Figure (V. 12) : Variation de la vitesse de l'air à la sortie de collecteur – entrée de la cheminée au cours de l'année.

#### V.4.2.2 La cheminée :

Les performances de la cheminée en fonction des données mensuelles sur la température et le rayonnement solaire de la wilaya de Béchar sont données dans le tableau (V.11)

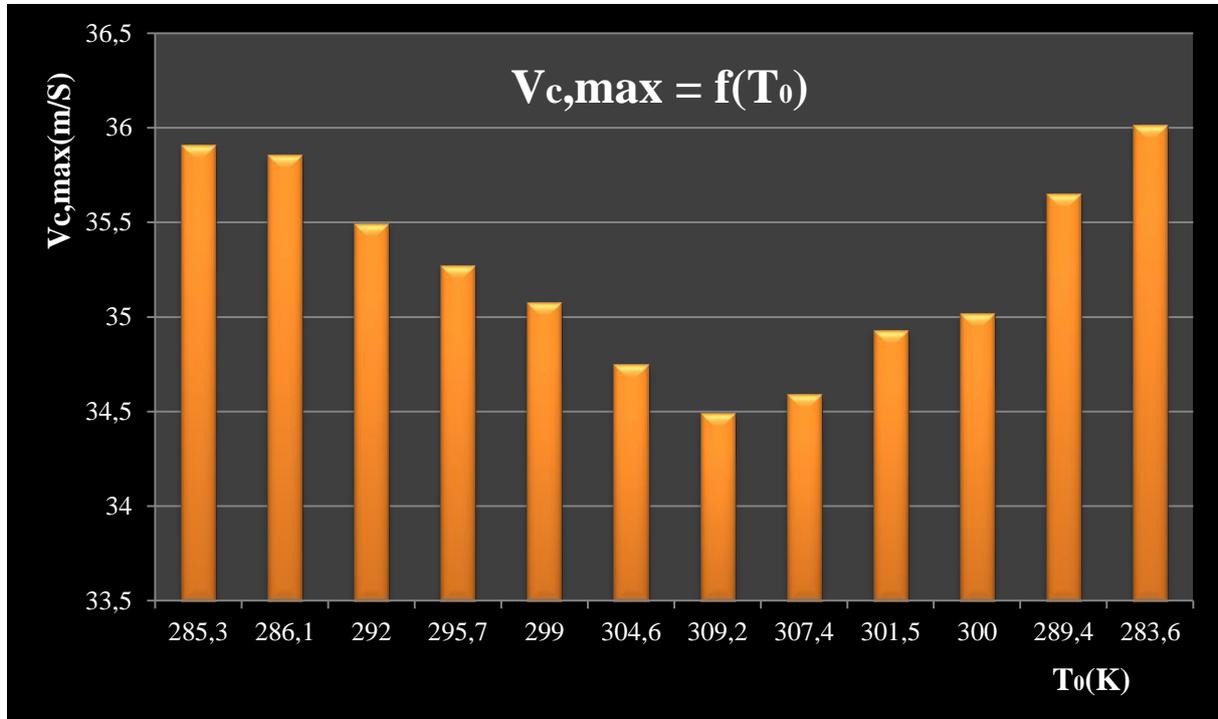
Tableau (V. 11) : Résultats relatifs au calcul des performances de la cheminée.

Les mois	$V_{C,max}(m S^{-1})$	$\Delta p_{tot}(Pa)$	$\Delta P_s(Pa)$	$P_{tot}(W)$	$\eta_c$
Janvier	35,9086644	51,8455806	34,5637204	10310125,4	0,02563483
Février	35,8584249	65,3620006	43,5746671	12979844,7	0,02556315
Mars	35,4943079	72,8037397	48,5358265	14310847,4	0,02504664
Avril	35,2715443	87,9363196	58,6242131	17176936,6	0,02473324
Mai	35,076362	101,345194	67,5634629	19686597,2	0,02446026
Juin	34,7524309	97,7070364	65,1380243	18804594,8	0,02401057
Juillet	34,4929545	91,5569367	61,0379578	17489387,5	0,02365336
Aout	34,5937949	90,3239559	60,2159706	17304302,8	0,02379186
Septembre	34,9306349	73,4773546	48,9849031	14213889,8	0,02425744
Octobre	35,0178526	65,2915743	43,5277162	12661921,1	0,02437873
Novembre	35,6533936	53,5781189	35,718746	10578918,9	0,02527166
décembre	36,0161283	42,449583	28,299722	8466879,99	0,0257885

##### V.4.2.2.1 Vitesse d'écoulement d'air dans la cheminée :

La figure (V.11) montre l'évolution de la vitesse maximale d'écoulement d'air dans la cheminée en fonction de la température ambiante  $T_0$ . On note que la vitesse de l'air dans la cheminée est inversement proportionnelle à la température  $T_0$ . Pour les faibles valeurs de la température, la vitesse maximale de l'écoulement d'air est maximale. La valeur minimale de

la température ambiante est 283.6 K qui correspond à une vitesse maximale de 35.62 m/s. Pour une température maximale de 309.2 K , elle correspond à une vitesse minimale de 34.27 m/s.



**Figure (V. 13) :** Variation de la vitesse maximale de l'air dans la cheminée en fonction de la Température ambiante  $T_0$ .

#### V.4.2.2.2 Puissance totale :

La figure (V.12) donne l'évolution de la puissance totale fournie (de l'air) en fonction de l'irradiation solaire  $G$  ( $W/m^2$ ). On note que cette évolution est proportionnelle à l'irradiation solaire. Elle est de l'ordre de **19MW** au mois de Mai quand le rayonnement solaire est maximal, atteignant les  $353 W/m^2$ . Par ailleurs, le minimum de puissance est relatif au mois de Décembre où la puissance est de **8.5MW** pour un rayonnement de  $144 W/m^2$ .

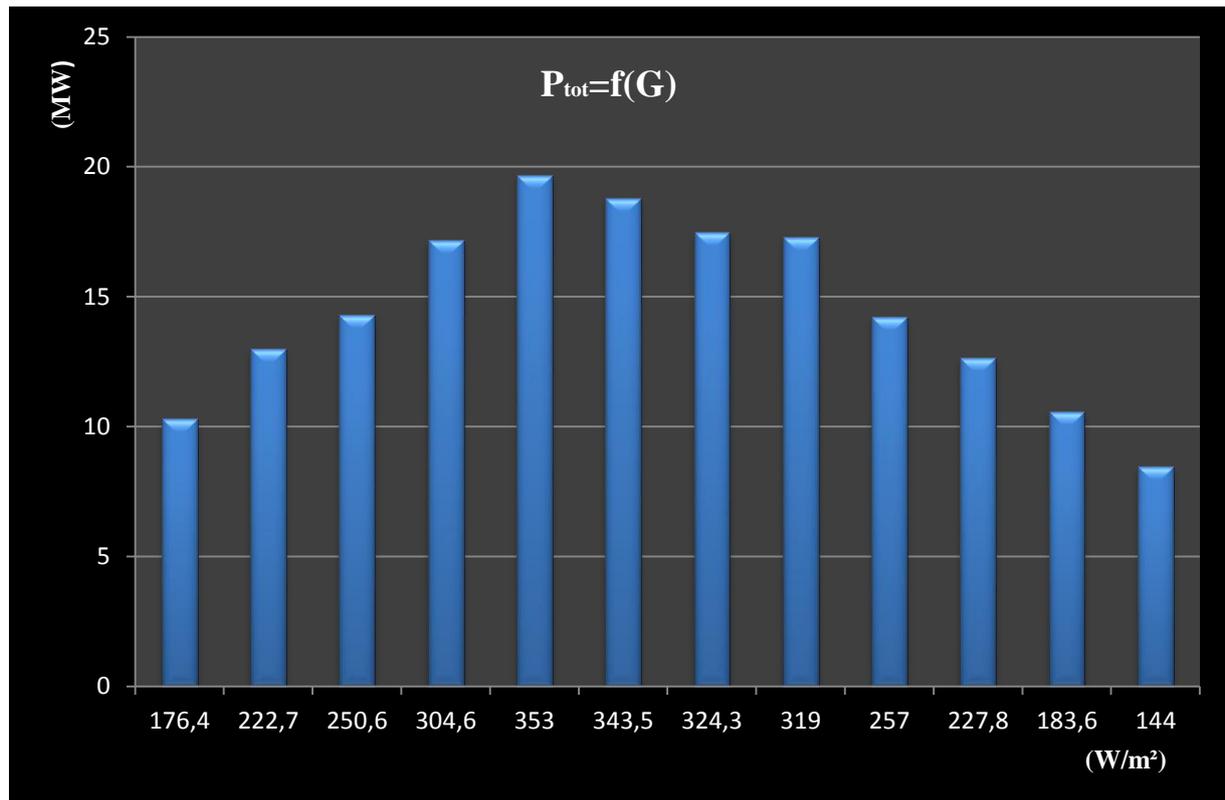


Figure (V. 14) : Evolution de la puissance totale en fonction de l'irradiation solaire.

#### V.3.3.2.3 Rendement de la cheminée :

La figure (V.15) donnant l'évolution du rendement de la cheminée en fonction de la température ambiante  $T_0$  au cours de l'année montre que le rendement de la cheminée est inversement proportionnel à la température ambiante  $T_0$ . Il diminue au fur et à mesure que la température augmente durant les différents mois de l'année. Il atteint un maximum de 2.58 % pour le mois de décembre et un minimum de 2.36% au mois de juillet où la température est relativement élevée (36°C).

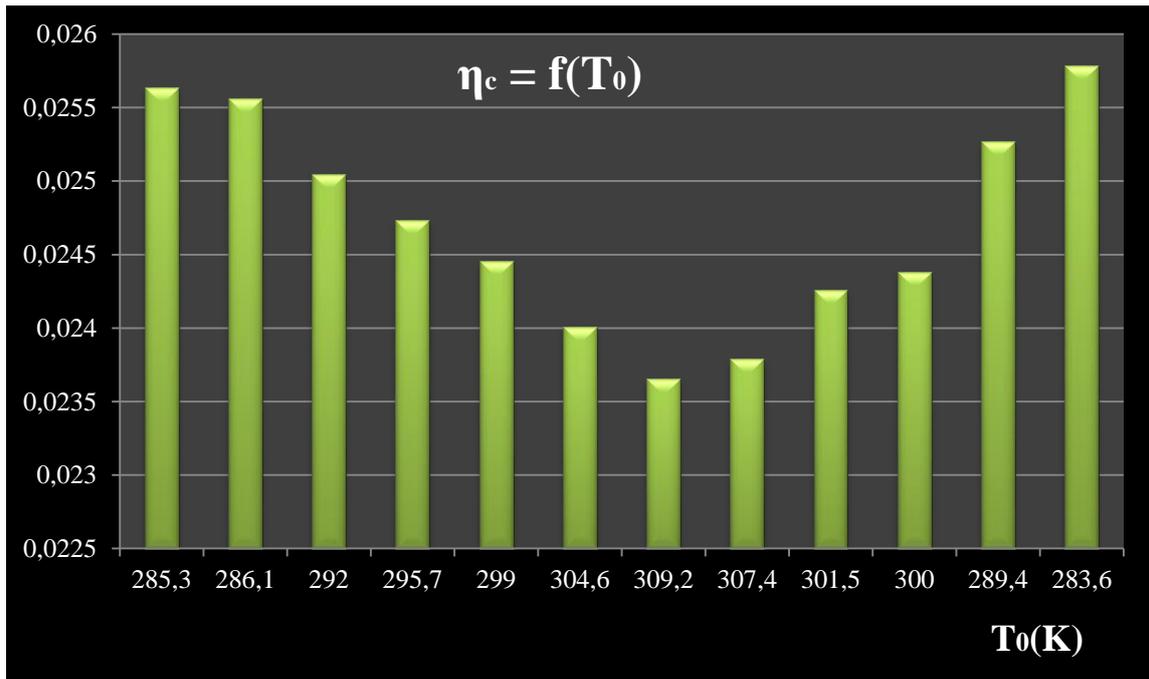


Figure (V. 15) : Rendement de la cheminée en fonction de la température  $T_0$ .

#### V.4.2.3 La turbine :

La puissance récupérée au niveau de la turbine, le rendement global ainsi que la puissance électrique récupérée sont montrés dans le tableau (V.12).

Tableau (V. 12) : Résultats relatifs au calcul des performances de la turbine et le rendement global.

Les mois	$P_{Wt,max}$ (W)	$P_{électrique}$ (W)	$\eta_{glob}$
Janvier	6873416,91	5498733,53	0,01230472
Février	8653229,8	6922583,84	0,01227031
Mars	9540564,97	7632451,97	0,01202239
Avril	11451291	9161032,83	0,01187195
Mai	13124398,1	10499518,5	0,01174093
Juin	12536396,5	10029117,2	0,01152507
Juillet	11659591,7	9327673,34	0,01135361
Aout	11536197,9	9228958,33	0,01142009
Septembre	9475926,53	7580741,22	0,01164357
Octobre	8441280,72	6753024,57	0,01170179
Novembre	7052612,59	5642090,07	0,0121304
décembre	5644586,64	4515669,31	0,01237848

##### V.4.2.3.1 Rendement global :

Le rendement global est le produit des trois rendements : celui du collecteur, de la cheminée et celui de La turbine. Les calculs ont été faits en considérant les rendements, du collecteur et de la turbine, comme invariants ( $\eta_{coll} = 0.6$  et  $\eta_{wt} = 0.8$ ). L'évolution du rendement global en fonction de la température ambiante est montrée dans la figure (V.14). Ce rendement varie entre 1.13% et 1.23% pour des températures allant de 10.5°C à 36°C.

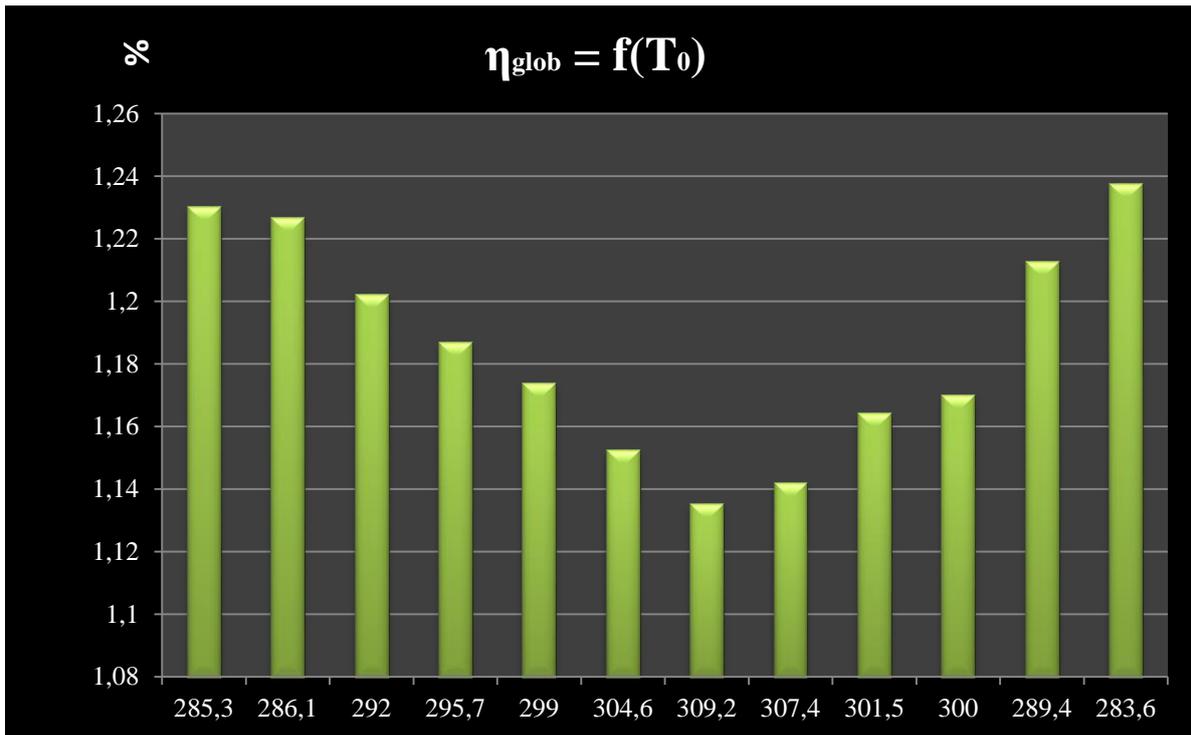


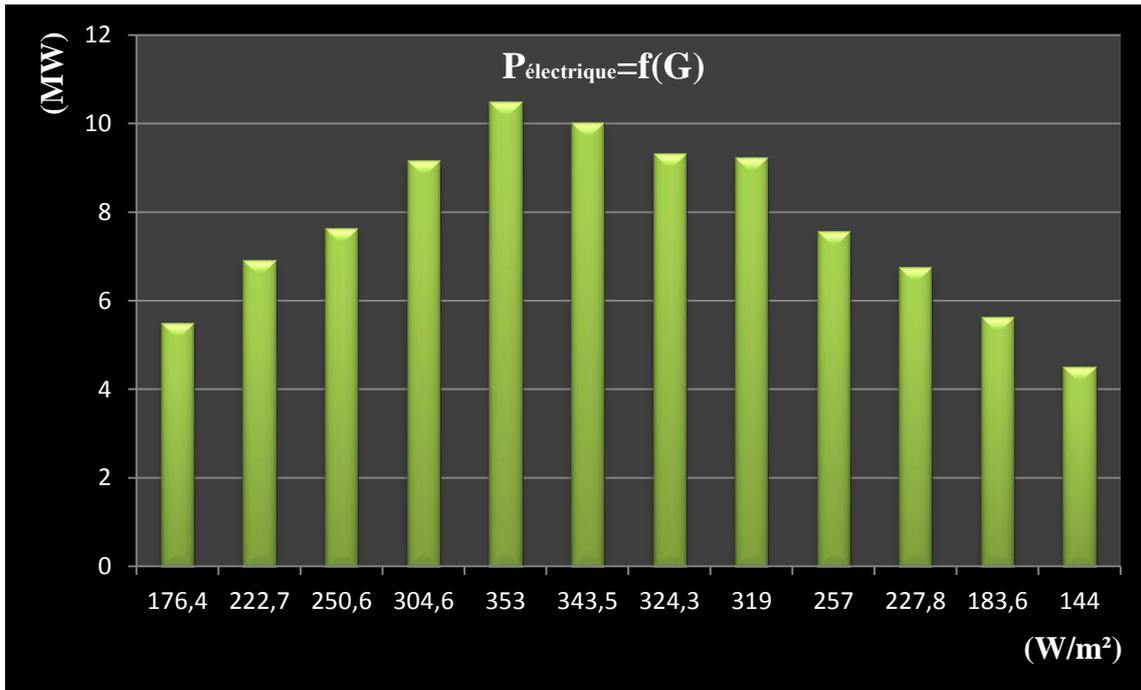
Figure (V. 16) : Evolution du rendement global en fonction de la température ambiante.

#### V.3.3.3.2 Puissance électrique produite:

La figure (V.17) montre la variation de la puissance électrique produite en fonction du rayonnement solaire.

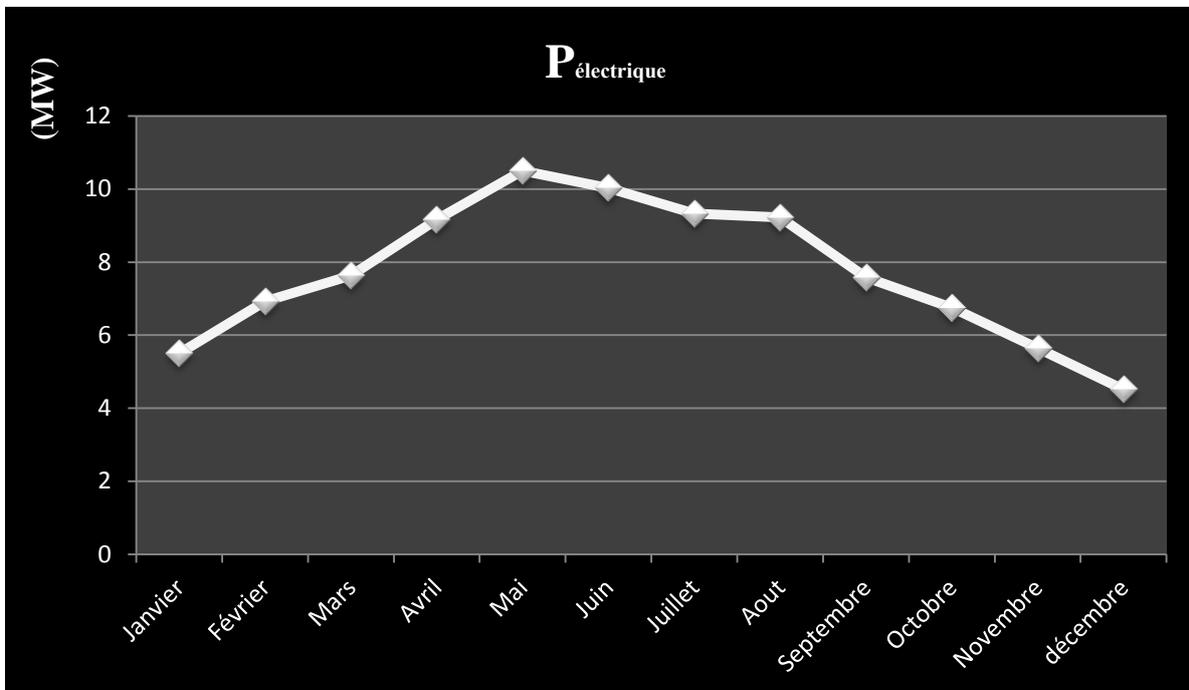
La figure (V.17) montre que la puissance électrique produite est proportionnelle au rayonnement solaire. Pour un rayonnement maximal de **353 W/m<sup>2</sup>**, la puissance électrique produite est de **10.5 MW**.

La puissance électrique produite est minimale au mois de Décembre est de **4.52 MW**. Elle correspond à un rayonnement minimale de **144 W/m<sup>2</sup>**.



**Figure (V. 17) :** Variation de la puissance électrique produite en fonction du rayonnement solaire.

La figure (V.16) montre que la puissance électrique produite par la tour solaire relative au site de Béchar varie selon les saisons de l'année. Elle est minimale en hiver et augmente pour atteindre son maximum en été (aux mois de mai et juin). La puissance décroît ensuite pour le restant des mois de l'année.



**Figure (V. 18) :** Puissance électrique moyenne produite durant l'année au site de Béchar.

## V.5 Comparaison entre la tour solaire d'Adrar et celle de Béchar :

### V.5.1 l'irradiation solaire :

La figure (V.19) montre que l'irradiation solaire de la wilaya d'Adrar est plus grande que celle de la wilaya de Béchar. Le maximum de l'irradiation solaire du site d'Adrar atteint  $600 \text{ W/m}^2$ , par contre le maximum du site de Béchar est  $350 \text{ W/m}^2$ .

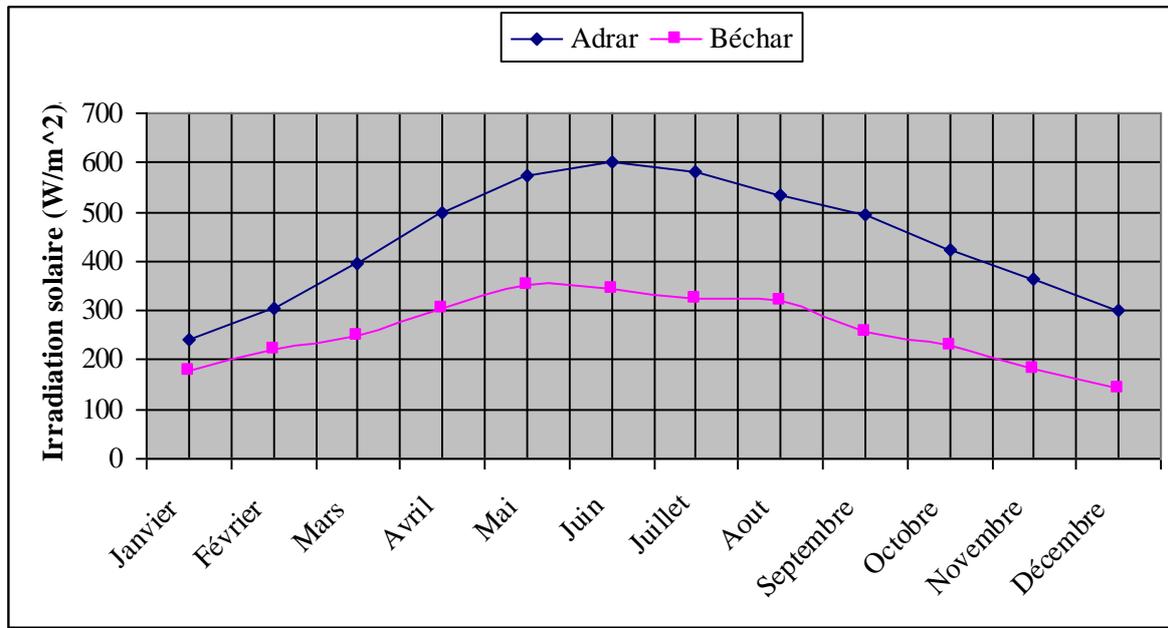


Figure (V. 19) : Irradiation solaire des deux cites Adrar et Béchar.

### V.5.2 La puissance électrique produite :

Le tableau (V.13) résume les puissances électriques produites par les deux tours solaires, la tour solaire d'Adrar et celle de Béchar.

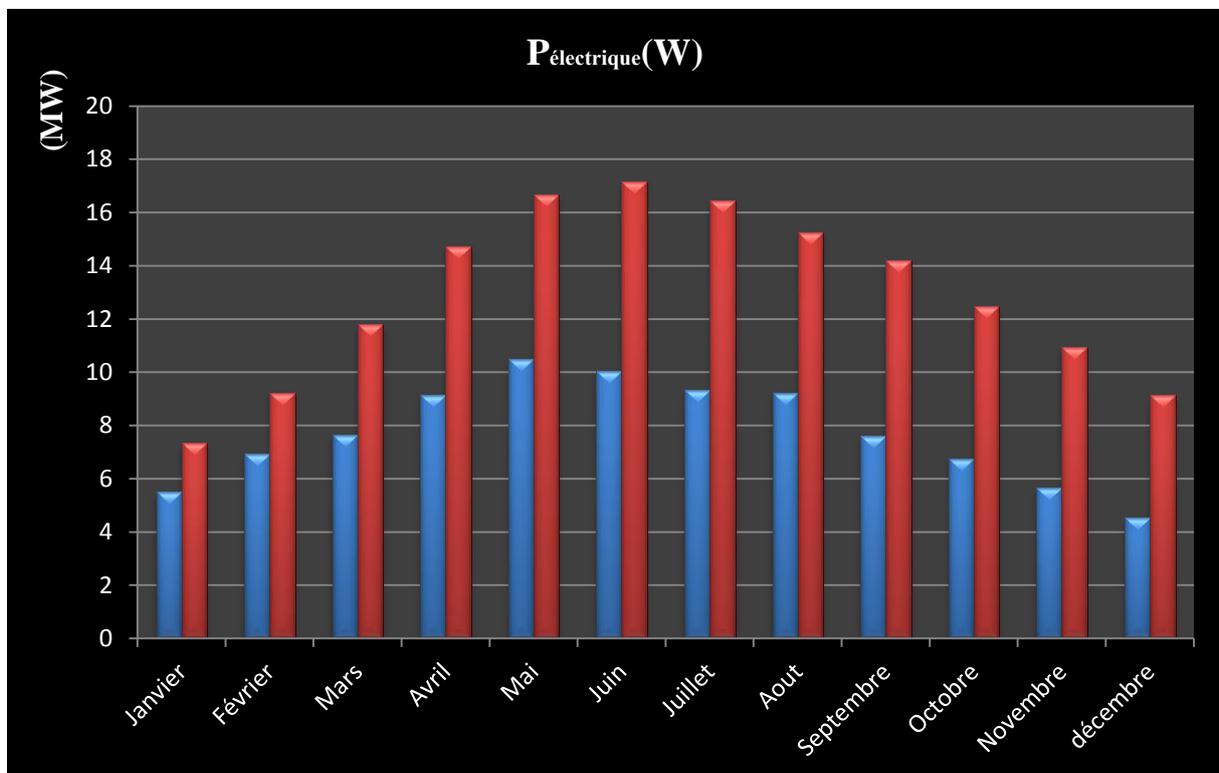
Tableau (V. 13) : Puissance électrique produite par la tour solaire d'Adrar et celle de Béchar.

Les mois	$P_{\text{électrique}} (W)$ , tour d'Adrar	$P_{\text{électrique}} (W)$ , tour de Béchar
Janvier	7360021,94	5498733,53
Février	9226104,6	6922583,84
Mars	11796095,2	7632451,97
Avril	14724105,7	9161032,83
Mai	16656944,3	10499518,5
Juin	17157607,4	10029117,2
Juillet	16463928,2	9327673,34
Aout	15249831,8	9228958,33
Septembre	14189082,2	7580741,22
Octobre	12474184,6	6753024,57
Novembre	10955370,7	5642090,07
décembre	9137013,54	4515669,31

Le tableau (V.13) montre que la puissance électrique produite par la tour solaire d'Adrar est plus grande que celle produite par la tour solaire de Béchar.

La puissance maximale produite par la tour d'Adrar est atteinte aux mois de juin, où elle est de l'ordre de **17.15 MW**, alors que le maximum de puissance produite par la tour de Béchar est atteint en mois de mai, et cette valeur est de **10.5 MW**. Ce qui correspond à une différence de **6.35 MW**. C'est une valeur assez importante...

Le minimum de puissance électrique produite par la tour d'Adrar est de **7.36 M**. Cette valeur est atteinte au mois de janvier. Le minimum de puissance produite par la tour de Béchar est de **4.51 MW** et il correspond au mois de Décembre.



**Figure (V.20) :** Puissance électrique produite par la tour d'Adrar et celle de Béchar.

### V.5.3 L'énergie produite :

Elle est calculée en considérant les mêmes heures de fonctionnement moyennes par jour que le prototype de Manzanaraes (voir tableau V.14).

Tableau (V. 14) : Heures de fonctionnement moyennes journalières de l'année 1987 du prototype de Manzanares [1].

Les mois	Heur de fonctionnement par jour
Janvier	2.5
Février	6.3
Mars	6.5
Avril	10.3
Mai	10.5
Juin	13.5
Juillet	12.5
Aout	12
Septembre	10
Octobre	8.5
Novembre	6.5
décembre	6.5

Tableau (V. 15) : Energie produite par les deux tours solaires, d'Adrar et de Béchar.

	Tour solaire d'Adrar	Tour solaire de Béchar
Les mois	$E(MWh/jours)$	$E(MWh/jours)$
Janvier	18,4000549	13,7468338
Février	58,124459	43,6122782
Mars	76,6746188	49,6109378
Avril	151,658289	94,3586381
Mai	174,897915	110,244944
Juin	231,6277	135,393082
Juillet	205,799103	116,595917
Aout	182,997982	110,7475
Septembre	141,890822	75,8074122
Octobre	107,277988	58,0760113
Novembre	71,2099096	36,6735855
décembre	59,390588	29,3518505

D'après le tableau (V.15) on note que l'énergie produite par la tour solaire d'Adrar est plus importante que celle produite par la tour solaire de Béchar. Le maximum d'énergie produite par les deux tours solaires est relative au mois de juin avec une moyenne mensuelle de **231.6 MW** pour la tour d'Adrar, et une moyenne mensuelle de **135.4MW** pour la tour de Béchar.

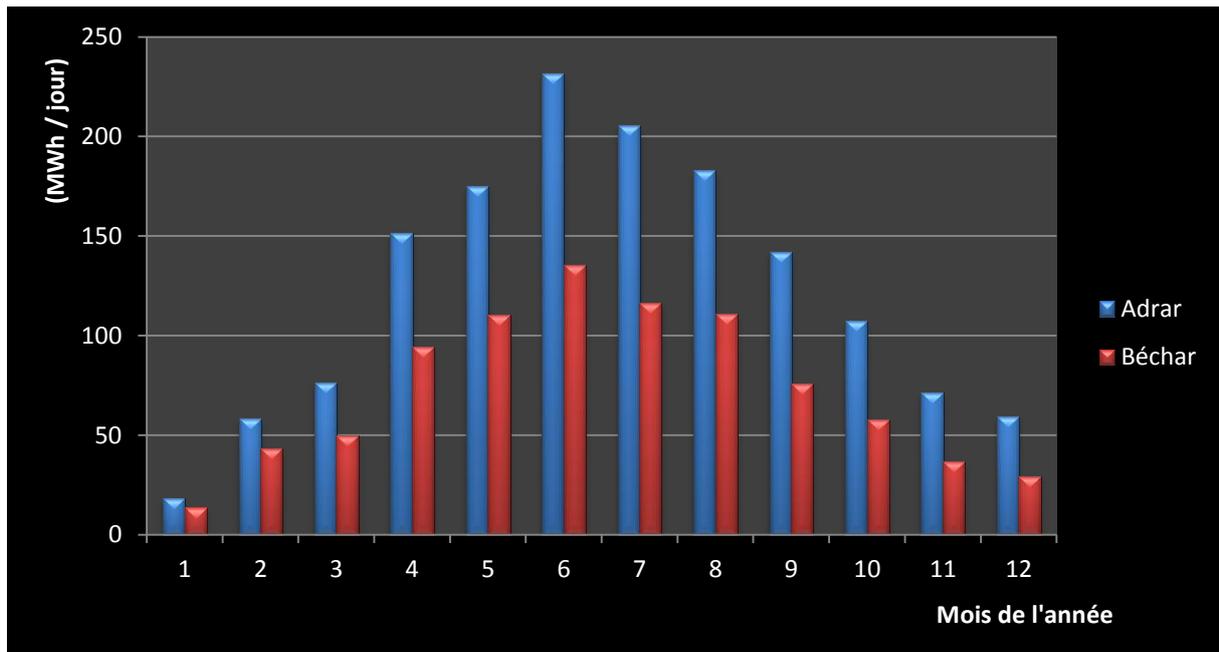


Figure (V. 21) : Energie moyenne produite par jour de la tour d'Adrar et de Béchar.

L'énergie minimale produite pour les deux tours solaires est relative au mois de janvier. Elle est inférieure à **18.4 MW** pour la tour d'Adrar et une valeur de **13.7 MW** pour la tour de Béchar.

### V.6 Comparaison entre le rayonnement solaire mesuré et le rayonnement calculé :

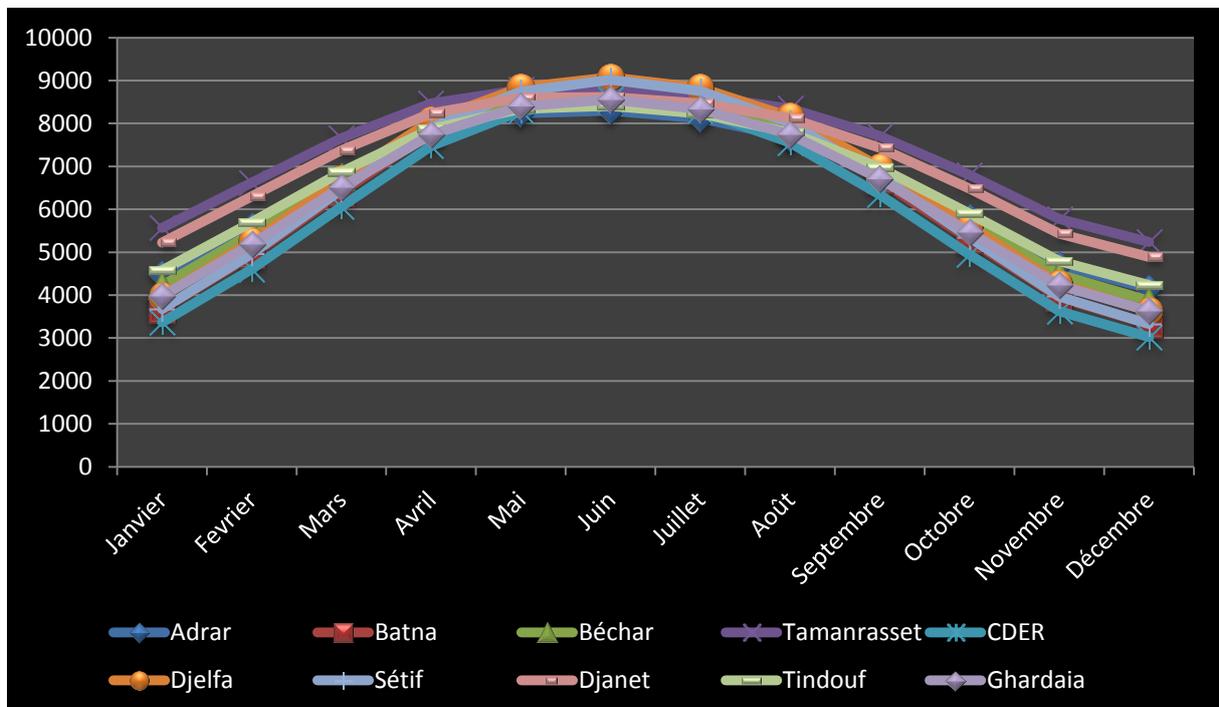
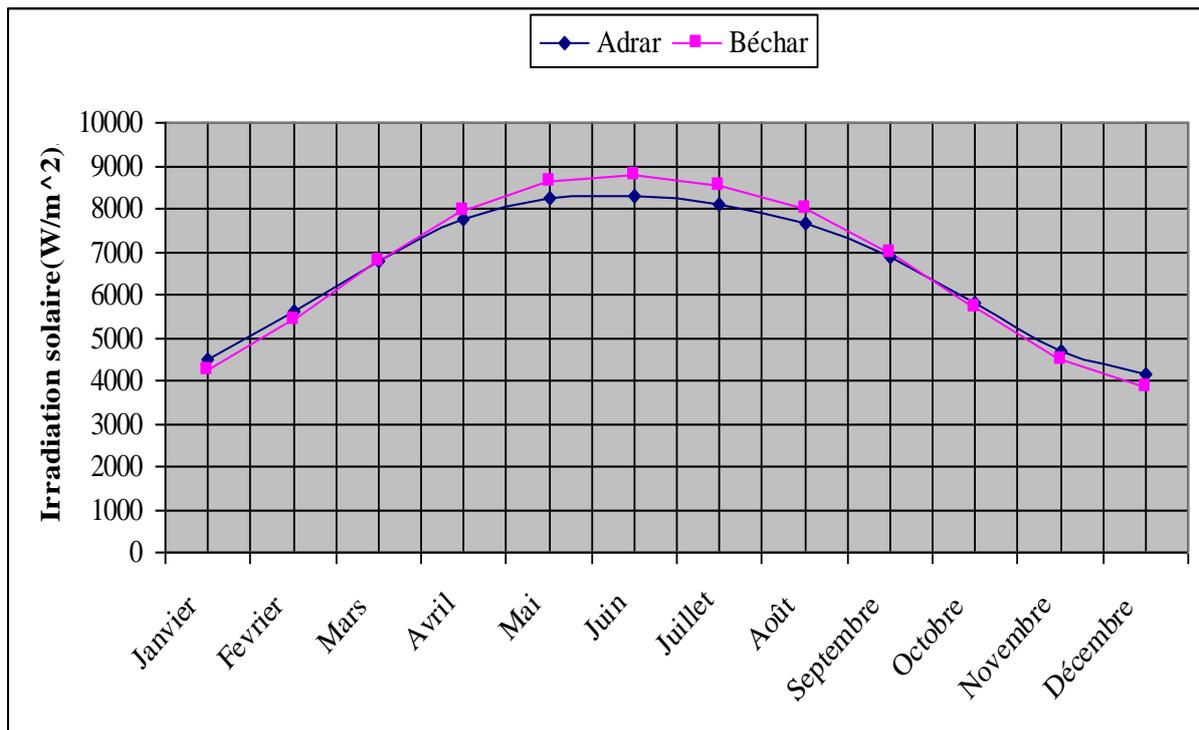


Figure (V. 22) : Irradiation solaire calculée pour les différentes Wilayas d'Algérie pour le cas d'un ciel totalement claire.

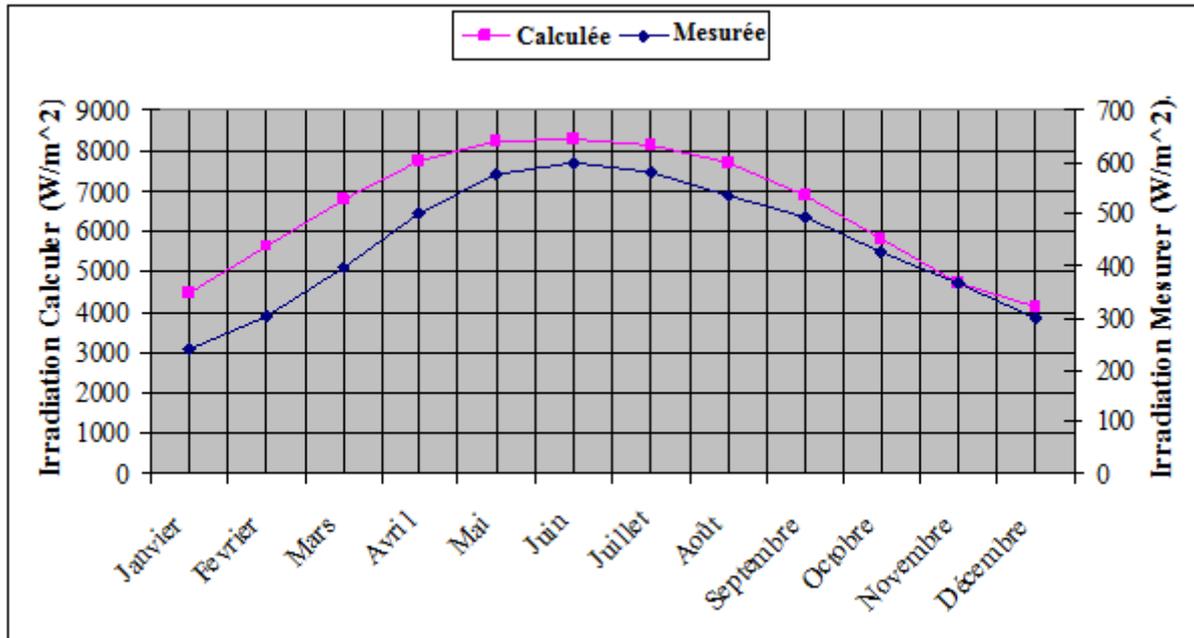
La figure (V.22) montre que le rayonnement solaire des dix (10) wilayas, présenté sur la figure, a pratiquement les mêmes valeurs durant l'été. La wilaya de Tamanrasset a une moyenne de  $7300 \text{ W/m}^2$ , la wilaya de Djanet a une moyenne annuelle de  $7000 \text{ W/m}^2$ , la wilaya d'Adrar vient après la wilaya de Béchar, par une moyenne annuelle de  $6542 \text{ W/m}^2$ .

### V.6.1 Comparaison entre la wilaya d'Adrar et la wilaya de Béchar :



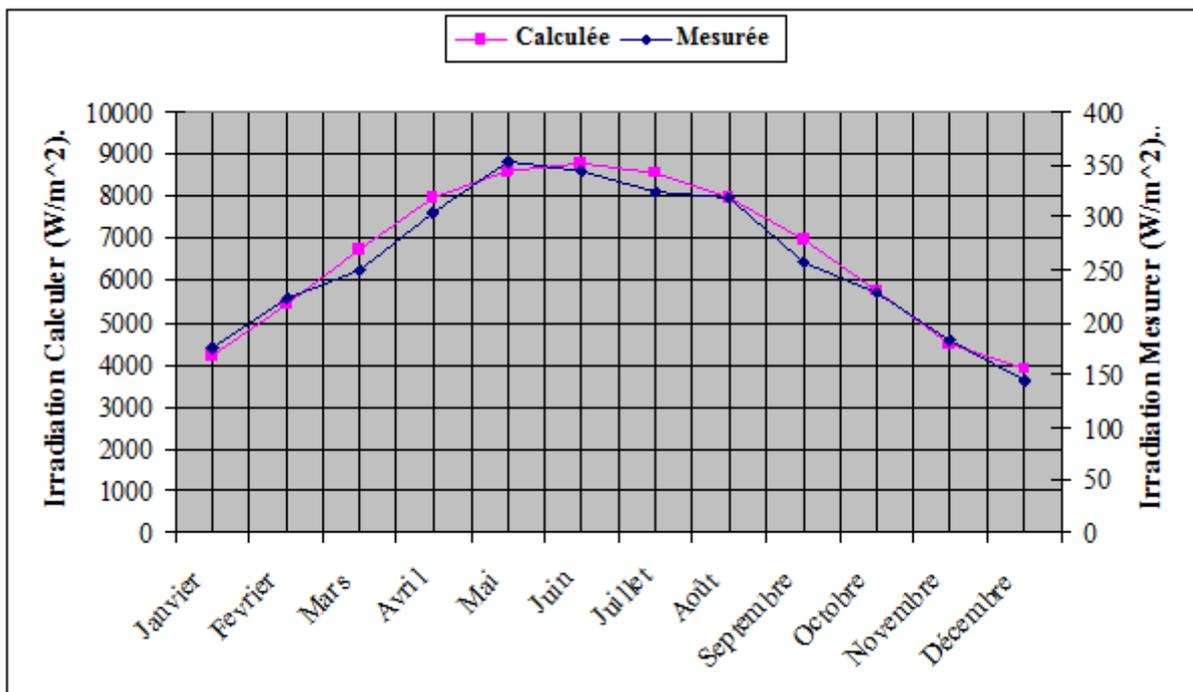
**Figure (V. 23) :** Irradiation solaire calculée pour les deux wilayas Adrar et Béchar pour le cas d'un ciel totalement claire.

La figure (V.23) montre que la quantité de rayonnement solaire reçu par la wilaya de Béchar est plus importante que celle reçue par la wilaya d'Adrar pour le cas d'un ciel totalement claire.



**Figure (V. 24) :** Comparaison entre le rayonnement mesurée et le rayonnement calculée pour un ciel totalement claire pour la wilaya d’**Adrar**.

La figure (V.24) montre que le rayonnement calculée pour un ciel totalement clair est 20 fois plus grand que celui mesuré au niveau des stations météorologiques.



**Figure (V. 25) :** Comparaison entre le rayonnement mesurée et le rayonnement calculée pour un ciel totalement claire pour la wilaya de **Béchar**.

## **V.7 Conclusion :**

Des calculs de performances énergétiques réalisés sur les deux tours solaires, celle d'Adrar et la tour solaire de Béchar, les résultats montrent que la CCS d'Adrar est plus performant que la centrale cheminée solaire de Béchar.

Bien que point de vue puissance, les performances énergétiques de la CCS prévue au site d'Adrar est plus puissante que celle de Béchar, la qualité du sol de la wilaya de Béchar est plus stable (rocheux) que celle de la wilaya d'Adrar, ce qui nécessite de faire une étude techno-économique sur les deux centrales afin de d'évaluer le cout de revient de chacune des centrales.

Les résultats de l'irradiation solaire calculée pour le cas d'un ciel totalement claire montrent que le rayonnement captée par la wilaya de Béchar est plus important que celui de cite d'Adrar.

Néanmoins, les valeurs mesurées par les stations météorologiques montrent le contraire.

Adrar est une ville du sud de l'Algérie qui dispose d'un potentiel solaire important. L'Algérie devra donc penser sérieusement à diversifier les formes d'énergie à utiliser afin d'alléger sa dépendance énergétique des combustibles fossiles menacés d'épuisement. Ce qui lui permettra de satisfaire ses besoins énergétiques tout en préservant l'environnement et les ressources énergétiques non renouvelables pour les générations futurs.

# *Conclusion Générale*

## Conclusion Générale

Le travail présenté dans ce mémoire est relatif à la détermination des performances énergétiques des centrales à cheminée solaire au sud Algérien. La région d'Adrar et la région de Béchar ont été choisies comme sites d'étude compte tenu de l'importance de leurs gisements solaires par rapport aux autres régions du pays et compte tenu de la banque de données annuelles disponible sur la température ambiante et l'irradiation solaire. L'analyse des performances énergétiques a été établie sur la base de l'utilisation du modèle de Schlaich et al. [24]

Dans le cadre de cette étude nous nous sommes intéressés à :

- Evaluer l'impact de l'Irradiation solaire et de la température ambiante sur la puissance électrique produite par une centrale à cheminées solaire ;
- Déterminer les performances énergétiques des deux centrales à cheminées solaire. La centrale à cheminées solaire d'Adrar et la centrale à cheminées solaire de Béchar, pour faire une comparaison entre les deux centrales ;

Les résultats obtenus sur l'évaluation de l'impact de l'Irradiation solaire et de la température ambiante ont montré que :

- la capacité de production d'électricité dans la centrale à cheminée solaire dépend fortement de l'irradiation solaire captée, par contre la température ambiante n'influe pas sur la puissance électrique produite.

Les résultats obtenus sur le calcul des performances énergétiques des deux centrales à cheminées solaire ont montré que :

- la centrale à cheminées solaire d'Adrar est plus rentable que la centrale à cheminée solaire de Béchar.
- La puissance maximale produite par la centrale de Béchar avoisine les 10MW, par contre la puissance maximale produite par la centrale d'Adrar atteinte les 17 MW.
- L'énergie maximale produite par la centrale à cheminées solaire d'Adrar atteinte les 232 MWh par jour, et l'énergie produite par la centrale de Béchar avoisine les 132 MWh par jour, sa si considérant les mêmes heures de fonctionnement que le prototype de Manzanares en Espagne.

- L'irradiation solaire captée par le site d'Adrar est plus importante que celle du site de Béchar.

Afin de compléter l'analyse de cette étude sur le calcul des performances des centrales à cheminée solaire, une étude technico-économique sur les deux centrales (qualité du sol et coût) est nécessaire. Cette étude qui est complémentaire à celle élaborée dans ce mémoire fait l'objet d'un mémoire de maîtrise en cours.

# *Références Bibliographiques*

- [1] **Bernard, R., Menguy, G., Schwartz, M.** Le rayonnement solaire, conversion thermique et application. Technique et Documentation, pp.55-71, Paris, 1979.
- [2] **Charles, Chauliaguet.** L'énergie solaire dans le bâtiment, Editions Eyrolles, Paris, 1981.
- [3] **Djaout, I et Djidjeli, Y.** Analyse des Performances Energétiques des Centrales Cheminée Solaires par une Caractérisation Mécanique et Photo- Thermique du revêtement du Collecteur. Projet de Fin d'Etudes, Ecole Nationale Polytechnique, 2013.
- [4] **Bernardes, M.A dos S., VoB, A., Weinrebe, G.** Thermal and Technical Analyses of Solar Chimneys. Solar Energy, Vol.75, pp.511-524, 2003.
- [5] **Benbouza, N.** Etude du rayonnement solaire dans la région de Batna. Mémoire de Magister en Electrotechnique option : Maîtrise des Energies. Université de Biskra, 2008.
- [6] **Michel Capderou.** Atlas solaire de l'Algérie, tome 1,2 ; O.P.U. 1986.
- [7] **HADJ, B.M.** Modélisation et Etude Expérimentation d'un Capteur Solaire non Vitré et Perforé. Mémoire de mastère, Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen, 06 juillet 2011.
- [8] **Chems Eddine Chitour,** Les énergies renouvelables et la maitrise de l'énergie en Algérie. Ecole Nationale Polytechnique, Acte du séminaire, Editions Sonelgaz, 25 Juin, 2008.
- [9] **T.Chergui, H. Boualit, S.Larbi et A. Bouhdjar.** Revue des Energies Renouvelables SIENR'12 Ghardaïa, pp. 83 – 94, 2012.
- [10] **Ismail Zabat.** Etude numérique de l'efficacité dimensionnelle d'une cheminée solaire. Mémoire de mastère Université de Kasdi Merbah, Ouargla, 2010.
- [11] **Tayebi, T.** Processus de la convection naturelle laminaire dans une cheminée solaire. Memoir de Magister, université mentouri constantine, 2012 ??
- [12] **Haaf, W., Friedrich, K., Mayr, G., and Schlaich, J.** Solar Chimneys, Part I: Principle and Construction of the Pilot Plant in Manzanares. Solar Energy, Vol. 2, pp. 3- 20, 1983.
- [13] **Haaf, W.** Solar towers, Part II: Preliminary Test Results from the Manzanares Pilot Plant. Solar Energy, Vol. 2, pp. 141-161, 1984.
- [14] **W. Haaf,** Preliminary Test Results from the Manzanares Pilot Plant, International Journal of Solar Energy, 2, No. 2, pp. 141–161, 1983.
- [15] **Schlaich, J.,** The Solar Chimney, Axel Menges Edition, Stuttgart, Germany, 1995.

- [16] **Schlaich, J. And Schiel, W.**, Solar Chimneys. Encyclopedia of Physical Science and Technology, pp.99-109, 2004.
- [17] **Schlaich, J., Bergermann, R., Schiel, W., Weinrebe, G.**, Design of commercial solar tower systems - utilization of solar induced convective flows for power generation, Proceedings of the International Solar Energy Conference, Kohala Coast, United States, pp. 573-581,2003.
- [18] **Haaf, W, Friedrich, K., Mayr, G., Schlaich, J.**, Solar chimneys, part I: principle and construction of the pilot plant in Manzanares. Int. J. Solar Energy, Vol. 2, pp.3–20, 1983.
- [19] **Haaf, W.**, Solar chimneys, part II: preliminary test results from the Manzanares Pilot plant. Int. J. Solar Energy, Vol.2, pp.141-161, 1984.
- [20] **Mullet, L.B.**, The solar chimney overall efficiency, design and performance. Int. J. Ambient Energy, Vol. 8, pp.35–40, 1987.
- [21] **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, Manila, Philippines, 1989.
- [22] **Padki, M.M., Sherif, S.A.**, Solar chimney for power generation in rural areas. Seminar on Energy Conservation and Generation Through Renewable Resources, Ranchi, India, 1989.
- [23] **Padki, M.M., Sherif, S. A.**, A mathematical model for solar chimneys. In: Proceedings of International Renewable Energy Conference, Amman, Jordan, 1992.
- [24] **Padki, M. M., Sherif, S. A.**, On a Simple Analytical Model for Solar Chimneys. Int. J. Energy Res., Vol. 23, pp. 345-349, 1999.
- [25] **Yan, M.Q., Sherif, S.A., Kridli, G.T., Lee, S.S. and Padki, M.M.**, Thermo-fluid analysis of solar chimneys. In Industrial Applications of Fluid Mechanics, FED, ASME, 1991.
- [26] **Kretz H.** Theoretische Untersuchungen und Auslegung eines temporären Wasserspeichers für das Aufwindkraftwerk. Diplomarbeit. Berlin: Energie und Verfahrenstechnik der TU Berlin, 1997.
- [27] **Pasumarthi, N., Sherif, S. A.**, Experimental and Theoretical Performance of a Demonstration Solar Chimney Model –Part I: Mathematical Model Development. Int. J. Energy Res., Vol. 22, pp. 277-288, 1998.

- [28] **Pasumarthi, N., Sherif, S. A.**, Experimental and Theoretical Performance of a Demonstration Solar Chimney Model –Part II: Experimental and theoretical results and economic analysis. *Int. J. Energy Res.*, Vol. 22, pp.443-461, 1998.
- [29] **Pasumarthi, N., Sherif, S.A.**, Performance of a demonstration solar chimney model for power generation. In: *Proceedings of the 35th Heat Transfer and Fluid Mechanics*, Sacramento, USA, Juin 1997.
- [30] **Bernardes, M.A.D.S., Valle, R.M., Cortez, M. F.-B.**, Numerical analysis of natural laminar convection in a radial solar heater. *Int. J. Therm. Sci.*, Vol. 38, pp.42–50, 1999.
- [31] **Bernardes M.A. dos S.,Weinrebe, A. Voß G.**, Thermal and technical analyses of solar chimneys, *Solar Energy*, Vol. 75, pp. 511–524, 2003.
- [32] **Backstrom, T.W.V., Gannon, A.J.**, Compressible flow through tall chimneys. In: *Proceedings of Solar 2000: Solar Powers Life, Share the Energy*, Wisconsin, USA, 2000.
- [33] **Gannon, A.J., Backström, T.W.V.**, Solar chimney cycle analysis with system loss and solar collector performance. In: *Proceedings of Solar 2000: Solar Powers Life, Share the Energy*, Wisconsin, USA, 2000.
- [34] **Dai, Y. J., Huang, H. B., Wang, R. Z.**, Case study of Solar Chimney Power Plants in Northwestern Regions of China. *Renewable Energy*, Vol. 28, pp.1295- 1304, 2003.
- [35] **Pastohr H., Kornadt, O., Gürlebeck, K.**, Numerical and analytical calculations of the temperature and flow field in the upwind power plant. *Int. J. Energy Res.*, Vol. 28, pp. 495–510, 2004.
- [36] **T. Ming, Liu W., Xu G.**, Analytical and numerical investigation of th solar chimney power plant systems. *Int. J. Energy Res.* Vol. 30, pp. 861- 873, 2006.
- [37] **T. Ming, Liu W., Xu G.**, Analytical and numerical investigation of the solar chimney power plant systems. *Int. J. Energy Res.* Vol. 30, pp. 861- 873, 2006.
- [38] **Ninic N.**, Available energy of the air in solar chimneys and the possibility of its ground-level concentration. *Solar Energy*, Vol. 80, pp. 804–811, 2006.
- [39] **Pretorius J.P.**, Optimization and control of a large-scale solar chimney power plant. Ph.D. Thesis, University of Stellenbosch. South Africa, 2007.
- [40] **Pretorius J.P, Kröger D.G.**, Solar chimney power plant performance. *J. Solar Energy Eng.*, Vol. 128, pp. 302-311, 2006.

- [41] **Pretorius, J.P., Kröger, D.G.**, Critical evaluation of solar chimney power plant performance. *Solar Energy*, Vol. 80, pp. 535–544, 2006.
- [42] **Pretorius, J.P., Kröger, D.G., Buys, J.D., Von Backström, T.W.**, Solar tower power plant performance characteristics. In: *Proceedings of the ISES EuroSun2004 International Sonnenforum 1*, Freiburg, Germany, 2004.
- [43] **Kulunk H.**, A prototype solar convection chimney operated under Izmit conditions. In: *Proceedings of the 7th Miami international conference on alternative energy sources*, 1985.
- [44] **Schlaich J.**, Bergermann R., Schiel W., Weinrebe G., Design of commercial solar updraft tower systems- utilization of solar induced convective flows for power generation. *J Solar Energy Eng*, Vol.127, pp.117- 124, 2007.
- [45] **Davey R.C.**, Device for generating electricity from solar power. WO 2008/022372 A1, February 2008.
- [46] **Chergui T., Larbi S., Bouhdjar A.**, Thermo- hydrodynamic aspect analysis of flows in solar chimney power plants- A case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 14, pp.1410-1418, 2010.
- [47] **Larbi S., Bouhdjar A., Chergui C.**, Performance analysis of a solar chimney power plant in the southwestern region of Algeria. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.14, 470-477, 2010.
- [48] **Petela R.**, Thermodynamic study of a simplified model of the solar chimney power plant. *Solar Energy*, Vol. 83, pp. 94–107, 2009.
- [49] **Zhou X., Yang J., Xiao B., Hou G., Xing F.**, Analysis of chimney height for solar chimney power plant. *Appl Therm Eng*, Vol. 29, pp. 178- 185, 2009.
- [50] **Zhou X., Wang F., Fan J., Ochieng R. M.**, Performance of solar chimney power plant in Qinghai- Tibet Plateau. *Renew Sustain Energy Rev*, Vol. 14, pp. 2249- 2255 2010.
- [51] **Koonsrisuk A.**, Lorente S., Bejan A., Constructale solar chimney configuration. *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 53, pp.327–333, 2010.
- [52] **Krisst R.J.K.** Energy transfer system. *Alternat. Sources Energy*, Vol. 63, pp.8- 11, 1983.
- [53] **Zhou X.P., Yang J.K., Xiao B., Hou G.X.**, Experimental study of the temperature field in a solar chimney power setup. *Appl Therm Eng*, Vol. 27, pp. 2044-2050, 2007.

- [54] **Ketlogetswe C, Fiszdon J.K, Seabe O.O.**, Solar chimney power generation project—the case for Botswana. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 12, pp. 2005- 2012, 2008.
- [55] **Ferreira A.G, Maia C.B, Cortez M.F.B, Valle R.M.**, Technical feasibility assessment of a solar chimney for food drying. *Solar Energy*, Vol. 82, pp. 198-205, 2008.
- [56] **Golder K.**, Combined solar pond and solar chimney. Final year Mechanical Engineering Project. School of Aerospace, Mechanical and Manufacturing Engineering, Bundoora Campus, RMIT University, Melbourne, Australia; 2003.
- [57] **Maia C.B, Ferreira A.G, Valle R M, Cortez M.F.B.**, Analysis of the airflow in a prototype of a solar chimney dryer. *Heat Transfer Eng.*, Vol. 30, pp. 393-399, 2009.
- [58] **Chiemeka O. O, Ugur A.**, A parametric study on the feasibility of solar chimney power plants in North Cyprus conditions, Vol. 80, pp. 178-187, 2014.
- [59] **Sandeep K. Patel et al.**, Computational studies on the effect of geometric parameters on the performance of a solar chimney power plant, Vol. 77, pp. 424–431, 2014.
- [60] **Weibing Li, Ping Wei, Xinping Zhou.**, A cost-benefit analysis of power generation from commercial reinforced concrete solar chimney power plant, Vol. 79, pp.104-113, 2014.