



Département de Génie Mécanique

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de :

MASTER

En Génie Mécanique

Option : Energétique

Présenté par :

1. Hamza Ahmed
2. Tettahi Nedhirou

Thème

ETUDE D'UNE CHEMINEE SOLAIRE

Devant le jury composé de :

NOM et Prénom	Grade	Qualité
Ihaddadene Nebila	Professeur	Président
Ihaddadene Razika	MCA	Encadreur
Amirat belkacem	MCB	Examineur

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

On dédie ce modeste travail à qui les mots ne peuvent pas donner leur droit. À ceux qui ne peuvent pas compter leurs vertus À **NOS CHERS PARENTS** pour nous avoir encouragés et épaulés moralement et financièrement. Sans eux, on ne sera jamais arrivé à ce stade de connaissance et de savoir.

A ma chère et tendre mère

A celle qui a tout souffert, sans me faire souffrir, qu'elle trouve dans ce mémoire le témoignage de ma reconnaissance et de mon affection pour tous les Sacrifices, l'extrême amour et la bonté qu'elle m'a offert pour me voir réussir.

A mon père

*A l'homme que je dois ma réussite, mon bonheur, et tout le respect ;
Qu'il trouve ici l'expression de mon affection et une récompense des sacrifices
Consentis pour moi.*

A mes frères

*A mes frères (jermal, zeini, moulaye Idriss et sidi med En USA) En témoignage de mon profond amour et respect, à qui je souhaite le succès et
Le bonheur.*

A tous mes amis tout particulièrement ma promotion, Mohamedou Msaiguil, deidahi et Abir, Chaima. N'oubliez pas non plus mon cher et respecté professeur Madame :

Ihaddadene Razika

Ahmed Hamza

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

A ma mère et mon père, source de vie, d'amour et d'affection.

A mes chers frères et mon oncle **Ahmedou** source de joie et du bonheur.

A **Ezza** l'amour de ma vie et mon second part, source d'espoir et de motivation.

A tous mes amis tout particulièrement ma promotion, **El hacen,**
Mohamedou Msaiguil et deidahi

N'oubliez pas non plus mon cher et respecté professeur Madame :

Ihaddadene Razika

Jettahi Nedhirou

Remerciements

Remerciements:

Louange à « الله » ALLAH qui nous a éclairé le chemin de la connaissance et nous a aidé à l'accomplissement de ce devoir.

*Ce mémoire ne pourrait pas avoir été mené à bien sans La confiance, la patience et la générosité de notre encadreur Madame **Ihaddadene R** Nos remerciements particuliers pour sa gentillesse et sa rigueur.*

On lui apporte nos plus sincères gratitudees pour le temps précieux qu'il nous a accordé.

Nos remerciements vont aussi à tous ceux qui ont contribué de loin ou de près à l'élaboration de ce travail, qu'ils trouvent ici nos vifs respects et nos profondes gratitudees.

Nous tenons à remercier le président et les membres de Jury pour leurs honorables présences au jury. Et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin, pour la réalisation de ce modeste travail.

Enfin, nous remercions toute la direction de la faculté de technologie, en particulier le département de génie mécanique et tous les professeurs éminents.

Sommaire

Sommaire

Introduction générale.....	2
Chapitre I : Etat de l'art sur les cheminées solaires	
<i>Partie 1 : Notions générales sur la cheminée solaire :</i>	<i>4</i>
I.1.Description d'une cheminée solaire	4
I.2.Principaux éléments de la cheminée solaire :	4
I.2.1 Le collecteur :	4
I.2.2. La cheminée :.....	6
I.2.3. La turbine :.....	6
I.3. Principe de fonctionnement d'un tour solaire :.....	7
I.4.Les méthodes de stockage de l'énergie dans une cheminée solaire :.....	8
I.4.1. Par chauffage de sable.....	8
I.4.2. Par chauffage d'eau.....	9
I.4.3. Par chauffage de galets.....	9
I.5. Avantages et inconvénients de la cheminée solaire	10
I.5.1. Les avantages : [7]	10
I.5.2. Les inconvénients [7]	11
I.6.1. Prototype de Manzanares.....	11
I.6.2. Le projet de Borunga :	12
I.6.3. La centrale solaire à cheminée de Chine.....	13
I.6.4. La centrale solaire à cheminée d'Arizona :	14
I.6.5. Projet Espagnol, Ciudad Real :.....	15
I.6.6. Montagnes solaires : du français raphaël menard -groupe OTH : [12].....	16
I.6.7. Cheminées solaires flottantes du grec Christos Papageorgiou : [13]	17
<i>Partie 2 : Etude thermique d'une cheminée solaire</i>	<i>18</i>
I.7 Analyse mathématique :.....	18
I.8.Les bilans énergétiques :.....	19
I.8.1.bilan énergétique au niveau de vitrage :.....	19
I.8.2bilan énergétique au niveau de flux d'air :.....	21

Sommaire

I.8.3.bilan énergétique au niveau de sol :	22
I.8.4.Corrélation théorique du calculer les coefficients de transfert thermique :.....	24
I.8.5.Calcul de performance de La cheminée (la tour) :	25
I.8.6 Calcul de performance de la turbine (turbine éolienne) :	26
Conclusion	28

Chapitre II : Matériels et méthode

II.1 Description du dispositif expérimental	27
II.2 Matériel annexe	28
II.3 Principe de fonctionnement	30
II.4 Support de l'étude et procédure expérimentale.....	30
II.4.1 Support de l'étude.....	30
II.4.2 Procédure expérimentale	30
II.5 Critères de l'étude	31
Conclusion	33

Chapitre III : Résultats et discussions

Partie 1.....	35
III.1.1. Description du problème :	35
III.1.2.Programmes et modèles Mathématiques :	36
III.1.3.Validation des résultats :	38
III.1.4. Evolution des températures en fonction du temps (Tf, Tsol et Tc) pour R=124 m.....	40
III.1.5 Influence du diamètre sur les évolutions des températures (Tf, Tsol et Tc) en fonction du temps.....	41
III.1.6. L'effet de la variation du Rayon sur les températures (Tf, Tsol et Tc) :	43
Partie 2.....	44
III.2.1.Variation des températures Tc,Tsol et Tf0 au cours de la journée :	45

Sommaire

III.2.2 L'évolution de température T_c et T_{sol} en fonction de T_a :	45
Conclusion	47
Conclusion Générale.....	49

Listes des figures

Chapitre I :

Figure(I.1.a) : collecteur de cheminée solaire [1]	5
Figure(I.1.b) : Verrière du collecteur d'une cheminée solaire [Web1]	5
Figure(I.2) : Image d'une tour d'une cheminée solaire [2]	6
Figure(I.3.a) : la disposition d'une turbine dans une cheminée solaire [3]	7
Figure (I.3.b) : (a) Turbines verticales, (b) Petites turbines horizontales [3]	7
Figure (I.4) : principe de fonctionnement d'une cheminée solaire [4]	8
Figure(I.5) : principe de la stockage de la chaleur dans le collecteur par des tubes remplis d'eau [5]	9
Figure (I.6) : principe du stockage de chaleur le jour sous la serre utilisant des galets [5]	10
Figure(I.7) : Tour solaire implantée à Manzanares [8]	12
Figure (I.8) : Projet de Buronga en Australie [10]	13
Figure(I.9) : la centrale d'Enviro- Mission en Arizona [10]	15
Figure(I.10) : Projet de Ciudad Real [Web2]	16
Figure(I.11) : Montagnes solaires [12]	17
Figure(I.12) : Cheminée solaire flottante [13]	17
Figure (I.13) : Schéma de la tour solaire simplifié pour les équations d'énergie [14]	19
Figure(I.14) : Bilan énergétique au niveau de vitrage [16]	20
Figure(I.15) : Bilan énergétique au niveau du flux d'air [18]	22
Figure(I.16) : Bilan énergétique au niveau de l'absorbeur (sol) [17]	23

Chapitre II :

Figure (II.1) : Composition de la cheminée solaire	27
Figure (II.2) : Le collecteur	28
Figure (II.3) : Le tour de la cheminée	28
Figure (II.4a) : Le premier système d'acquisition des températures	29
Figure (II.5.a) : Le capteur de température sur le collecteur	32
Figure (II.5.c) : Le système de mesure de température le long du rayon R du collecteur	32

Chapitre 3

Figure (III.1) : L'évolution des radiations solaires en fonction du temps.	38
Figure (III.2) : L'évolution de la température ambiante en fonction du temps.	38
Figure (III.3) : Evolution des températures en fonction du temps (T_f , T_{sol} et T_c) pour ($R=124$ m).....	41
Figure (III.4) : Evolution de la température T_f en fonction du temps pour différents diamètres.. ..	41
Figure (III.5) : Evolution de la température T_{sol} en fonction du temps pour différents diamètres ..	42
Figure (III.6) : Evolution de la température T_c en fonction du temps pour différents diamètre.. ..	42
Figure(III.7) : Evolution de la température T_f en fonction de rayon R pour ($G=970$ W/m ²) ..	43
Figure (III.8) : l'évolution de température T_{sol} en fonction de rayon pour ($G=970$ W/m ²) ..	44
Figure (III.9) : l'évolution de température T_c en fonction de rayon pour ($G=970$ W/m ²).....	44
Figure(III.10) : Variation des températures T_c , T_{sol} et T_{f0} en fonction de temps	45
Figure (III.11) : L'évolution de température T_c et de T_a	46
Figure (III.12) : L'évolution de température T_{sol} en fonction de T_a	46

Liste des tableaux

Chapitre II :

Tableau (II.1) : Les propriétés thermo-physiques de l'air30

Chapitre III :

Tableau (III.1) : Comparaison des résultats du modèle 1 avec les résultats expérimentaux39

Tableau (III.2) : Comparaison des résultats du modèle 2 avec les résultats expérimentaux39

Tableau (III.3) : Comparaison des résultats du modèle 3 avec les résultats expérimentaux40

Nomenclature

α_1 : Absorptivité de vitrage

A_c : la surface de collecteur (m^2)

I : L'irradiation solaire (w/m^2)

$h_{r\ c-sol}$: Le coefficient de transfert radiatif entre le sol et le vitre ($w /m^2\text{°C}$)

h_v : Le coefficient de transfert de vent ($w /m^2. \text{°C}$)

$h_{r\ ciel}$: Le coefficient de transfert radiatif de ciel ($w /m^2. \text{°C}$)

h_c : hauteur de collecteur (m)

T_c : température de collecteur (°C)

T_{ciel} : La température de ciel (°C)

T_f : température de fluide (air) (°C)

T_{sol} : La température de l'absorbeur (sol) (°C)

T_a : température de l'ambiance (°C)

U_b : coefficient de perte totale au niveau de l'absorbeur ($w/m^2.\text{°C}$)

T_b : Température dégagée par le sol

α_2 : Absorptivité de sol

h : Le coefficient de transfert convectif entre le sol et le fluide ($w /m^2.\text{°C}$)

$h_{r\ c-sol}$: Le coefficient de transfert radiatif entre le sol et le vitre ($w /m^2. \text{°C}$)

ρ : la masse volumique de l'air ($\frac{kg}{m^3}$)

μ : la viscosité dynamique de l'air

g : la gravité ($\frac{m}{s^2}$)

C_p : la capacité thermique de l'air ($\frac{w}{m^2k^2}$)

K : la conductivité thermique de l'air

T_{mc} : la température moyenne entre la température du collecteur (T_c) et la température de l'air(T_f)

Nomenclature

Vin : la vitesse d'entrée de l'air dans le collecteur

Ra : le nombre de Rayleigh

Nu : Le nombre de Nusselt

Résumé :

Réalisation des expériences sur un prototype de cheminée solaire et La modélisation de la cheminée solaire et détermination des températures du collecteur(T_c), du fluide (T_f) et celle du sol (T_{sol}) par simulation numérique.

Mots clés:

Cheminée solaire, modélisation, Simulation numérique.

ملخص:

إنجاز تجارب على نموذج للمدخنة الشمسية ونمذجته. بالإضافة إلى استخلاص الدرجة الحرارية لكل من مجمع الحرارة الخاص بالمدخنة والهواء المستقبل من طرفها ودرجة حرارة الطبقة القاعدية للمدخنة عن طريق محاكاة رقمية.

الكلمات الأساسية :

المدخنة الشمسية ، النمذجة والمحاكاة الرقمية

Abstract:

Realization of the experiments on a prototype of solar chimney and the modeling of the solar chimney and determination of the temperatures of the collector (T_c), the fluid (T_f) and that of the ground (T_{sol}) by numerical simulation.

Key words : Solar chimney, modeling, numerical simulation.

Introduction générale

Introduction générale :

Les problèmes de pollution, la demande croissance d'énergie électrique suite à l'amélioration du mode de vie et l'épuisement des énergies fossiles sont les majeurs facteurs d'orientation vers les énergies renouvelables. Dans le cadre de sa stratégie énergétique, l'Algérie accorde une priorité au développement des énergies renouvelables et au développement durable. Cette stratégie repose sur l'accélération du développement de l'énergie solaire. Une de ces applications est la production de l'électricité.

La cheminée solaire est un dispositif solaire conçu pour transformer l'énergie des Rayons solaires à une énergie cinétique et cette dernière est transformée en ensuite en énergie électrique.

Ce dispositif solaire est l'une de ces études qui intéressent plusieurs pays. Dans L'Australie par exemple une grande cheminée solaire a été construite en 2005, elle produit à partir de l'énergie solaire une puissance électrique de 200 MW et alimente une ville de 200 000 habitants. Donc, la cheminée solaire est déjà mise en application et a montré un succès dans le domaine du développement d'exploitation des énergies renouvelables. Mais toujours l'augmentation de l'efficacité de production de la cheminée solaire fait l'objet de plusieurs études, et parmi les paramètres affectant l'efficacité de la cheminée solaire sont les dimensions, à savoir : la hauteur et le diamètre de cheminée, le rayon de collecteur et la hauteur de toit de collecteur. L'étude de l'effet de ces paramètres sur la production électrique de cheminée solaire sera déjà un intérêt sur l'amélioration de la conception de cet équipement pour une production plus de l'énergie.

Le présent mémoire de fin d'étude porte sur la modélisation d'une cheminée solaire par un modèle mathématique pour déterminer la température du sol, celle du collecteur et celle du fluide. D'autre part, sur la réalisation des essais sur un prototype d'une cheminée solaire dans la région de M'sila. Notre mémoire de fin d'étude se compose de trois chapitres répartis comme suit :

Le Premier chapitre présente un état de l'art sur les cheminées solaires. Il se divise en deux parties ; la première partie est consacrée aux notions générales sur la cheminée solaire et la deuxième partie à l'étude thermique d'une cheminée solaire.

Le deuxième chapitre présente une description d'un prototype d'une cheminée solaire qui a été réalisée dans le cadre d'un projet de thèse de doctorat en cours, ainsi que son principe de fonctionnement et les critères de l'étude expérimentale.

Le troisième chapitre est réservé aux résultats et à la discussion, il est divisé en deux parties, la première traite la modélisation d'une cheminée solaire et la deuxième partie est réservée aux résultats des expériences effectuées sur la cheminée réalisée.

Enfin, une conclusion générale vient terminer ce mémoire.

Chapitre I

Etat de l'art sur les cheminées solaires

Partie 1 : Notions générales sur la cheminée solaire :

I.1. Description d'une cheminée solaire

Une cheminée solaire (CS) est appelée également **tour solaire**, **cheminée thermique** ou **cheminée provençale**, elle se présente comme un moyen de production d'électricité à partir de l'énergie solaire, en exploitant le mouvement de l'air par convection. L'énergie cinétique de l'air est ensuite prélevée par un système de turbines et de générateurs. Cette simplicité confère des avantages majeurs en termes de coûts de construction, de maintenance, de robustesse, de durée de vie et d'accessibilité aux pays en voie de développement [1].

La cheminée solaire a été utilisée depuis des siècles, particulièrement dans le Moyen-Orient et le Proche-Orient par les Perses, mais également en Europe durant l'Antiquité par les Romains [2].

I.2. Principaux éléments de la cheminée solaire :

Une cheminée solaire est constituée de trois éléments principaux, à savoir le capteur solaire ou le collecteur, la tour et la turbine.

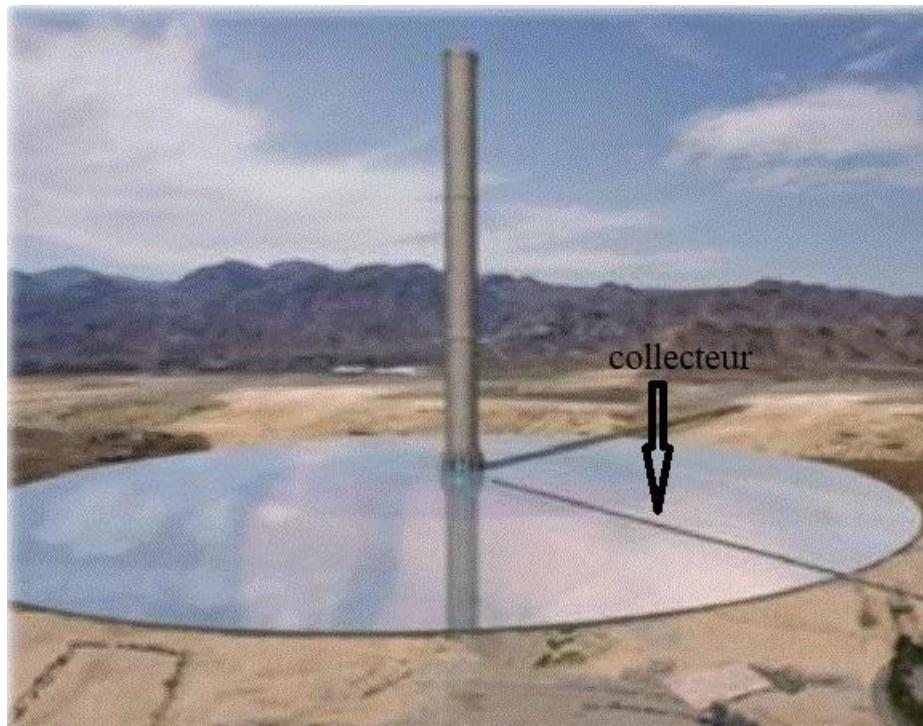
I.2.1 Le collecteur :

Le collecteur présente la partie chargée de chauffer l'air entrant dans la turbine grâce à l'effet de serre. Il comporte plusieurs plaques en verre (ou en plastique) soutenues par des tiges très résistantes. La hauteur du collecteur varie entre 2 et 6 m au-dessus de la terre et sa surface peut s'étaler sur plusieurs kilomètres. La surface du collecteur admet la composante du rayonnement solaire à ondes courtes et conserve le rayonnement à ondes longues du sol. Ainsi, le sol sous le toit chauffe et transfère sa chaleur à l'air s'écoulant radialement depuis l'extérieur vers la cheminée.

Le collecteur est ouvert à la périphérie pour permettre l'introduction de l'air frais. Le toit du collecteur (qui est supporté 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 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. [3].

Comme le poids du verre augmente la masse du toit, les collecteurs doivent avoir une structure avec des tiges assez résistantes et attachées comme sur la Figure (I.1.b)



Figure(I.1.a) : collecteur de cheminée solaire [1]

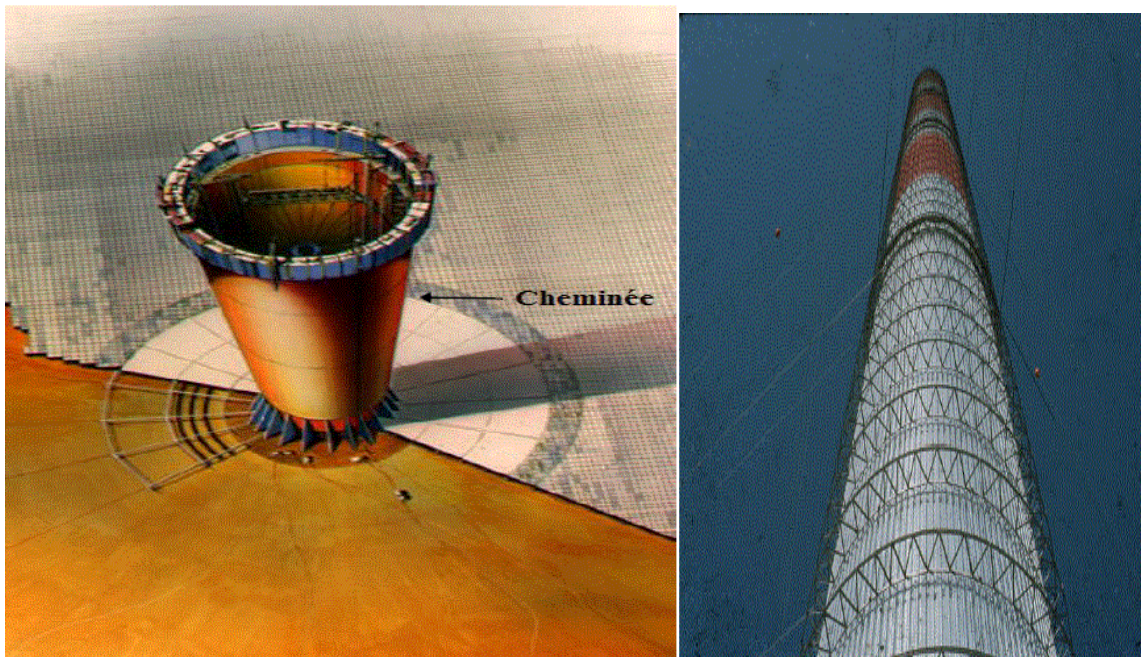


Figure(I.1.b) : Verrière du collecteur d'une cheminée solaire [Web1]

I.2.2. La cheminée :

La cheminée appelé également tube de cheminée ou tube de tour est un élément clé de la cheminée solaire, elle agit comme grande cheminée comme illustré sur la (Figure I.2) Son but est de créer une différence de pression pour assurer un écoulement de l'air.

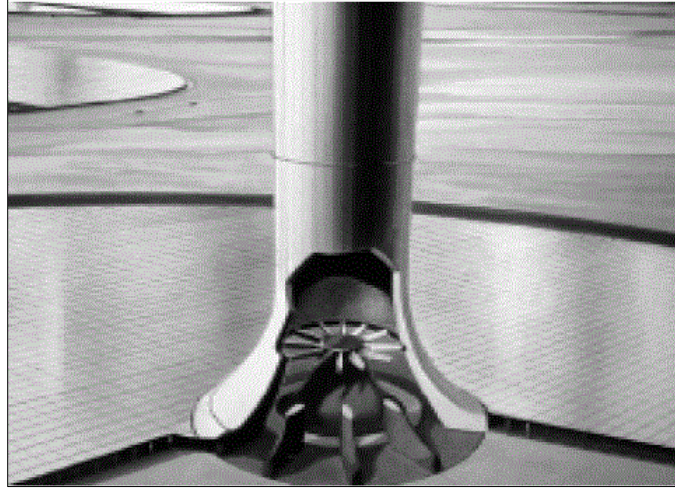
La quantité d'énergie produite par la tour solaire est importante si la hauteur de la cheminée est importante et donc l'efficacité de la cheminée dépend de la différence de température avec l'air extérieur en haut de la cheminée. Donc l'efficacité est directement proportionnelle au ratio entre la hauteur de la cheminée et la température extérieure.



Figure(I.2) : Image d'une tour d'une cheminée solaire [2]

I.2.3. La turbine :

Les turbines sont placées sur le trajet du flux d'air en bas de la cheminée (base de la tour), convertissant l'énergie cinétique de l'air chaud en énergie mécanique, puis le générateur entraîné par la turbine transforme l'énergie mécanique en énergie électrique. Le nombre de turbines utilisées varie entre une turbine qui occupe la coupe transversale de la tour comme noté sur la (Figure I.3a), ou bien de petites turbines distribuées sur toute la section de la tour comme représenté sur la (Figure I.3b.)



Figure(I.3.a) : la disposition d'une turbine dans une cheminée solaire [3]

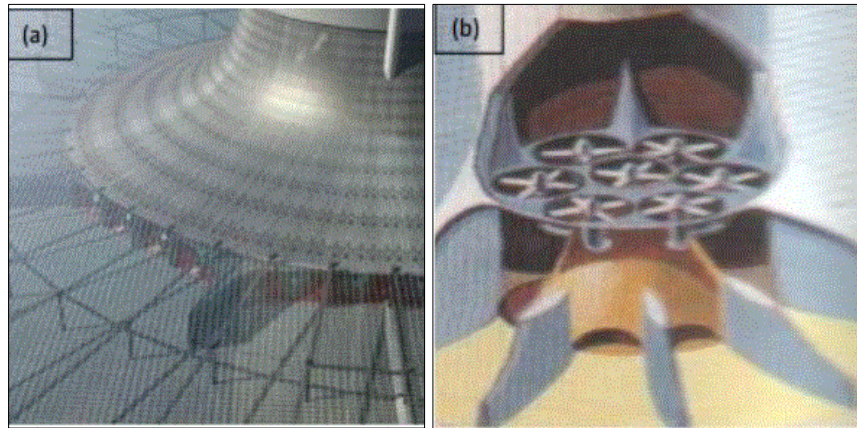


Figure (I.3.b) : (a) Turbines verticales, (b) Petites turbines horizontales [3]

I.3. Principe de fonctionnement d'un tour solaire :

Le principe de fonctionnement d'une cheminée solaire repose sur l'utilisation de la force d'un courant d'air ascendant pour la production d'une puissance. L'air chauffé par effet de serre dans un collecteur exposé au soleil est accéléré et amené vers le milieu du collecteur, il monte dans la cheminée verticale érigée au centre de collecteur en passant par des turbines éoliennes. Durant ce passage, l'énergie de l'écoulement est transformée en énergie mécanique qui actionne des générateurs pour la production de l'électricité.

Ce principe de fonctionnement présente une technologie simple, fiable et accessible au pays en voie de développement, qui sont ensoleillées et qui ont souvent des ressources en matières premières limitées [4].

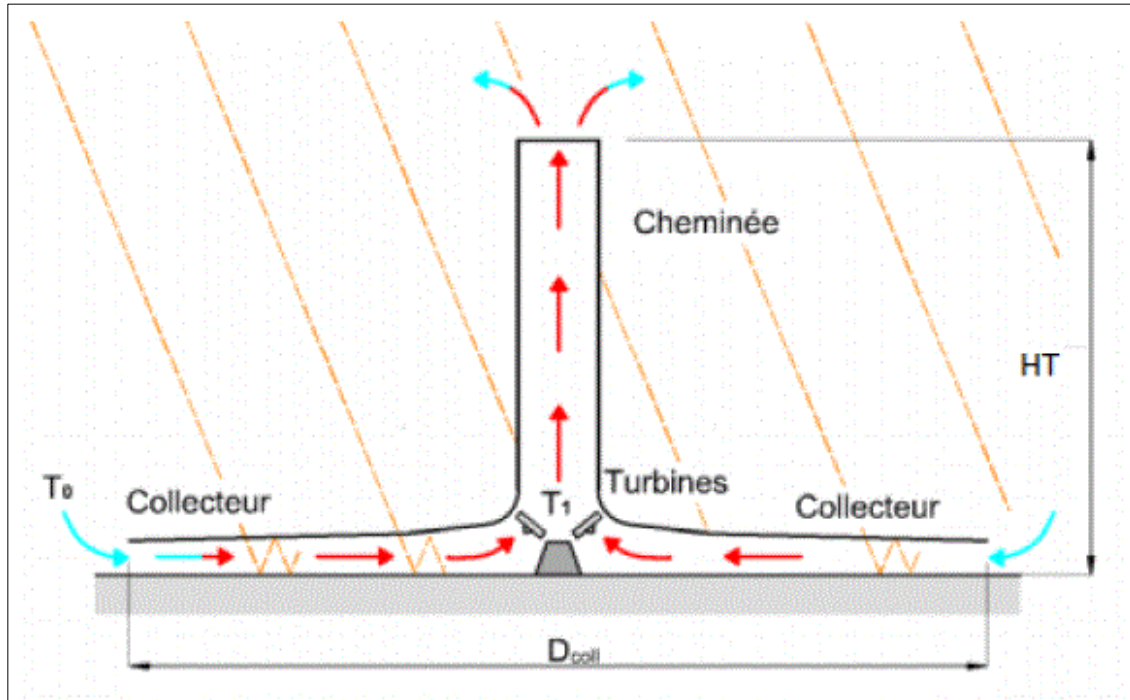


Figure (I.4) : principe de fonctionnement d'une cheminée solaire [4]

I.4. Les méthodes de stockage de l'énergie dans une cheminée solaire :

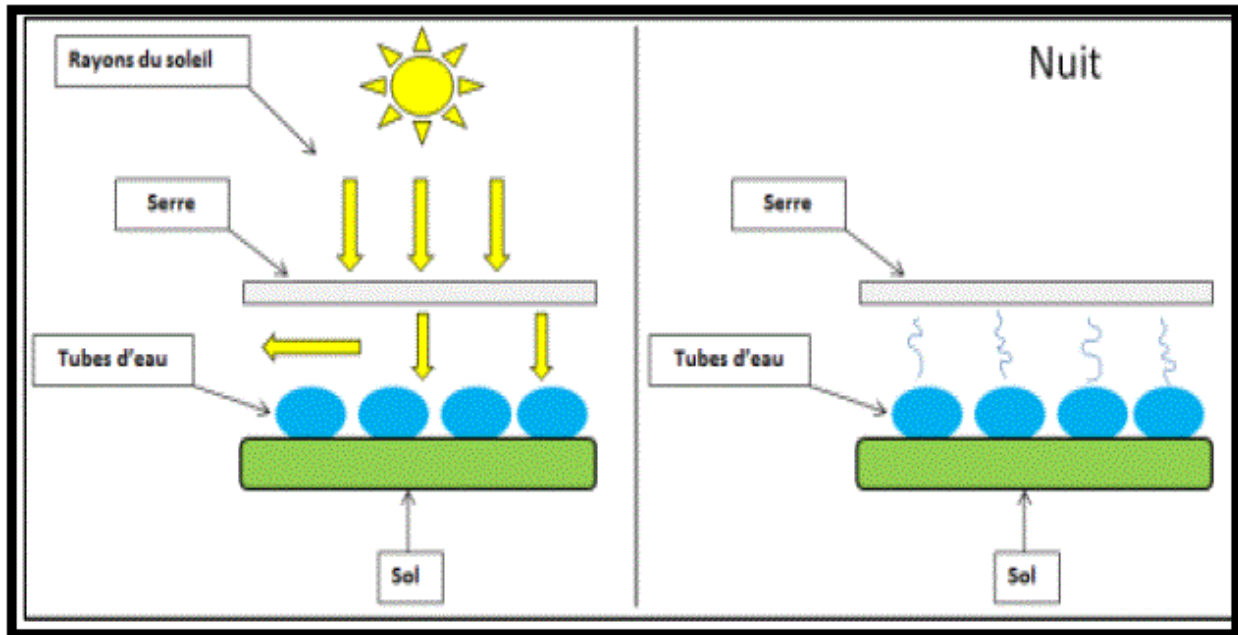
On distingue trois méthodes de stockage d'énergie produite par une cheminée solaire durant la nuit :

I.4.1. Par chauffage de sable

Le sable chauffe et absorbe la chaleur du soleil, le flux d'air chaud transmis à la cheminée assure la production d'électricité en faisant tourner la turbine à l'intérieur de la tour. Le sable est chauffé par le soleil pendant la journée et de l'énergie est stockée, puis la chaleur est libérée pendant la nuit et continue à faire fonctionner la turbine. Ceci permet au système de fonctionner en hiver même quand il y a un minimum de soleil. De cette façon, le système peut fonctionner 24h autour de l'horloge, 365 jours d'une année [5].

I.4.2. Par chauffage d'eau

Comme les collecteurs produisent de l'air chaud par effet de serre, pour produire de l'électricité durant la nuit, des réservoirs noirs tubulaires remplis d'eau sont placés sous la Serre comme montré dans la (Figure.I.5).



Figure(I.5) : principe de la stockage de la chaleur dans le collecteur par des tubes remplis d'eau [5].

Les poches à eau accumulent de la chaleur le jour et la restituent à l'air la nuit. Ces tubes sont remplis une seule fois pour toutes, il ne faut plus d'eau ensuite puisque les Tubes sont hermétiquement clos après le remplissage. Le volume d'eau dans les tubes est Calculé pour correspondre à une hauteur d'eau de 5 à 20 cm en fonction de la puissance désirée de production nocturne, l'énergie stockée pour la nuit diminuant la production de la journée. Un ajustement de la production peut être effectué aux heures de pointe où l'électricité se vend 3 à 10 fois plus cher qu'aux heures creuses, améliorant ainsi la rentabilité [6].

I.4.3. Par chauffage de galets

Afin d'optimiser cette production nocturne, nous pouvons placer sous la serre des galets qui ont un pouvoir de stockage de chaleur très important comme noté sur la Figure (I.6). En effet, durant la journée, ces galets sont exposés constamment aux rayons du soleil et donc emmagasinent cette chaleur afin de la récupérer durant la nuit [5].

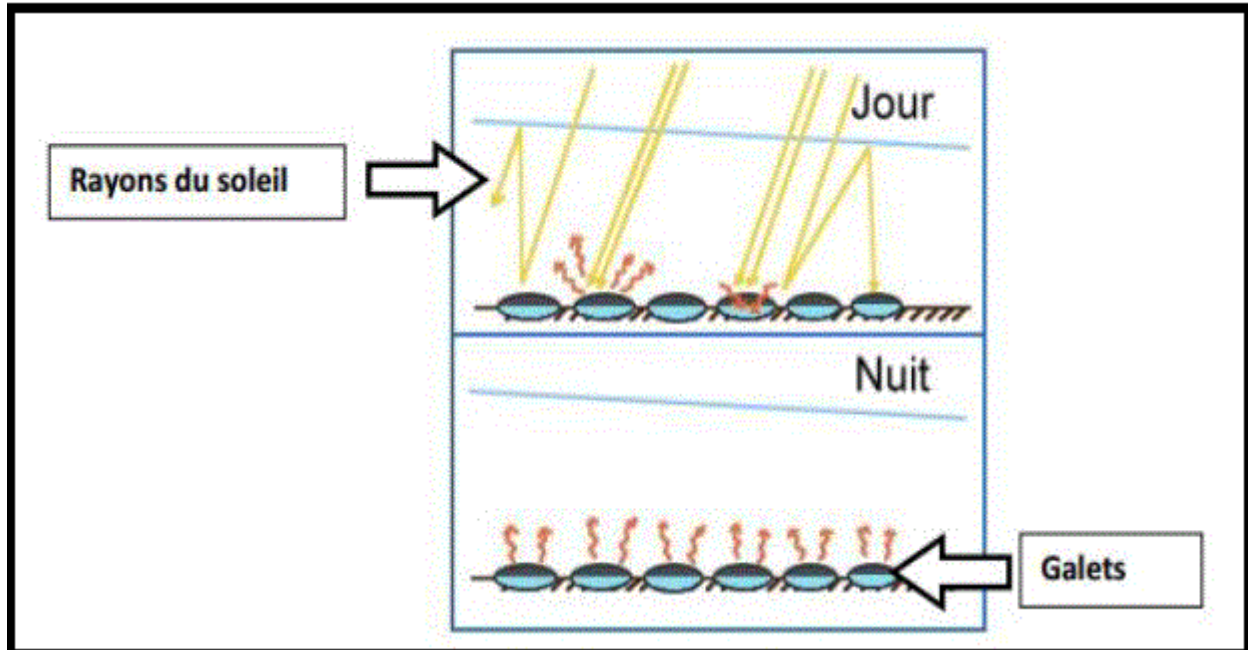


Figure (I.6) : principe du stockage de chaleur le jour sous la serre utilisant des galets [5].

I.5. Avantages et inconvénients de la cheminée solaire

I.5.1. Les avantages : [7]

- Utilise la radiation solaire direct et diffus, donc peut fonctionner dans les conditions nuageuses.
- Délivre de l'énergie jour et nuit, car c'est la différence entre la température de l'air à l'intérieur de la serre et l'air ambiant qui conditionne le fonctionnement, or la nuit l'air qui circule dans la serre est encore réchauffée grâce à l'inertie thermique du sol.
- Sera préférentiellement construite en zone désertique, où les matériaux principaux de construction (verre et béton) pourraient être élaborés à partir du sable présent sur place.
- La durée de vie prévue est de 80 années, avec un entretien quasi nul (remplacement des roulements des turbines)
- Ne nécessite pas d'eau (et au contraire, on récupérera grâce aux effets de convection rosés sur la serre).

- aucun carburant n'est nécessaire.
- Ne présente aucun risque de pollution pour l'environnement en cas de dysfonctionnement et lors du démantèlement.
- L'empreinte écologique de construction est modérée, et la tour ne génère aucun polluant pendant son fonctionnement
- Exploitation pour l'agriculture.

I.5.2. Les inconvénients [7]

- ❖ Quelques estimations disent que les coûts d'investissement pour la production d'électricité à partir de Cheminées Solaires est 5 fois plus important que celui à partir d'une turbine à Gaz.
- ❖ Bien qu'aucun carburant fossile ne soit nécessaire les investissements nécessaires pour une Tour Solaire sont importants.
- ❖ La structure elle-même est massive et requiert beaucoup d'expertise en ingénierie et de matériaux pour sa construction.
- ❖ Le collecteur occupe une immense surface.
- ❖ La production n'est pas constante pendant le jour ou l'année.

I.6 Quelques projets de centrales solaires à cheminée [8]

I.6.1. Prototype de Manzanares

La première tour solaire de Manzanares a été construite en 1982 à Manzanares à environ 150 km au sud de Madrid, ce prototype (Figure I.7). est inventé par l'ingénieur allemand Jörg Schlaich, avec des fonds fournis par le ministère allemand de la Recherche et de la Technologie. C'est une installation expérimentale d'une puissance de pointe de 50 kW sur site. Son but visait à vérifier, par des mesures sur le terrain, la performance projetée à partir des calculs basés sur la théorie et d'examiner l'influence de composants individuels sur la production, ces résultats montrent que les composants sont fiables, le prototype a fonctionné pendant 7 ans.

Les spécifications du projet de Manzanares:

- ❖ Puissance maximum 50 kW
- ❖ Hauteur de la cheminée en acier 195 m

- ❖ Diamètre de la cheminée 5 m
- ❖ Surface de la serre 6.000 m² de couverture en verre et 40.000 m² de couverture transparente en plastique.



Figure(I.7) : Tour solaire implantée à Manzanares [8]

I.6.2. Le projet de Borunga :

Un autre projet de tour solaire noté sur la (Figure I.8), conçu en 2011 en Australie par la société « Enviromission ». Il s'agit d'un des projets les plus ambitieux de la planète pour la production d'énergie renouvelable sûre et propre. Cette centrale fournirait 200 MW de puissance électrique, qui approvisionne en électricité environ 200000 logements

Le coût d'investissement est 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 couté 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. [10]



Figure (I.8) : Projet de Buronga en Australie [10]

Les Spécifications de ce projet :

- ❖ Une cheminée de 990 m de haut (3281 pieds) matériaux composite
- ❖ Un collecteur de 7 km de diamètre, soit 38,5 km² 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.

I.6.3. La centrale solaire à cheminée de Chine.

Une cheminée solaire de 27.5MW sera construite en chine (à Jinshawan, Wuhai, Mongolie). Ce projet est financé par une entreprise locale en Mongolie intérieure avec 1,38 milliards de yuans (208 millions de dollars). La capacité totale planifiée jusqu'en décembre 2013 par ce projet est de 27.5MW, représentant un totale 2.780.000 m² de désert occupé par des serres servent de collecteur et un investissement total de 1,38 milliards de yuans.

La construction du prototype chinois a été réalisée en trois phases, la première phase du projet a été réalisée entre mai 2009 et Décembre 2010 pour construire un prototype de cheminée solaire de 200 kW occupe 40.000 m² du désert et une tour de 53 mètres d'hauteur et 18m de diamètre, ce qui représente une dépense de 1 million de yuans, la deuxième phase du projet a commencé en Février 2011 jusqu'à Décembre 2011 pour achever la construction d'une centrale cheminée solaire électrique sur la base de 2,2 MW. Cette démonstration du système occupera 220 000 m²

de désert et l'investissement prévu est de 110 millions de yuans ; la troisième phase du projet était réalisée entre janvier 2012 et décembre 2013, pour permettre la construction d'une centrale solaire de puissance de 25,1 MW, avec un collecteur à effet de serre occupant une région désertique de 2,51 millions de m², l'investissement est de 1,26 milliards de yuans [9].

I.6.4. La centrale solaire à cheminée d'Arizona :

Le désert de l'Arizona reçoit en permanence un rayonnement solaire abondant maintenant la température de l'air à 40°C. L'idée est donc de créer un effet de serre à la base d'une tour, de sorte que la température au niveau du sol puisse être augmentée jusqu'à 80 ou 90 degrés. L'air chaud ainsi créé s'engouffre dans la tour et se dirige de bas en haut. Des turbines intégrées au dispositif bénéficient ensuite de l'énergie cinétique de l'air chaud pour fonctionner et produire de l'électricité [10]

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 comme noté sur la (Figure I.9). [10] 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. La Southern California Public Power Authority a déjà accepté d'acheter de l'électricité produite par la tour d'EnviroMission pendant les 30 prochaines années. L'avantage majeur d'après les concepteurs repose sur une génération d'énergie en continu pendant 80 ans, sans avoir pratiquement besoin d'entretien [10]



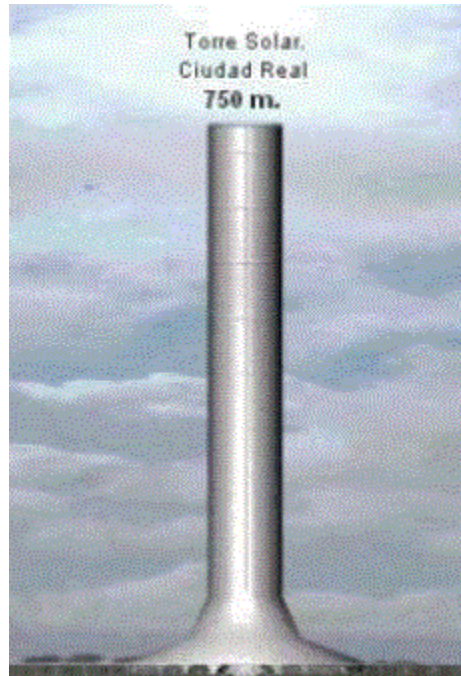
Figure(I.9) : la centrale d'Enviro- Mission en Arizona [10]

I.6.5. Projet Espagnol, Ciudad Real :

La tour, la plus haute en Europe, s'élancera dans la localité de Fuente el Fresno au centre d'un collecteur solaire en verre. Elle fournira l'équivalent en énergie de 140 000 barils de pétrole et évitera l'émission dans l'atmosphère de 78 000 tonnes de dioxyde de carbone. Réalisée en collaboration avec la compagnie allemande Schlaich Bergermann, par les sociétés espagnoles IMASA et CAMPO3 [11].

Les dimensions principales et les données techniques du projet Espagnol sont les suivantes [11] :

- Une cheminée de 750 m de hauteur.
- 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 atteignant 12 m/s (43 km/h).
- Puissance de l'installation 40 mégawatts, soit la demande en électricité d'environ 120 000 personnes.
- Coût du projet est d'environ 240 millions d'euros.
- En complément de la production en électricité, le projet permettrait également l'installation d'équipement de télécommunication et de surveillance contre les incendies, et devrait revêtir un aspect touristique en prévoyant un accès au public.



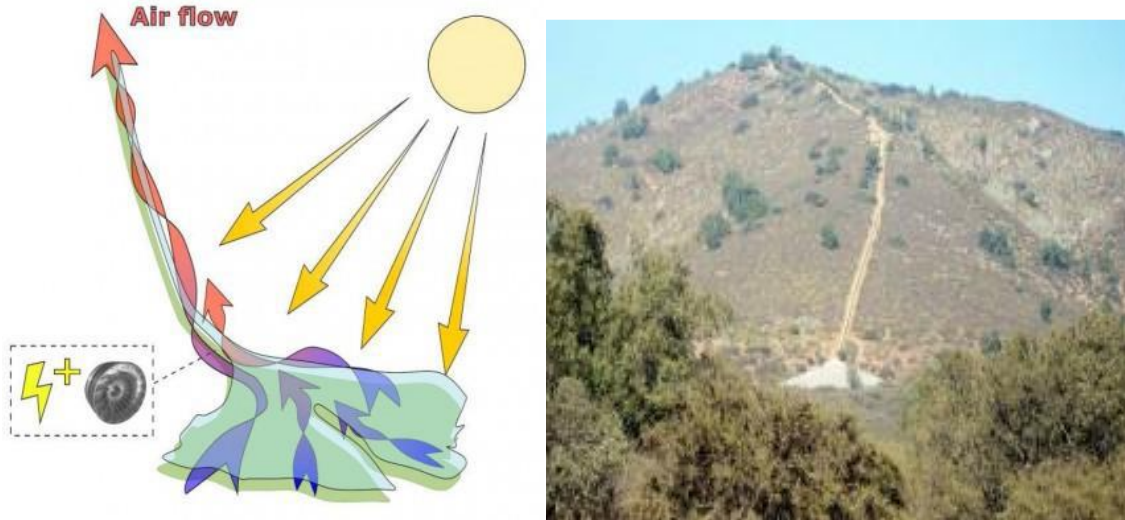
Figure(I.10) : Projet de Ciudad Real [Web2]

I.6.6. Montagnes solaires : du français raphaël menard -groupe OTH : [12]

Le projet ELIOTH est un système de tour solaire inclinée épousant la forme des montagnes permettant son intégration dans le paysage naturel comme noté sur la (Figure I.11.) La surface du globe fournit des appuis naturels grâce au relief, dès lors, monter à 1000 ou 3000 mètres d'altitude ne représente plus un exploit technique majeur, dans la mesure où le conduit de la cheminée épouse le relief et prend appui régulièrement sur le sol.

La société Elioth vise les 500 MW. C'est à dire l'équivalent d'une centrale nucléaire, pour un coût de construction pouvant être inférieur à 1€ par watt installé. Ce projet vise à utiliser les dénivellations naturelles des montagnes pour canaliser la chaleur du soleil en centrale de production d'électricité écologique. [12]

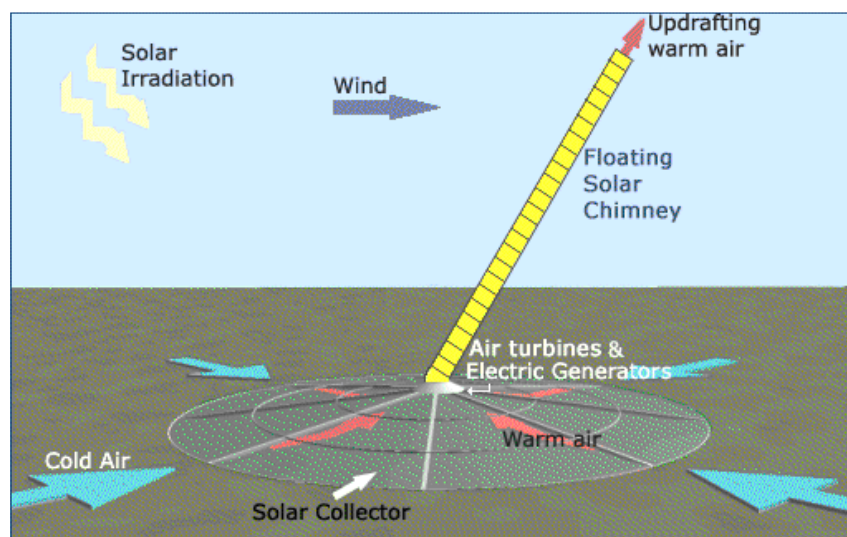
L'innovation du projet Elioth est aussi sa modestie, car le jour où l'humanité disposera d'une source d'énergie efficace et propre, les montagnes solaires seront démontées très facilement, ne généreront pas de cicatrices sur le paysage grâce à leur mode constructif et se recycleront très facilement. [12]



Figure(I.11) : Montagnes solaires [12]

I.6.7. Cheminées solaires flottantes du grec Christos Papageorgiou : [13]

Le projet de tour solaire flottante de cet inventeur Grec est illustré sur la (Figure I.12), il s'agit d'une structure souple et flexible fixée au sol dans un désert sec. L'idée est de diminuer le coût de construction d'une tour solaire classique, à l'aide d'une structure plus légère que l'air, gonflée par exemple à l'hélium. Une partie fixe et lourde au sol permet son inclinaison, la partie montante et légère étant constituée de boudins gonflés. [13]



Figure(I.12) : Cheminée solaire flottante [13]

Partie 2 : Etude thermique d'une cheminée solaire

I.7 Analyse mathématique :

L'analyse de la cheminée solaire dépend essentiellement des conditions opératoires qui regroupent : l'ensoleillement, de la température ambiante et la vitesse du vent et de la configuration de la tour solaire qui regroupe les dimensions de la cheminée et le collecteur (la hauteur de cheminée H et le rayon de collecteur R , et la hauteur de collecteur h , et le diamètre de cheminée D). Ces paramètres influencent sur la puissance et les performances de la cheminée solaire.

Le modèle mathématique de la cheminée solaire a été développé en respectant les hypothèses suivantes : [14]

- La performance de la centrale est analysée au débit de l'état d'équilibre [15], parce que le Rayonnement solaire est de nature transitoire.
- L'écoulement de l'air est unidimensionnel vers le centre du collecteur ;
- L'air est considéré comme un gaz parfait et l'écoulement est incompressible dans la cheminée depuis le nombre de Mach est inférieure à 0,3 [16] ;
- La chaleur rayonnée vers la cheminée est ignorée étant donné que la zone de surface du Collecteur est beaucoup plus grand que la surface de la cheminée. Par conséquent, l'équation de transfert de chaleur est considérée pour le collecteur [16]
- Le flux d'air dans le système est dû à la force de flottabilité dans la cheminée solaire [17]
- L'écoulement dans le collecteur est considéré comme un écoulement entre deux plaques parallèles [18] en régime permanent.

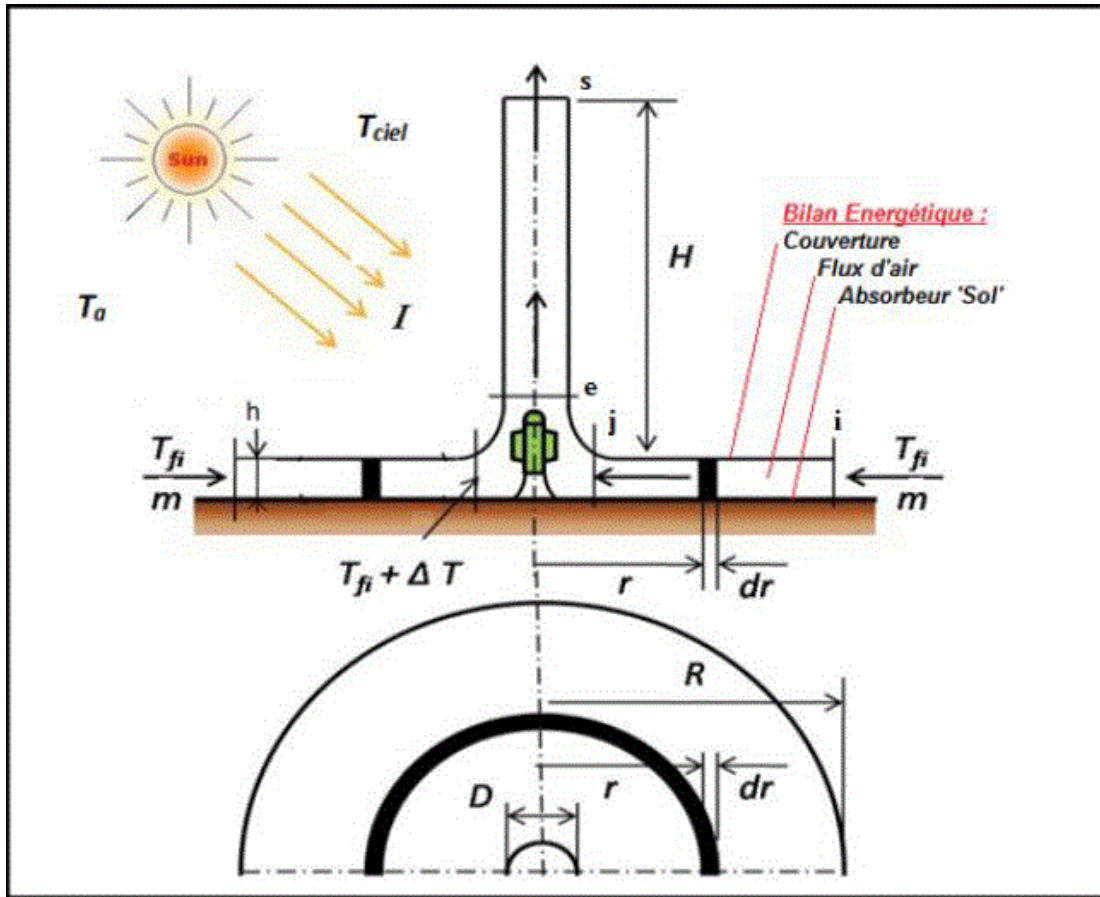


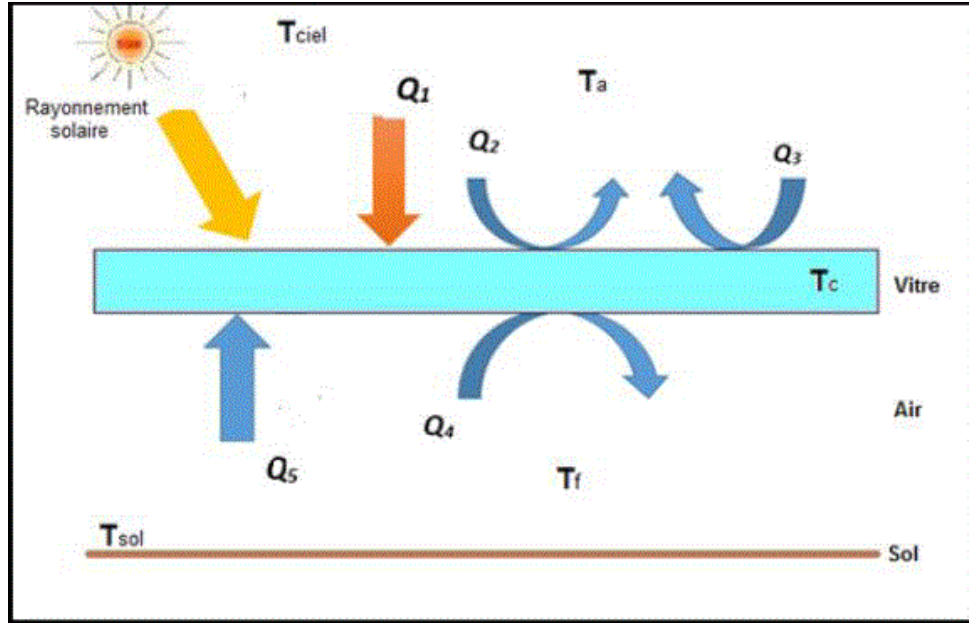
Figure (I.13) : Schéma de la tour solaire simplifiée pour les équations d'énergie [14]

I.8. Les bilans énergétiques :

En effectuant un bilan énergétique dans les trois parties de la cheminée solaire, la couverture en verre, le flux d'air et l'absorbeur, on obtient les équations qui gouvernent l'écoulement de l'air dans la cheminée solaire.

I.8.1. bilan énergétique au niveau de vitrage :

Le vitrage absorbe la chaleur provenant du rayonnement solaire et de l'absorbeur. Cette chaleur est perdue par convection avec l'air dans la cheminée et l'air ambiant et par rayonnement vers le ciel comme illustré sur la (Figure I.14)



Figure(I.14) : Bilan énergétique au niveau de vitrage [16]

Le rayonnement solaire incident + le rayonnement réfléchi par l'absorbeur = chaleur perdue par Convection de vitrage vers l'air de la cheminée + pertes thermiques de vitrage vers l'extérieur

$$Q_1 = Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5$$

$$\alpha_1 A_c I + A_c h_{r\ c-sol} (T_{sol} - T_c) = A_c h_v (T_c - T_a) + A_c h_{r\ ciel} (T_c - T_{ciel}) + A_c h_{cf} (T_c - T_f) \quad (I.1)$$

Avec

α_1 : Absorptivité de vitrage

A_c : la surface de collecteur (m^2)

I : L'irradiation solaire (w/m^2)

$h_{r\ c-sol}$: Le coefficient de transfert radiatif entre le sol et le vitre ($w / m^2 \cdot ^\circ C$)

h_v : Le coefficient de transfert de vent ($w / m^2 \cdot ^\circ C$)

$h_{r\ ciel}$: Le coefficient de transfert radiatif de ciel ($w / m^2 \cdot ^\circ C$)

h_c : hauteur de collecteur (m)

T_c : température de collecteur ($^\circ C$)

T_{ciel} : La température de ciel ($^\circ C$)

T_f : température de fluide (air) (°C)

T_{sol} : La température de l'absorbeur (sol) (°C)

T_a : température de l'ambiance (°C)

Simplification de surface A_c :

$$\alpha I + hr_{c-sol} (T_{sol} - T_c) = hv (T_c - T_a) + hr_{ciel} (T_c - T_{ciel}) + h_{cf} (T_c - T_f) \quad (I.1a)$$

$$\alpha I = hv T_c - hv T_a + hr_{ciel} T_c - hr_{ciel} T_{ciel} + h_{cf} T_c - h_{cf} T_f + hr_{c-sol} T_c - hr_{c-sol} T_{sol} \quad (I.1b)$$

$$\alpha I + hv T_a + hr_{ciel} T_{ciel} + h_{cf} T_f + hr_{c-sol} T_{sol} = hv T_c + hr_{ciel} T_c + h_{cf} T_c + hr_{c-sol} T_c \quad (I.1c)$$

On suppose que :

$$CI = hv + hr_{c-ciel} + hr_{c-sol} + h_{cf} \quad (I.1d)$$

L'équation (I.1.c) prend la forme suivante :

$$CI T_c - h_{cf} T_f - hr_{c-sol} T_{sol} = \alpha I + hv T_a + hr_{ciel} T_{ciel} \quad (I.2)$$

I.8.2 bilan énergétique au niveau de flux d'air :

L'air dans le collecteur reçoit des flux convectifs de la part de l'absorbeur (sol) et du vite comme noté sur la (Figure I.15). Ce qui se traduit par le bilan suivant :

$$Q_6 = Q_4 + Q_7 \quad (I.2a)$$

$$m C_p d T_f = h_{cf} A_c (T_c - T_f) - h_{sol-f} A_c (T_f - T_{sol}) \quad (I.2b)$$

$$m C_p * 2 (T_f - T_a) = h_{cf} A_c (T_c - T_f) - h_{sol-f} A_c (T_f - T_{sol}) \quad (I.2c)$$

On pose : $C_2 = \frac{h_{cf}}{m c_p} A_c$, $C_3 = \frac{h_{sol-f}}{m c_p} A_c$

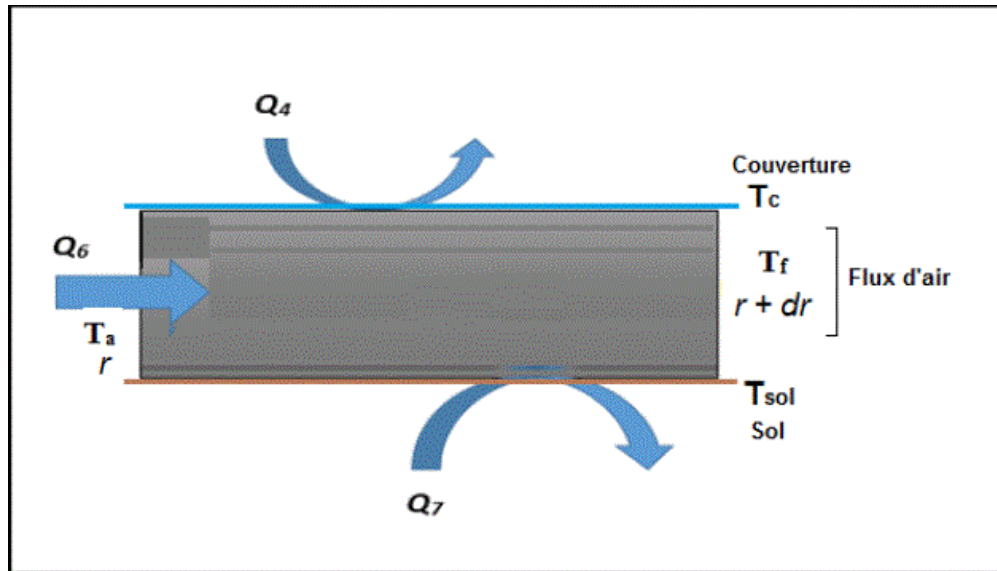
$$2(T_f - T_a) = C_2 (T_c - T_f) - C_3 (T_f - T_{sol})$$

$$-2T_a = -2T_f + C_2 T_c - C_2 T_f - C_3 T_f + C_3 T_{sol}$$

$$-2T_a = (-2 - C_2 - C_3) T_f + C_2 T_c + C_3 T_{sol}$$

On pose : $C_4 = C_2 + C_3$

$$(-2 + C_4) T_f + C_2 T_c + C_3 T_{sol} = -2T_a \dots\dots\dots (I.2)$$



Figure(I.15) : Bilan énergétique au niveau du flux d'air [18]

I.8.3.bilan énergétique au niveau de sol :

L'absorbeur absorbe la totalité du rayonnement qui traverse le vitrage, par contre il va la perdre par rayonnement avec la vitre, et par convection avec l'air qui circule dans le collecteur de la cheminée comme noté sur la (Figure I.16). Ce qui se traduit mathématiquement par :

$$Q_9 = Q_8 + Q_7 + Q_5 \text{ (I.2d)}$$

$$U_b (T_{sol} - T_b) = \tau \alpha_2 I + h_{sol-f} (T_f - T_{sol}) + h_{r c-sol} (T_c - T_{sol}) \text{ (I.2e)}$$

Avec

U_b : coefficient de perte totale au niveau de l'absorbeur (w/m².°C)

T_b : Température dégagée par le sol

α_2 : Absorptivité de sol

h : Le coefficient de transfert convectif entre le sol et le fluide (w /m².°C)

$h_{r c-sol}$: Le coefficient de transfert radiatif entre le sol et le vitre (w /m². °C)

Selon [19], la température T_b est égale à T_a .

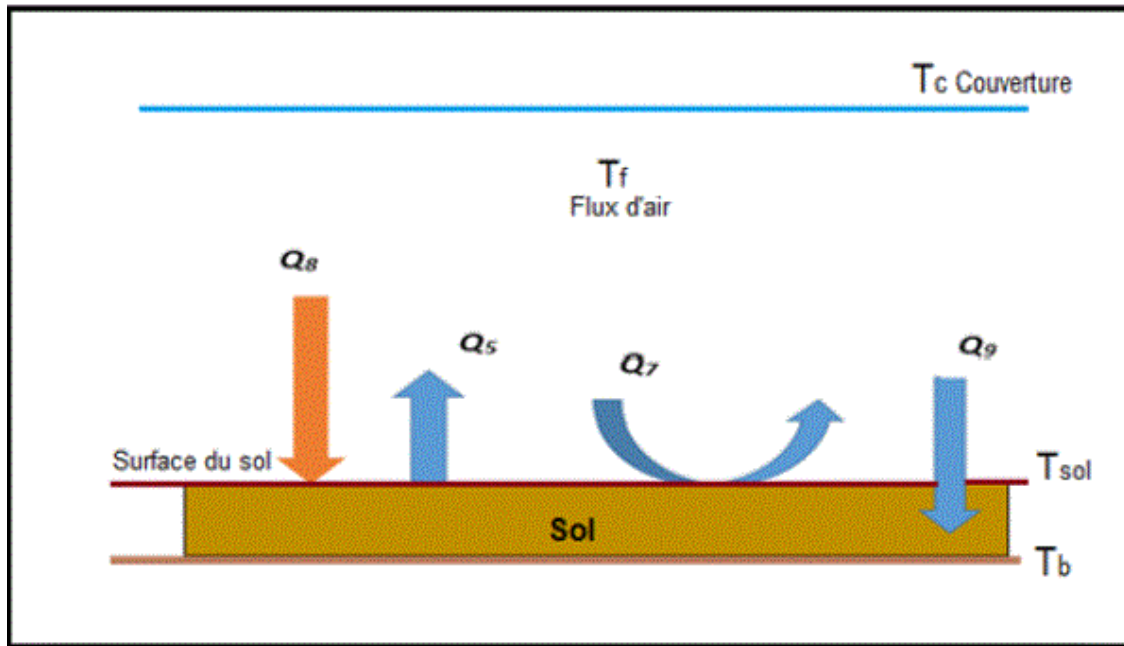
$$U_b T_{sol} - U_b T_{amb} = \tau \alpha_2 I + h_{sol-f} T_f - h_{sol-f} T_{sol} + h_{r c-sol} T_c - h_{r c-sol} T_{sol} \quad (I.2f)$$

$$\tau \alpha_2 I + U_b T_a = (U_b + h_{sol-f} + h_{r c-sol}) T_{sol} - h_{sol-f} T_f - h_{r c-sol} T_c \quad (I.2g)$$

On pose : $C_5 = h_{sol-f} + h_{r c-sol} + U_b \quad (I.2h)$

L'équation précédente prend la forme suivante :

$$\tau \alpha_2 I + U_b T_a = C_5 T_{sol} - h_{sol-f} T_f - h_{r c-sol} T_c \dots \dots \dots (I.3)$$



Figure(I.16) : Bilan énergétique au niveau de l'absorbeur (sol) [17]

Selon les bilans (1) et (2) et (3) on peut former la matrice suivante :

$$\begin{bmatrix} -h_{cf} & -h_{rc-sol} & c_1 \\ (-2 + C_4) & C_3 & C_2 \\ -h_{cf} & c_5 & -h_{rc-sol} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T_f \\ T_{sol} \\ T_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha I + h_{rciel} T_{ciel} + h_{v} T_a \\ -2 T_a \\ \tau \alpha_2 I + U_b \end{bmatrix} \quad \dots(I.4)$$

Alors à travers le système d'équation ci-dessus sous forme matricielle $[A][T] = [B]$ on peut déterminer le vecteur de la température $[T]$ par inversion matricielle de la façon suivante :

$$[T] = [A]^{-1}[B]$$

I.8.4. Corrélation théorique du calculer les coefficients de transfert thermique :

Le coefficient radiatif entre le collecteur et le sol est estimé par la relation suivante :

$$h_{rc-sol} = \frac{\sigma(T_c^2 + T_{sol}^2) \times (T_c + T_{sol})}{\left[\frac{1}{\varepsilon_c} + \frac{1}{\varepsilon_{sol}} - 1\right]} \quad (I.5)$$

La température de ciel est estimée en fonction de la température ambiante suivant l'équation suivante [19] :

$$T_{ciel} = 0,552 \cdot T_a^{0.5} \quad (I.6)$$

Le coefficient de transfert radiatif de ciel [18] :

$$h_{rciel} = \frac{\sigma \varepsilon_c (T_c^2 + T_{sol}^2) (T_c - T_{sol}) (T_c - T_{sol})}{(T_{sol} - T_c)} \quad (I.7)$$

Le coefficient convectif de vent est estimé par la relation suivante [20] :

$$h_v = 5,47 + 3,95 V_{air} \quad (I.8)$$

Le coefficient de transfert thermique convectif entre le collecteur et le débit de l'air (hcf) et entre débit de l'air et le sol (hsol-f) sont considérés égaux, on peut les calculer d'après les équations suivantes [20] :

$$h_{c-f} = h_{sol-f} = \frac{k_f}{d_h} Nu \quad (I.9)$$

$$Nu = 0.54 Ra^{0.25} \text{ pour } 2 \cdot 10^4 < Ra < 8 \cdot 10^7 \quad (I.9a)$$

Le diamètre hydraulique de collecteur [21] :

$$d_h = \frac{4(2\pi R h)}{2(2\pi R + h)} \approx 2h \quad (I.10)$$

Le coefficient de transfert de perte totale au niveau de l'absorbeur (sol) [19] :

$$U_b = \frac{1}{\frac{d_{sol}}{k_{sol}} + \frac{1}{U_{sol}}} \quad (I.11)$$

La profondeur d'amortissement, qui dicte le degré de variation de la température est donnée par mètre [22] :

$$d_{sol} = \sqrt{\frac{2\alpha}{w}} \quad (I.11a)$$

La fréquence angulaire durant la journée est égale $w = 0.0000727 \text{ s}^{-1}$ [22] :

$$w = \frac{2\pi}{t} \quad (I.11a.1)$$

Le coefficient de transfert thermique de sol [19] :

$$U_{sol} = 2 \sqrt{\frac{k_{sol} \rho_{sol} c_{psol}}{\pi t}} \quad (I.11b)$$

I.8.5. Calcul de performance de La cheminée (la tour) :

La cheminée convertit le flux thermique Q produit par le collecteur de la cheminée solaire en énergie cinétique et énergie potentielle. Ainsi, la différence de densité de l'air ($\Delta\rho = \rho_s - \rho_e$) Provoquée par l'élévation de température dans le collecteur fonctionne comme force motrice. La différence de pression ΔP_{tot} produite entre la base (sortie du collecteur = entrée cheminée) et le haut de la cheminée (sortie cheminée) donné par la relation suivante :

$$\Delta P_{tot} = g \cdot \int (\rho_s - \rho_e) \cdot dH \quad (I.12)$$

Cette différence de pression est appelée la pression d'entraînement disponible. On néglige les Pertes des frottements (frottement de l'air avec les parois internes de la cheminée), ΔP_{tot} peut-être subdivisé en un composant d'extraction de turbine ΔP_s représentant la Pression extraite à la turbine, et d'une composante dynamique ΔP_{dy} décrivant l'énergie cinétique de l'écoulement d'air :

$$\Delta P_{tot} = \Delta P_s + \Delta P_{dy} \quad (I.12a)$$

En utilisant la définition standard pour la pression dynamique, on obtient :

$$\Delta P_{dyn} = \frac{1}{2} \rho_2 V_2^2 \quad (I.12a.1)$$

$$\Delta P_{tot} = \frac{1}{2} \rho_2 V_{max}^2 \quad (I.12b)$$

On peut calculer la différence de pression [17] :

$$\Delta P_{tot} = 0.00353 g h \left(\Delta T_{1-2} + \frac{(Y_a - Y)H}{2} \right) \quad (I.12c)$$

Avec :

ΔT_{1-2} : la différence de température à l'entrée et la sortie de collecteur(°C).

On peut calculer la vitesse maximale à partir de la relation suivante qui donnée par [17] :

$$V_{max} = \sqrt{\frac{2\Delta P_{tot}}{\rho_2}} = \sqrt{\frac{0.00353 g h \left(\Delta T_{1-2} + \frac{(Y_a - Y)H}{2} \right)}{\rho_2}} \quad (I.12c)$$

La puissance maximale est tirée lorsque la vitesse V_2 est égal un tiers de (V_{max}) dans le cas de la turbine étant en charge [17]. La vitesse V_2 dans la cheminée exprimée comme suit :

$$V_2 = \frac{1}{3} V_{max} = \frac{1}{3} \sqrt{\frac{0.00353 g h \left(\Delta T_{1-2} + \frac{(Y_a - Y)H}{2} \right)}{\rho_2}} \quad (I.12d)$$

La puissance totale de la tour solaire peut être calculée à partir de l'équation suivante [23] :

$$P_{tot} = \Delta P_{tot} V_2 A_{ch} \quad (I.12e)$$

I.8.6 Calcul de performance de la turbine (turbine éolienne) :

La turbine convertit l'énergie cinétique d'écoulement d'air en énergie mécanique, et le générateur entraîné par la turbine convertit l'énergie mécanique en énergie électrique. La chute de pression dans la turbine est deux tiers la différence de pression totale [24].

$$\Delta P_s = \Delta P_{tot} - \frac{1}{2} \rho_2 v_2^2 \quad (I.12f)$$

La puissance utile théorique à la turbine (énergie cinétique du flux d'air convertit en énergie mécanique à l'arbre de la turbine) est donnée par : [30]

$$P_{wt} = \Delta P_s v_2 A_{ch} \quad (I.12g)$$

La puissance est obtenue sa valeur maximal lorsque les deux tiers de la différence de pression total est utilisée par la turbine est donnée par : [24]

$$P_{wt\ max} = \frac{2}{3} \rho_2 \cdot A_{ch} \cdot \Delta P_{tot} \quad (I.12h)$$

Conclusion

La technologie de la tour solaire présente un moyen d'exploiter la chaleur du soleil. Les investissements de départ sont importants mais prévisibles, et ils permettent de produire une électricité propre et renouvelable. Les tours solaires sont très importantes pour le futur, par ce que nos ressources sont limitées. Pour fonctionner au mieux, une cheminée solaire doit être construite dans une région très ensoleillée et disposant de nombreux espaces inhabités. La cheminée solaire est un générateur naturel de puissance qui utilise la radiation solaire pour augmenter l'énergie interne de l'air circulant dans le système, ce qui permet de transformer le gain utile du capteur solaire en énergie cinétique d'écoulement qui peut être transformée en énergie électrique au moyen d'une turbine appropriée.

Chapitre II

Matériels et méthode

Au cours de ce chapitre, on va s'intéresser à l'étude expérimentale d'une cheminée solaire, conçu dans le cadre d'une thèse de doctorat classique par l'étudiant Bedjehit El houas. Une description de ce dispositif expérimental, son principe de fonctionnement et les critères utilisés, lors de cette étude ont été présentés.

II.1 Description du dispositif expérimental

La cheminée solaire conçue est composé de deux parties ; le collecteur et le tour de la cheminée comme indiqué sur la Figure (II.1.). Le collecteur est composé de deux disques de même diamètre de 79 cm ; l'un en bas acier et l'autre en haut plexiglas qui capte le rayonnement solaire comme noté sur la Figure (II.2.). Cette plaque comporte une ouverture pour placer le tour de la cheminée. La distance qui sépare ces deux plaques est de 10.5 cm. Le tour de la cheminée est composé d'un tube en plastique de 1.39 m de hauteur et de 7.5 cm de diamètre comme illustré sur la Figure (II.3.).



Figure (II.1) : Composition de la cheminée solaire.



Figure (II.2) : Le collecteur.



Figure (II.3) : Le tour de la cheminée.

II.2 Matériel annexe

Des capteurs de températures de types D518B20 ont été utilisé pour mesurer les températures dans les différents points étudiés. Deux systèmes d'acquisition numérique

composés principalement de Carte Arduino et des capteurs de température ont été conçus. Le premier système comporte cinq capteurs de température suivant une ligne droite avec une distance de 9,5 cm qui les séparent comme noté sur la Figure (II.4a). Il permet d'enregistrer les valeurs de température chaque minute. Il est utilisé pour capter les valeurs des températures du fluide le long du rayon du collecteur. Un deuxième système d'acquisition numérique des températures est composé de cinq sondes de température comme illustré sur la Figure(II.4b). Ce dispositif permet d'enregistrer les températures du collecteur et la température du sol.



Figure (II.4a) : Le premier système d'acquisition des températures.



Figure(II.4b) : Le deuxième système d'acquisition des températures.

II.3 Principe de fonctionnement

On installe le dispositif dans un endroit ensoleillé du matin jusqu'à le soir bien que nous avons les capteurs qui nous aide d'enregistre le premier système d'acquisition des températures comportent cinq capteurs qui sauvegarde les valeurs chaque une minute. Il est utilisé pour capter les valeurs des températures du fluide (T_f) le long du rayon du collecteur. Ensuite Un deuxième système d'acquisition numérique des températures est composé de cinq sondes de température placé sur l'absorbeur en bas pour déterminer la température de l'absorbeur (T_{sol}) et l'autre capteur est placé à l'air libre pour déterminer la température ambiante cette appareil et alimenter par un secteur (220V/50Hz) et s'effectue pendant la journée.

II.4 Support de l'étude et procédure expérimentale

II.4.1 Support de l'étude

La cheminée solaire utilisée durant notre étude emploie l'air comme fluide caloporteur, l'air est un gaz parfait et l'écoulement est incompressible dans la cheminée avec un nombre de Mach est inférieure à 0,3. Les propriétés thermo-physiques de l'air varient en fonction de la température comme indiqué sur le Tableau (II.1).

Tableau (II.1) : Les propriétés thermo-physiques de l'air [25].

Propriétés de l'air à 1 atm						
T	ρ	c_p	K_f	$10^5 \mu$	$10^5 \cdot a$	Pr
°C	kg.m ⁻³	J.kg ⁻¹ .°C ⁻¹	W.m ⁻¹ .°C ⁻¹	Pa.s ⁻¹	m ² .s ⁻¹	
0	1,292	1006	0,0242	1,72	1,86	0,72
20	1,204	1006	0,0257	1,81	2,12	0,71
40	1,127	1007	0,0272	1,90	2,40	0,70
60	1,059	1008	0,0287	1,99	2,69	0,70
80	0,999	1010	0,0302	2,09	3,00	0,70
100	0,946	1012	0,0318	2,18	3,32	0,69
120	0,898	1014	0,0333	2,27	3,66	0,69
140	0,854	1016	0,0345	2,34	3,98	0,69
160	0,815	1019	0,0359	2,42	4,32	0,69
180	0,779	1022	0,0372	2,50	4,67	0,69
200	0,746	1025	0,0386	2,57	5,05	0,68
220	0,700	1028	0,0399	2,64	5,43	0,68
240	0,688	1032	0,0412	2,72	5,80	0,68
260	0,662	1036	0,0425	2,79	6,20	0,68
280	0,638	1040	0,0437	2,86	6,59	0,68
300	0,616	1045	0,0450	2,93	6,99	0,68

II.4.2 Procédure expérimentale

La procédure expérimentale s'effectue suivant les étapes suivantes :

- ✓ Installer l'appareil dans un endroit ensoleillé au voisinage d'une alimentation en secteur (220V/50Hz).
- ✓ L'expérience commence à 9 h et se termine à 17 h, elle s'effectue durant la journée.
- ✓ On place un capteur de température sur le collecteur pour déterminer sa température (T_{col}) comme noté sur la Figure(II.5a). Un autre capteur de température est placé sur l'absorbeur en bas pour déterminer la température de l'absorbeur (T_{sol}) et un système de capteur de température en ligne droite est placé suivant le rayon de l'absorbeur pour déterminer les températures du fluide (T_f) sur cinq points le long du rayon R du collecteur comme noté sur la Figure (II.5c). Un autre capteur est placé à l'air libre pour déterminer la température ambiante.
- ✓ Actionner les capteurs de température et le prélèvement des températures (T_{col} , T_{sol} , T_f des cinq points et T_{am}) s'effectue automatiquement chaque une minute durant la durée de notre expérience.
- ✓ Une fois qu'on a terminé l'expérience les résultats sont enregistrés dans une carte mémoire et peuvent être convertis en fichier Excel pour être traité.

II.5 Critères de l'étude

Notre étude expérimentale porte sur l'évolution des températures (collecteur, sol, ambiante et celle du fluide) le long de la journée du 04 /04/2021 de 9 h jusqu'à 17 h dans une cheminée solaire. Les résultats obtenus sont discutés dans la deuxième partie du chapitre 3.



Figure (II.5.a) : Le capteur de température sur le collecteur.



Figure (II.5.b) : Le capteur de température en bas sur l'absorbeur.



Figure (II.5.c) : Le système de mesure de température le long du rayon R du collecteur.

Conclusion

Durant notre Expérience du cheminée solaire et grâce à matériel qui nous aide à enregistre les températures (collecteur, sol, Ambiante) et procédure, critère utilisé lors de cette expérience et son principe de fonctionnement, Enfin La cheminée solaire utilisée durant notre étude emploie l'air comme fluide caloporteur.

Chapitre III

Résultats et discussions

Ce chapitre est divisé en deux parties, la première traite la modélisation d'une cheminée solaire et la deuxième partie est réservée aux résultats des expériences effectuées sur la cheminée réalisée.

Partie 1

III.1.1. Description du problème :

Le problème consiste à déterminer la température du collecteur (T_c), la température du fluide (T_f) et la température du sol d'une cheminée solaire selon les valeurs de température T_a , des radiations solaires G reçues sur la surface du collecteur et la vitesse du vent à chaque heure. Cette détermination est basée sur les résolutions du système d'équations obtenues dans le chapitre 1 (partie 2) (I.1, I.2 et I.3) en appliquant le bilan énergétique sur le collecteur, le fluide et le sol.

Ce système d'équation peut être écrit sous forme matricielle :

$$[A][T] = [B] \quad (\text{III.1})$$

On peut déterminer le vecteur des températures $[T] = [T_f \ T_{sol} \ T_c]$ par inversion matricielle de la façon suivante :

$$[T] = [A]^{-1}[B] \dots \dots \dots (\text{III.2})$$

Un programme en Matlab a été élaboré pour résoudre ce système d'équation, il se base sur une méthode itérative suivante :

1. On fixe des valeurs initiales de la température du fluide (T_f), du sol (T_{sol}) et du collecteur (T_c) en fonction de la température ambiante comme indiqué sur les équations suivantes :

$$T_{c0} = T_a + 5 \quad (\text{III.3a})$$

$$T_{sol0} = T_a + 15 \quad (\text{III.3b})$$

$$T_{f0} = T_a + 10 \quad (\text{III.3c})$$

2. On calcule les différents coefficients de transfert en fonction des températures T_{c0} et T_{sol0} ,
3. On calcule les nouvelles températures du fluide (T_f), du sol (T_{sol}) et du collecteur (T_c),
4. On compare entre cette température du fluide et la température initiale ($E_r = \text{abs}(T_f - T_{f0})$) :
 - Si Non ($E_r > 0.01$) Allez aux point 2 et recommencé les calculs avec les nouvelle valeurs d'initialisation de T_f , T_c et T_{sol}

- Si Oui ($Er \leq 0.01$) arrêté le calcul itérative et passer à l'étape suivante
- 5. Calculer tous les paramètres avec ces dernières valeurs de T_f , T_c et T_{sol} ,
- 6. Affichage des résultats.

III.1.2. Programmes et modèles Mathématiques :

Durant notre étude, on a testé trois modèles de calcul du coefficient du transfert de chaleur par convection entre l'air et le collecteur, ils sont donnés par :

➤ **Modele 1: modèle de Kröger and Burger**

Ce modèle décrit le coefficient de convection entre le collecteur et le fluide suivant la formule suivante [26] :

$$h_{con_col_air} = \left(\frac{0.2106 + 0.0026 Vin \left(\frac{\rho T_{mc}}{\mu g (T_{air} - T_c)} \right)^{\frac{1}{3}}}{\left(\frac{\mu T_{mc}}{(T_{air} - T_c) g c p k^2 \rho^2} \right)^{\frac{1}{3}}} \right) \quad (III.4a)$$

Avec :

ρ : la masse volumique de l'air ($\frac{kg}{m^3}$)

μ : la viscosité dynamique de l'air

g : la gravité ($\frac{m}{s^2}$)

C_p : la capacité thermique de l'air ($\frac{w}{m^2 k^2}$)

K : la conductivité thermique de l'air

T_{mc} : la température moyenne entre la température du collecteur (T_c) et la température de l'air (T_f),

$$T_{mc} = \frac{T_c + T_{air}}{2} \quad (III.4b)$$

Vin : la vitesse d'entrée de l'air dans le collecteur

➤ **Modele2 : modèle de Witt**

Dans ce modèle le coefficient de convection entre le collecteur et le fluide est donné par la formule suivante [27] :

$$h_{conv_col_air} = Nuc_air * \frac{k_{air}}{L_{g_c}} \quad (III.4c)$$

Le nombre de Nusselt Nu dépend de la nature de l'écoulement [28] :

➤ Si l'écoulement est laminaire ($Ra < 10^9$)

$$Nu_conv_air = \frac{0.68 + (0.67 Ra)^{\frac{1}{4}}}{(1 + (0.492 / Pr)^{\frac{1}{4}})^{\frac{4}{9}}} \quad (III.4d)$$

Avec :

Ra : le nombre de Rayleigh, il est calculé par la formule suivante [29] :

$$Ra = \frac{g \cos \theta \beta (T_c - T_{air}) L_{g_c}^3}{\nu \alpha_c} \quad (III.4e)$$

➤ **Modele3:modèle de Churchill and chu**

Dans ce modèle le coefficient de convection entre le collecteur et le fluide est donné par la formule suivante [27] :

$$h_{conv_col_air} = Nuc_air * \frac{k_{air}}{L_{g_c}} \quad (III.4f)$$

Le nombre de Nusselt est fonction du nombre de Rayleigh :

- $Nuc_air : 0.54 Ra^{0.25}$ pour $2 * 10^4 < Ra < 8 * 10^7$
- $Nuc_air : 0.15 Ra^{0.33}$ pour $8 * 10^7 < Ra < 8 * 10^{11}$

Notons que pour chaque modèle, on a vérifié trois formules de calcul du coefficient de la convection entre le collecteur et l'air ambiant.

$$h_{cov_col_air1} = 2.8 + 3 * V_{wind} \quad (III.5a)$$

$$h_{cov_col_air2} = 5.47 + 3.95 * V_{wind} \quad (III.5b)$$

$$h_{cov_col_air3} = 5.7 + 3.8 * V_{wind} \quad (III.5c)$$

III.1.3. Validation des résultats :

Afin de valider les six modèles testés (M1-1, M1-2, M1-3, M2-1, M2-2, M2-3, M3-1, M3-2 et M3-3), on a utilisé les données du prototype de la cheminée solaire de Manzanares (Espagne). Ce prototype est caractérisé par un collecteur de diamètre de 244 m, un diamètre de cheminée 10 m et une hauteur de cheminée de 194.5 m.

Pour la journée du 4 Avril 1989, les évolutions horaires des radiations solaires et de la température ambiante sont illustrées sur les Figures (III.1) et (III.2) respectivement.

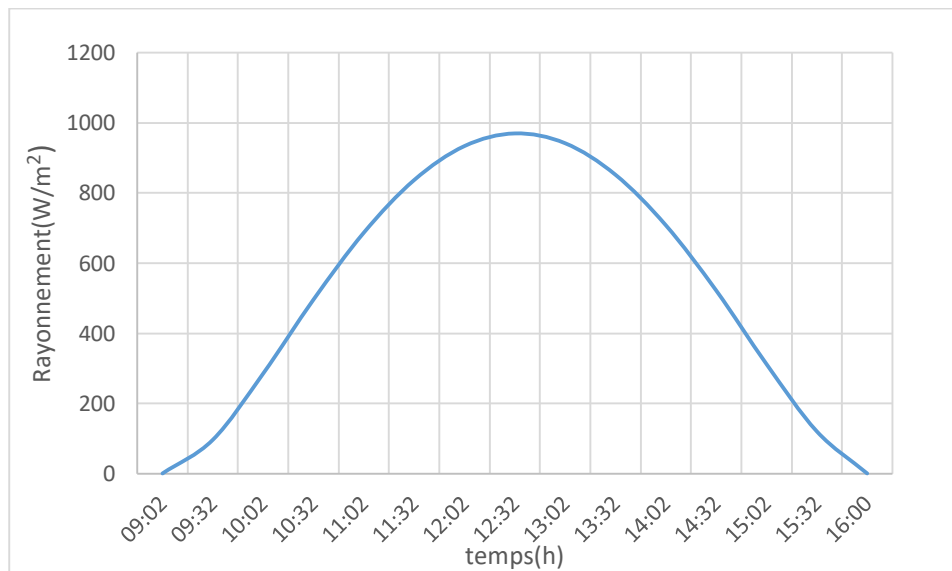


Figure (III.1) : L'évolution des radiations solaires en fonction du temps.

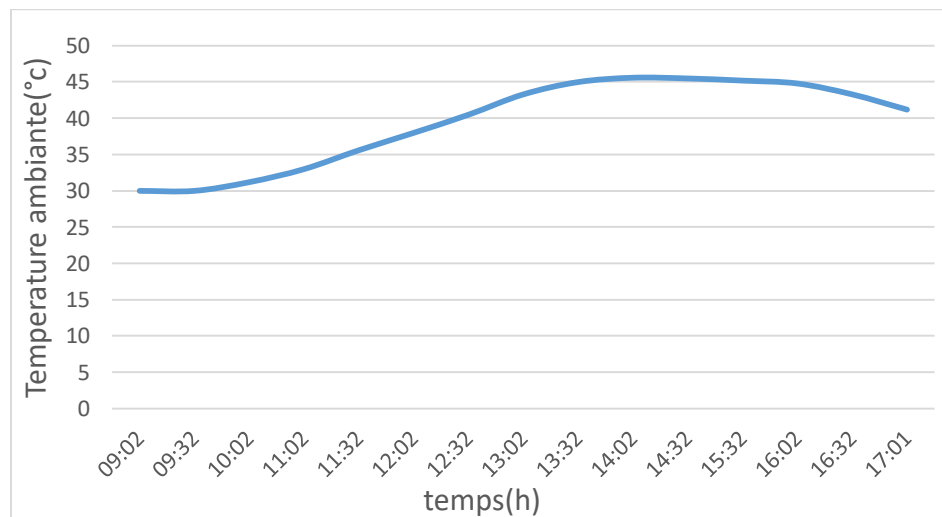


Figure (III.2) : L'évolution de la température ambiante en fonction du temps.

On note que le rayonnement solaire évolue sous forme d'une clochette, il progresse au cours du temps jusqu'à atteindre sa valeur maximale de 970 W/m² à 12h:32 ensuite il se dégrade.

La variation de la température ambiante au cours de cette jour atteint ces valeurs maximales 45°C à 13h:32 min et 45,2°C à 15h32 min puis elle commence à s'affaiblir et atteindre sa minimale à 17h01 min à une température T= 41,2°C.

Afin de comparer les résultats des modèles testés M1, M2 et M3 ont comparé nos résultats avec ceux expérimentaux de la cheminée de Manzanares des heures 10h, 12h, 14h et 16h respectivement de la même journée. Les résultats des modèles ; 1(M1-1, M1-2 et M1-3), 2(M2-1, M2-2 et M2-3) et 3(M3-1, M3-2 et M3-3) sont regroupés dans les tableaux (III.1), (III.2) et (III.3) respectivement.

Tableau (III.1) : Comparaison des résultats du modèle 1 avec les résultats expérimentaux.

Expérimentales			Model1 (M1)				ΔT%		
Temps(h)	Ta	G	Tf-Ta	Tf-Ta M1-1	Tf-Ta M1-2	Tf-Ta M1-3	M1-1	M1-2	M1-3
10 :00	21.1	744.4	14.8	12.88	13.79	12.81	12.9	6.82	13.4
12 :00	23.4	850	17.8	14.86	15.92	14.79	16.5	10.56	16.91
14 :00	26.1	755	17.4	13.1	14.14	13.13	1.38	18.73	24.54
16 :00	27.9	455	11.3	7.8	8.34	7.76	30.9	26.19	31.32

Tableau (III.2) : Comparaison des résultats du modèle 2 avec les résultats expérimentaux.

Expérimentales			Model2 (M2)				ΔT%		
Temps(h)	Ta	G	Tf-Ta	Tf-Ta M2-1	Tf-Ta M2-2	Tf-Ta M2-3	M2-1	M2-2	M2-3
10 :00	21.1	744.4	14.8	14.63	14.82	14.54	1.14	0.13	1.75
12 :00	23.4	850	17.8	16.89	17.75	16.78	0.65	0.28	5.73
14 :00	26.1	755	17.4	15.04	14.85	14.95	13.5	14.6	14
16 :00	27.9	455	11.3	8.97	9.28	8.92	25.9	17.8	21.06

Tableau (III.3) : Comparaison des résultats du modèle 3 avec les résultats expérimentaux.

Temps(h)	Expérimentales			Model3 (M3)			$\Delta T\%$		
	Ta	G	Tf-Ta	Tf-Ta M3-1	Tf-Ta M3-2	Tf-Ta M3-3	M3-1	M3-2	M3-3
10 :00	21.1	744.4	14.8	12.95	13.87	12.88	12.70	6.28	12.97
12 :00	23.4	850	17.8	14.94	16.02	14.87	16.06	10	16.46
14 :00	26.1	755	17.4	13.27	14.23	13.21	23.73	18.21	24.08
16 :00	27.9	455	11.3	7.85	10.19	7.81	30.53	9.82	30.88

On constate que les meilleures valeurs des pourcentages d'erreurs sont notées pour les deuxième modèle M2. Pour ce même modèle, on note que le modèle M2-2 est le meilleur à décrire la valeur de la température du fluide comparé avec les autres modèles. Donc on adapte ce modèle M2-2 pour le reste de notre étude.

III.1.4. Evolution des températures en fonction du temps (Tf, T_{sol} et T_c) pour R=124 m

On a simulé avec le modèle M2-2 l'évolution des différentes valeurs des températures pour chaque heure, pour un diamètre du collecteur R=124 m. Les résultats sont illustrés sur la (Figure III.3). On note que l'évolution des températures (Tf, T_{sol} et T_c) commence de 6h, elle augmente jusqu'un maximum noté à 13h (T_{sol}=97,909°C, T_c=60,247°C et Tf= 62,456°C), ensuite elle se dégrade jusqu'à 19h.

On note une augmentation significative de la température de sol par rapport aux températures du fluide et du collecteur. Ce qui peut être attribué au fait que l'absorbe une grande quantité de chaleur (rayonnement solaire + fluide qui circule). On note également que la température du collecteur (T_c) est faible, ce qui est relié à la faible absorptivité du vitrage à son refroidissement convectif des deux côtés (air à l'extérieur du collecteur et l'air à l'intérieur du collecteur).

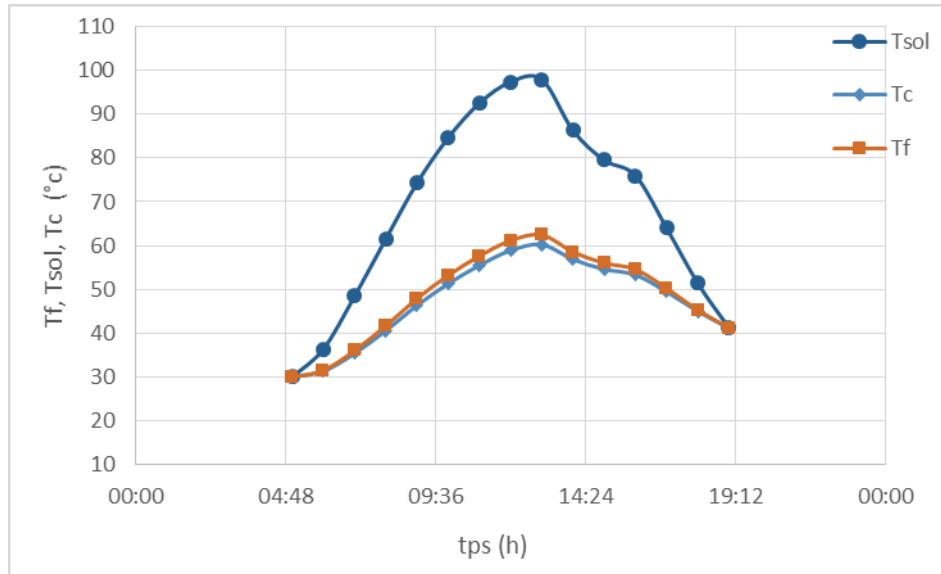


Figure (III.3) : Evolution des températures en fonction du temps (Tf, Tsol et Tc) pour (R=124 m)

III.1.5 Influence du diamètre sur les évolutions des températures (Tf, Tsol et Tc) en fonction du temps

Dans le but de visualiser l'effet du diamètre sur l'évolution des températures (température du fluide (Tf), température du sol (Tsol), et la température du collecteur(Tc), on a tracé l'évolution de chaque température en fonction du temps pour différents diamètres (R= 25, 45, 65, 85, 105, 124 m) durant les mêmes conditions opératoires. Les résultats sont notés sur les (Figures III.4,III.5 et III.6) respectivement.

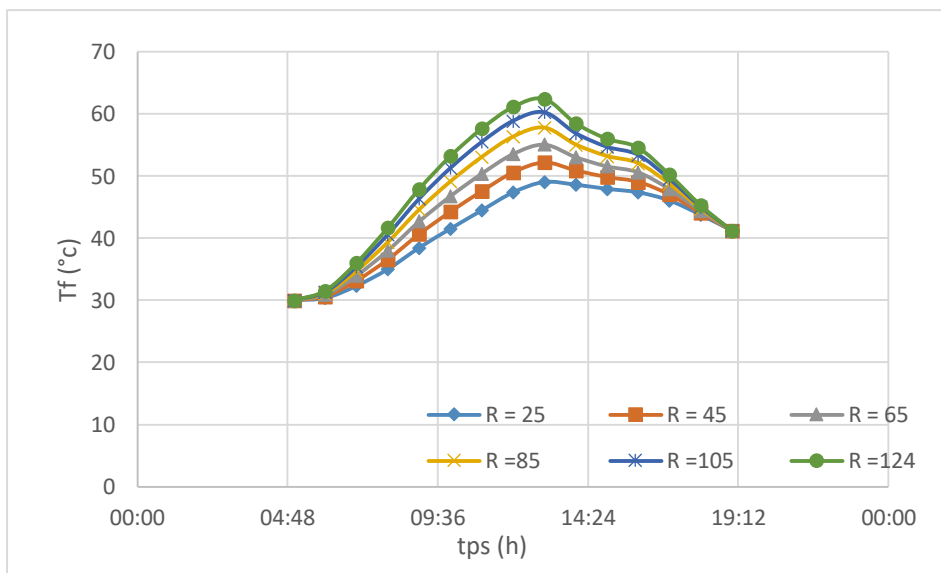


Figure (III.4) : Evolution de la température Tf en fonction du temps pour différents diamètres.

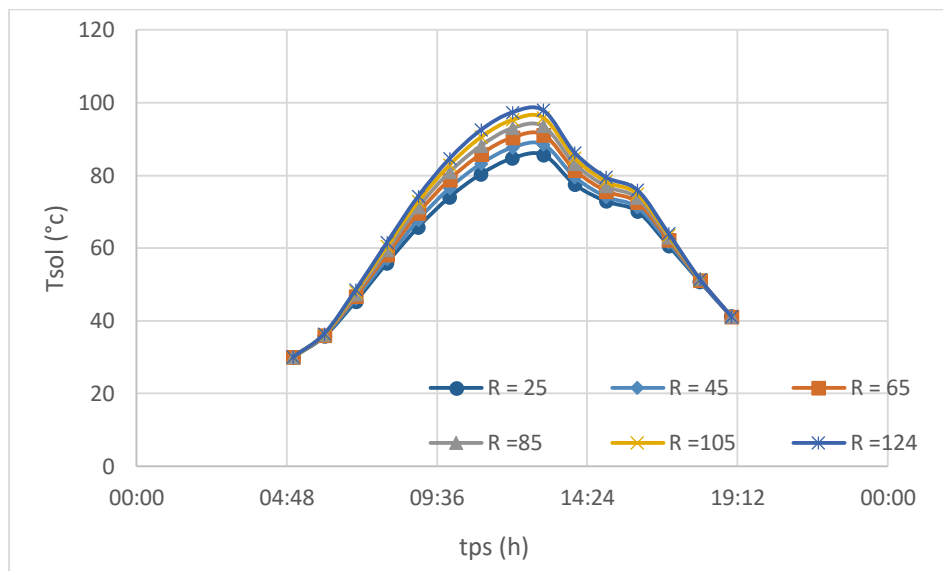


Figure (III.5) : Evolution de la température Tsol en fonction du temps pour différents diamètres

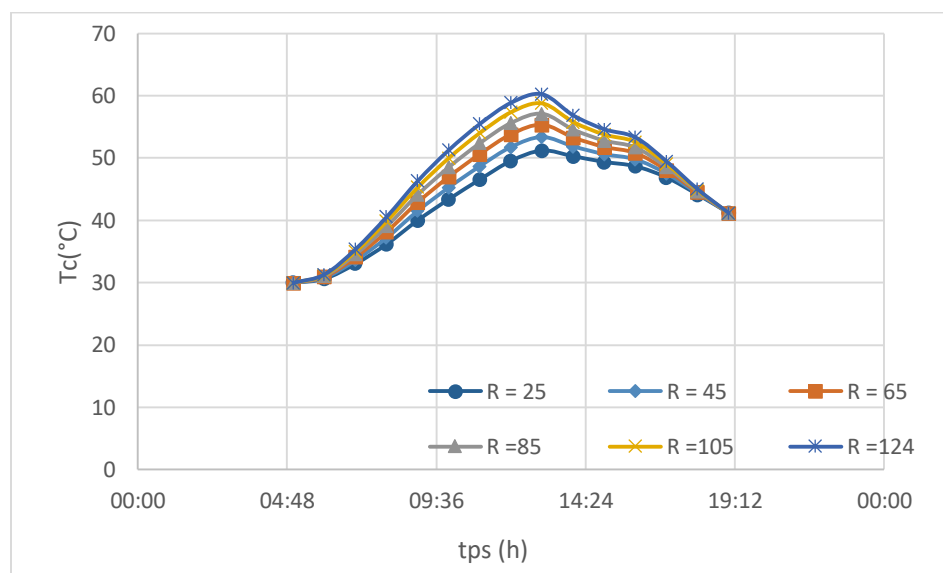


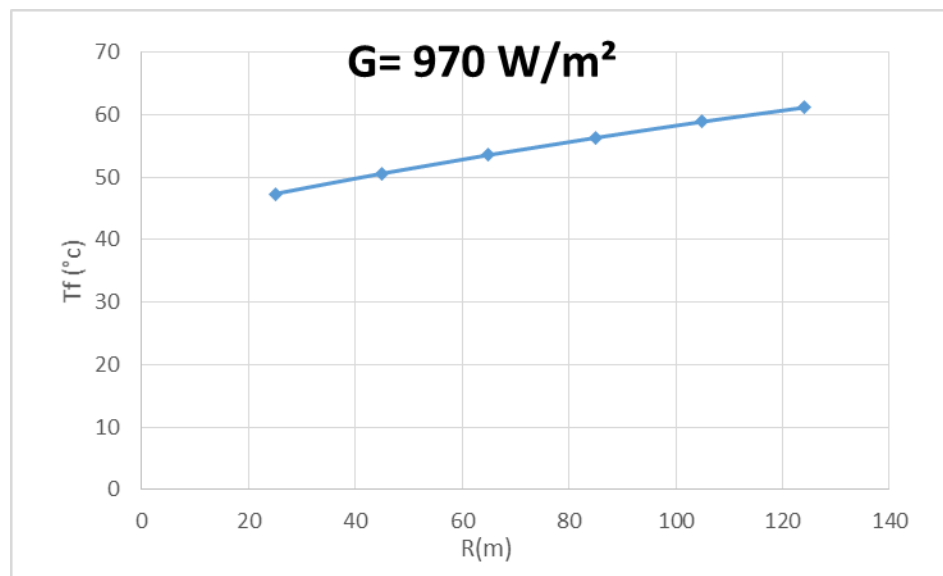
Figure (III.6) : Evolution de la température Tc en fonction du temps pour différents diamètre.

On constate que l'évolution des températures (température du fluide, température du sol et température du collecteur) augmente avec l'augmentation du diamètre. Cette augmentation est visible à midi comme indiqué sur les (Figures III.4, III.5 et III.6) respectivement. On note également que des températures suivent la même allure pour les trois températures Tf, Tsol et Tc.

III.1.6. L'effet de la variation du Rayon sur les températures (T_f , T_{sol} et T_c) :

Dans le but d'étudier l'effet de la variation du rayon R du collecteur sur les températures T_f , T_{sol} et T_c , on a tracé l'évolution de ces températures en fonction de rayon pour une radiation solaire donnée $G=970\text{W/m}^2$:

L'effet de la variation du diamètre sur la température du fluide est illustré sur la (Figure III.7). On constate que la température du fluide augmente avec l'augmentation du diamètre, à titre d'exemple au rayon 25 m la température du fluide est de 47.344°C et elle est de $61,145^\circ\text{C}$ pour le diamètre de 124 m.



Figure(III.7) : Evolution de la température T_f en fonction de rayon R pour ($G=970\text{ W/m}^2$)

De même, l'évolution de la température du sol en fonction du rayon R pour ($G=970\text{ W/m}^2$) est illustrée sur la **Figure(III.8)**. On remarque que la température T_{sol} augmentation avec l'augmentation du diamètre à titre d'exemple à 25 m, la température du sol est $84,648^\circ\text{C}$ et pour un diamètre de 124m, elle est de $97,363^\circ\text{C}$.

Sur la **Figure (III.9)**, on a tracé l'évolution de la température du collecteur en fonction du rayon R pour une radiation solaire (G) de 970 W/m^2). La même constatation est enregistrée, la température du collecteur augmente avec l'augmentation du rayon R . à titre d'exemple, à 25 m, elle est de $49,54^\circ\text{C}$ et elle prend la valeur de 58.891°C pour un diamètre de 124 m.

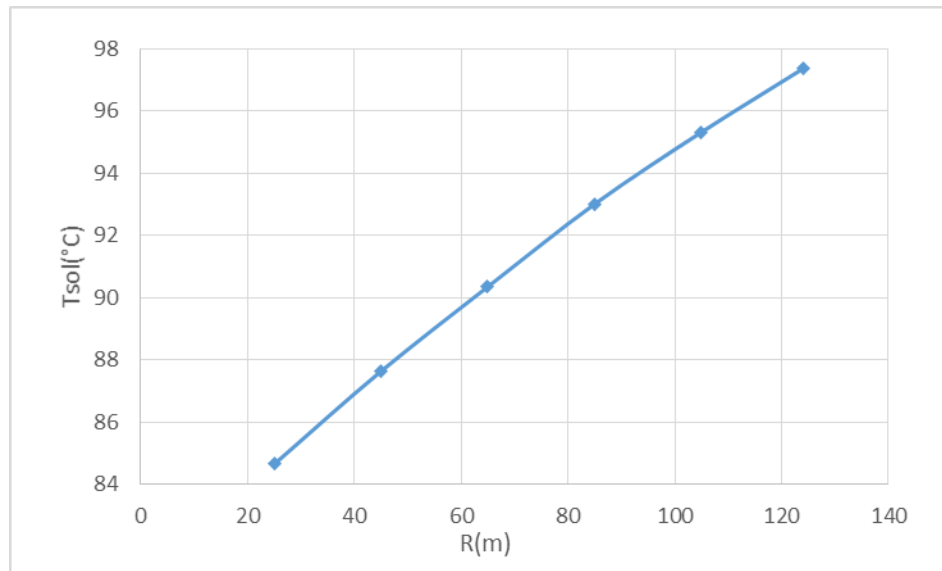


Figure (III.8) : l'évolution de température T_{sol} en fonction de rayon pour ($G=970 \text{ W/m}^2$)

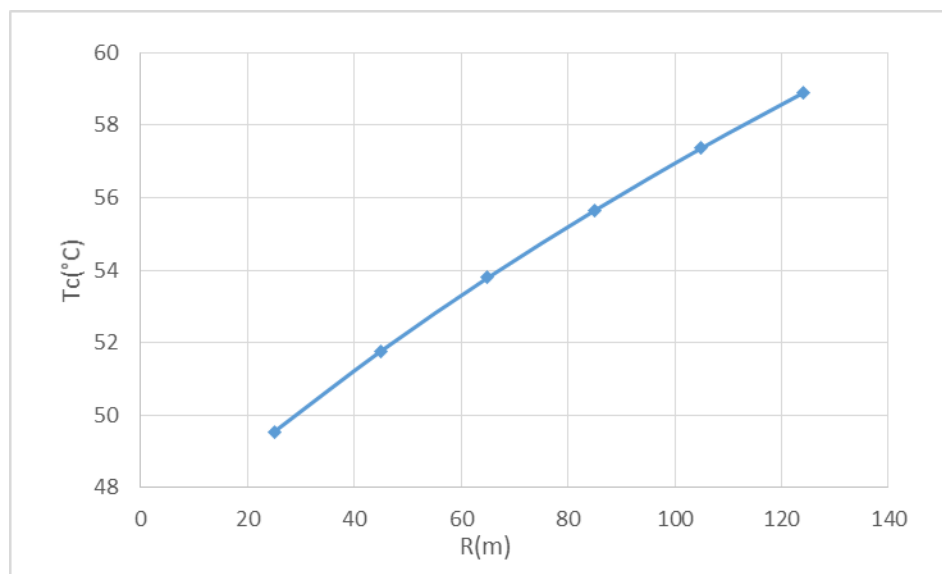


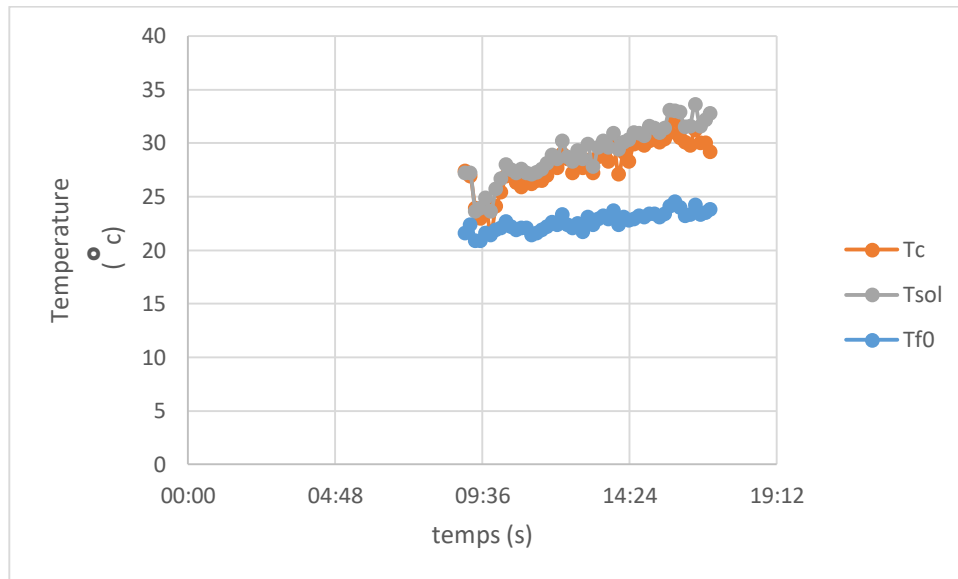
Figure (III.9) : l'évolution de température T_c en fonction de rayon pour ($G=970 \text{ W/m}^2$)

Partie 2

Dans cette partie, on présente les résultats des expériences effectuée sur notre cheminée solaire le 04/04/2021 dans la région de M'sila.

III.2.1. Variation des températures T_c , T_{sol} et T_{f0} au cours de la journée :

On a tracé l'évolution des températures (température du sol, la température du collecteur et la température du fluide à l'entrée du collecteur en fonction du temps comme illustré sur la (Figure III.10).



Figure(III.10) : Variation des températures T_c , T_{sol} et T_{f0} en fonction de temps

On remarque une augmentation significative de la température de sol par rapport aux autres températures parce que ce dernier absorbe une grande partie de rayonnement solaire.

III.2.2 L'évolution de température T_c et T_{sol} en fonction de T_a :

Les deux (Figures III.11 et III.12) illustrent l'évolution de la température du collecteur (T_c) en fonction de la température ambiante (T_a) et l'évolution de la température du sol (T_{sol}) en fonction de la température ambiante (T_a). On note que les deux températures celle du collecteur et celle du sol sont influencées par la température ambiante.

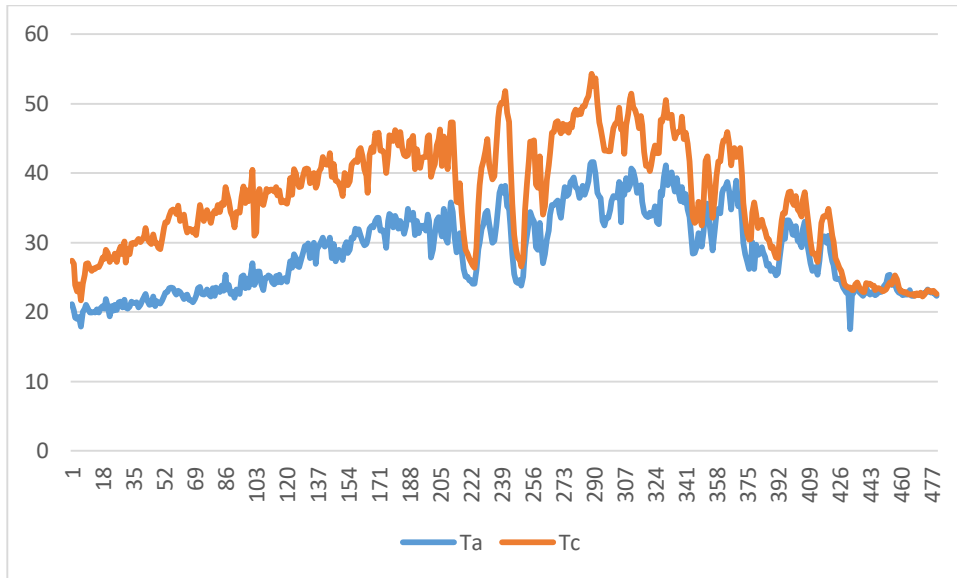


Figure (III.11) : L'évolution de température Tc et de Ta.

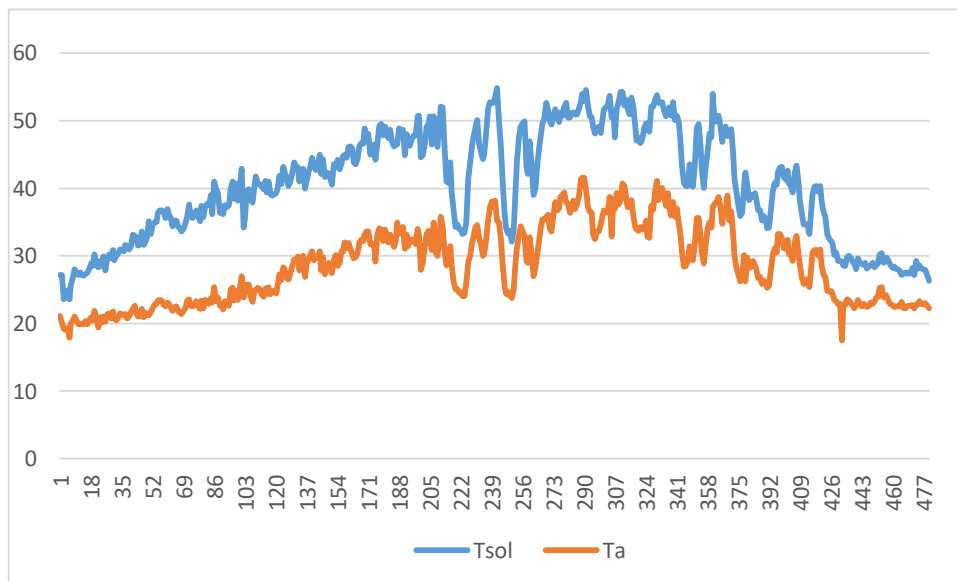


Figure (III.12) : L'évolution de température Tsol en fonction de Ta

Conclusion

Après l'étude du chapitre 2, les points suivants peuvent être retenus :

- Un modèle mathématique de la cheminée solaire a été proposé avec trois modèles de détermination du coefficient de convection entre l'air et le collecteur ont été étudiés modèle de Kröger and Burger, modèle de Witt et le modèle de Churchill and Chu. Pour chaque modèle trois modèles du coefficient de la convection entre le collecteur et l'air ambiant ont été étudiés.
- La résolution du système d'équations obtenues a été résolue par Matlab en utilisant une méthode itérative.
- Les résultats obtenus ont été validés par des données de la cheminée solaire de Manzanares de l'Espagne. Le modèle de Witt avec le deuxième coefficient de convection entre le collecteur et l'air ambiant a été sélectionné comme le meilleur modèle.
- L'effet d'augmentation du diamètre sur l'évolution de température a été effectué. L'augmentation du diamètre du collecteur augmente la température du collecteur, celle du fluide et la température du sol.
- L'étude expérimentale effectuée sur notre prototype montre que les températures du sol et du collecteur sont affectées par la température ambiante.

Conclusion générale

Conclusion générale

La cheminée solaire est un générateur naturel de puissance qui utilise la radiation solaire pour augmenter l'énergie interne de l'air circulant dans le système, ce qui permet de transformer le gain utile du capteur solaire en énergie cinétique d'écoulement qui peut être transformée en énergie électrique au moyen d'une turbine appropriée.

Pour mieux fonctionner, une cheminée solaire doit être construite dans une région très ensoleillée et disposant de nombreux espaces inhabités, le désert algérien est donc parmi les endroits les plus remarquables au monde où l'ensoleillement global annuel est maximal et où les surfaces inoccupées ne manquent pas. Les caractéristiques climatiques du Sahara algérien offrent des très bonnes conditions permettant certainement d'atteindre de bons rendements au niveau d'une cheminée solaire.

L'objectif principal de notre étude porte sur la modélisation de la cheminée solaire afin de déterminer les températures du sol, celle du collecteur et celle du fluide. De même, faire quelque essai sur un prototype de cheminée solaire. Les résultats obtenus durant notre projet de fin d'étude se résume dans les points suivants :

- Un modèle mathématique de la cheminée solaire a été proposé avec trois modèles de détermination du coefficient de convection entre l'air et le collecteur qui ont été étudiés modèle de Kröger and Burger, modèle de Witt et le modèle de Churchill and chu. Pour chaque modèle trois modèles du coefficient de la convection entre le collecteur et l'air ambiant ont été étudiés.
- La résolution du système d'équations obtenues a été résolue par Matlab en utilisant une méthode itérative.
- Les résultats obtenus ont été validé par des données de la cheminée solaire de Manzanares de l'Espagne. Le modèle de Witt avec le deuxième coefficient de convection entre le collecteur et l'air ambiant a été sélectionné comme le meilleur modèle.

- L'effet d'augmentation du diamètre sur l'évolution de température a été effectué. L'augmentation du diamètre du collecteur augmente la température du collecteur, celle du fluide et la température du sol.
- L'étude expérimentale effectuée sur notre prototype montre que les températures du sol et du collecteur sont affectées par la température ambiante.

Les résultats obtenus sont encourageant sur la poursuite des recherches sur la cheminée solaire avec plus de variantes comme :

- Validation du modèle obtenu expérimentalement sur notre dispositif ;
- Simulation numérique de notre prototype ;
- L'effet de l'ajout d'un concentrateur,.....sur le rendement de la cheminée solaire.

Référence bibliographiques

- [1]. RAMANATSANDRATANA BARISON JAMES « PRODUCTION D'ELECTRICITE PAR UNE CHEMINEE SOLAIRE » MEMOIRE du : DIPLOME D'ETUDES APPROFONDIES DE PHYSIQUE Option : Energétique UNIVERSITÉ D'ANTANANARIVO 2012.
- [2]. M. BOUANANI MohammedM. DJELAILI Abdelbaki, « PERFORMANCE EN ÉTÉ, DE LA CHEMINÉE SOLAIRE SUR TOIT INCLINÉ PAR LA VENTILATION NATURELLE » Mémoire de MASTER II en Génie Mécanique, Option : Génie Thermique et Énergies Renouvelables. Université AbouBekr Belkaid-Tlemcen Faculté de Technologie 2011/2012.
- [3]. <http://pratclif.com/sustainability/solar%20flue.htm> 8958, Volume-2, Issue-3, February 2013.
- [4]. Pablo González, Guillermo Gómez, Ole Geisen : « les tours solaire, deux approches pour utiliser l'énergie du soleil », ENSTA Paris Tech, 5 .1.2011.
- [5]. BOUZIANE Ibrahim el-Khalil, LOUCHANI SIF Eddine « Analyse numérique du comportement aérothermique dans une cheminée solaire combinée avec l'énergie géothermique » Mémoire master en génie mécanique université Ouargla 2011.
- [6]. A. KASAEIAN, M. GHALAMCHI, M. GHALAMCHI, "Simulation and Optimization of geometric parameters of a solar chimney in Tehran", Energy Conversion and Management 83 pp28–34, (2014).
- [7]. <http://nice-fictions.fr/wp-content/uploads/2014/11/presentation-tour-solaire-2>
- [8]. Sherif, S.A, L.B. Padki , Solar chimney for power generation in rural areas, Seminar on Energy Conservation and Generation Through Renewable Resources, Ranchi, India, pp. 9196, 1989.
- [9] Amel Dhahri, Ahmed Omri. « A Review of solar Chimney Power Generation Technology ». International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT) ISSN: 2249 – 8958, Volume-2, Issue-3, February 2013.
- [10]. Enviromission. Website address: <http://www.enviromission.com.au>.
- [11]. <http://www.ingenieriacampo3.com/>
- [12]. <http://www.elioth.com/site>
- [13]. <http://www.floatingsolarchimney.gr>.
- [14]. www.ccsenet.org/mas/moderne Applied Science Vol. 7, n ° 4; 2013 58

- [15]. (Direcksataporn, 2008), URL: <http://dx.doi.org/10.5539/mas.v7n4p55> College of Engineerin2010
- [16]. (Hamdan, 2011). URL: <http://dx.doi.org/10.5539/mas.v7n4p55> College of Engineerin2010
- [17]. (Zhou, Yang, Xiaco, et Shi, 2008). URL: <http://dx.doi.org/10.5539/mas.v7n4p55> College of Engineerin2010
- [18]. (Bernardes & Weinrebe, 2003), URL: <http://dx.doi.org/10.5539/mas.v7n4p55> College of Engineerin2010
- [19]. (Xinping et al., 2010). URL: <http://dx.doi.org/10.5539/mas.v7n4p55> College of Engineerin2010
- [20]. (Annaratone, 2010), URL: <http://dx.doi.org/10.5539/mas.v7n4p55> College of Engineerin2010
- [21]. (Chergui, Larbi, & Bougdjar, 2011): URL: <http://dx.doi.org/10.5539/mas.v7n4p55> College of Engineerin2010
- [22]. (Storage, 2005) URL: <http://dx.doi.org/10.5539/mas.v7n4p55> College of Engineerin2010
- [23]. (Schlaich, Bdrgermann, Schiel, & Weinrebe, 2005) URL College of Engineerin2010
<http://dx.doi.org/10.5539/mas.v7n4p55>
- [24]. (article) 7_IJPAST-444-V13N2.32215919_2.pdf, URL: College of Engineerin2010
<http://dx.doi.org/10.5539/mas.v7n4p55>
- [25] : <https://docplayer.fr/43045118-Etude-d-un-refroidisseur-d-une-installation-de-refrigeration-solaire-a-adsorption.html>
- [26]: J.A.Duffie, W.A.Beckman. Solar engineering of thermal processes. NASA STI/ Recon Technical Report,A81,16591,1980
- [27]: J.Mathur, S.Mathur, Anupma.summer-performance of inclined roof solar chimney for natural ventilation. Energy and building,38pp 1156-1163,2006
- [28]: N.bansal, R,Mathur, MBhandari. Solar chimney for embanked starch ventilation building and environnement.28,pp.1741-1747,2013,ASMI February.
- [29]: J.P.Incropern & D.G Kroger,Critical evaluation of solar chimery power plant performance Solar Energy pp 535-544-200
- [Web1]. <http://tpetoursolaire.eklablog.com/i-le-fonctionnement-d-un-tour-solaire-c514000>
- [Web2]. <http://www.floatingsolarchimney.gr>.