

République Algérienne Démocratique et Populaire

**Ministère de l'Enseignement Supérieur
et de la Recherche Scientifique**

Ecole Nationale Polytechnique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

Département de Génie Mécanique

**Projet de Fin d'Etudes pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'état
en Génie Mécanique**

Thème

**Analyse des Performances Energétiques
d'une Centrale à Cheminée Solaire
par une prise en charge du stockage thermique**

Etudié par :

Khaled MELIANI

Abdeldjalil TAGHOURT

Proposé et dirigé par :

S. LARBI, Prof., ENP

Promotion 2015

الملخص :

العمل المقدم في هذه المذكرة يركز على دراسة وتحليل أداء محطة توليد الطاقة الكهربائية ذات البرج الشمسي سواء كانت مزودة أو لا بنظام للتخزين الحراري. تم من اجل ذلك الاستناد الى نماذج نظرية رياضية (نموذج شلاك ونموذج حمادي). تم التأكد من صحة هذه النماذج عن طريق مقارنة نتائجها النظرية بنتائج مأخوذة من المراجع المتوفرة. مكنتنا النتائج المتحصل عليها من فهم وبطريقة واضحة تأثير بعض العوامل كالأبعاد الهندسية، المعطيات الجوية، ووجود او انعدام نظام التخزين الحراري على كفاءة المحطة. استنتجنا ان حساسية الأداء لهذه العوامل تختلف من عامل لآخر. تعتبر خلاصة هذا العمل نتائج ابتدائية يمكن استغلالها لتنصيب محطة توليد لطاقة الكهربائية ذات البرج الشمسي في منطقة ادرار.

الكلمات المفتاحية: محطة توليد الطاقة الكهربائية ذات البرج الشمسي، تحليل الأداء الطاقوي، التخزين الحراري.

Résumé :

Le travail présenté dans ce mémoire est relatif à l'analyse des performances énergétiques des centrales à cheminées solaires sans et avec stockage thermique. La prédiction des performances a été établie théoriquement en se basant sur des modèles mathématiques (modèles de Schlaich et Hammadi). Les modèles mathématiques ont été validés expérimentalement et théoriquement par des résultats issus de la littérature. Les résultats obtenus ont permis de mieux comprendre l'influence de la variation de quelques paramètres techniques (hauteur et diamètre de la cheminée et diamètre du collecteur), la variation des conditions météorologiques, la présence ou l'absence d'un système de stockage et la variation des paramètres du système de stockage sur le fonctionnement des centrales à cheminée solaire. Ce travail peut être considéré comme une étude énergétique et technique préliminaire pour un projet d'implantation de centrales à cheminée solaire dans la région d'Adrar.

Mots clés : Centrale à cheminée solaire ; Analyse de performances énergétiques ; Stockage thermique.

Abstract :

The present work is dedicated to the performance analysis of solar updraft tower power plants with and without thermal storage system implementation. The performances prediction is carried out according to Schlaich's and Hammadi's mathematical models. Good agreement is observed between the results of this study and those obtained experimentally and theoretically from the literature review. Obtained results enable us to understand the influence of meteorological conditions, the thermal storage implementation with and without storage system parameters variation on solar tower power plants operating system. This work is considered as a technical and energetic preliminary study for solar updraft tower power plants setting up project in the region of Adrar.

Keywords: Solar tower power plant; Energetic performances analysis; Thermal storage.

Remerciements

Avant tout, on remercie ALLAH tout puissant de nous avoir donné la volonté et le courage de mener à bien ce travail.

Un grand merci à notre Directeur de mémoire, Monsieur Salah LARBI, Professeur à l'E.N.P, de nous avoir guidé par ses précieux conseils lors de la réalisation de ce projet. Grâce à sa grande modestie et surtout à sa disponibilité que nous avons pu mener ce travail et le soutenir publiquement dans les délais.

Nous tenons à remercier tous les membres de jury qui nous ont fait l'honneur d'avoir accepté de juger le travail développé dans ce mémoire : Bouzid Benkoussas, Maître de Conférence- A, Président de Jury et Mohamed Tarek ATTOUCHI, Maître assistant- A, Examineur. Nos sincères remerciements vont également à Mme Bendaïkha Wahiba, Maître de Recherches au CDER d'avoir répondu favorablement à notre demande en sa qualité d'invité.

Enfin, on ne pourra terminer ces remerciements sans une pensée à l'ensemble de nos enseignants, en particulier ceux du département de génie mécanique. Qu'ils trouvent ici, l'expression de notre profonde gratitude

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail

A mes chers parents. Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel et ma considération pour les sacrifices que vous avez consenti pour mon instruction et mon bien être.

Je vous remercie pour tout le soutien et l'amour que vous me portez depuis mon enfance. Que ce modeste travail soit l'exaucement de vos vœux tant formulés, le fruit de vos innombrables sacrifices, bien que je ne vous en acquitterai jamais assez. Puisse Dieu, le Très Haut, vous accorder santé, bonheur et longue vie et faire en sorte que jamais je ne vous déçoive.

A mes chers frères, Mohamed, pour toute son aide et sa présence, Walid, pour ses attentions et sa présence et Djamel, mon adorable petit frère. En témoignage de mon affection fraternelle, de ma profonde tendresse et reconnaissance, je vous souhaite une vie pleine de bonheur et de succès et que Dieu, le tout puissant, vous protège et vous garde.

A mon épouse, pour son soutien moral, ses conseils et ses encouragements.

A ma tante Souad, pour sa compréhension, son soutien et sa tendresse.

A mon frère et binôme Abdeldjalil, En souvenir de notre sincère et profonde amitié et des moments agréables que nous avons passés ensemble.

A tous mes amis depuis mon enfance.

A tous ceux qui m'ont enseigné.

A toute ma famille aussi nombreuse qu'elle soit.

Trouvez ici l'expression de ma profonde gratitude et reconnaissance.

K. Meliani

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail

A ma mère et mon père, Fatiha et Mustapha, à qui, aucune expression ni acte ne peuvent décrire ni rendre les innombrables faveurs qu'ils ont fait pour moi, qu'Allah, le tout puissant, les protège, les bénisse et les gratifie dans cette vie et dans celle d'après par le meilleur des récompenses.

A mon grand frère Ahmed, qui m'a aidé, conseillé et dirigé le long de mon cursus lycéen et universitaire.

A mon petit frère Boualem, pour l'intérêt qu'il a porté envers mes études et pour le soutien qu'il m'a apporté.

A mon cher ami Khaled, qu'Allah, le tout puissant, te donne T.T.F, B.D.F, B.D.E et un P.D.V.A.M !!!

A tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin dans mon cursus étudiant, proches, enseignants, amis, voisins.

Merci à tous

A.Taghourt

Tables des matières

Résumé	I
Remerciements	II
Dédicaces	III
Tables des matières	V
Liste des figures	VIII
Listes des tableaux	IX
Introduction générale	1
Chapitre I : Energie solaire et stockage thermique	
I.1. Introduction	6
I.2. Les énergies renouvelables	6
I.2.1. L'énergie solaire :	7
I.2.2. L'énergie éolienne :	8
I.2.3. L'énergie hydraulique :	8
I.2.4. La géothermie :	8
I.2.5. La biomasse :	8
I.3. Exploitation de l'énergie solaire	9
I.3.1. Caractères particuliers	9
I.3.2. Conversion de l'énergie solaire :	10
I.3.2.1. Conversion thermique à basse température :	10
I.3.2.2. Conversion thermique à haute température :	11
I.3.2.3. Conversion photovoltaïque :	12
I.4. Estimation du gisement solaire d'un endroit terrestre	13
I.4.1. Estimation du gisement solaire	13
I.5. Types de rayonnement solaire	16
I.6. Stockage d'énergie	17
I.5.1. Importance du stockage d'énergie	18
I.5.2. Taille et durée du stockage	18
I.5.3. Applications du stockage	19
I.5.3.1. Stockage thermique	19
I.5.3.1. 1. Stockage thermique sensible :	20
I.5.3.1. 2. Stockage thermique latent	23
Chapitre II : Généralités sur les cheminées solaires	
II.1. Historique.....	28
II.2. La centrale cheminée solaire	28

II.2.1. Principaux constituants de la CCS :.....	28
II.2.1.1. Le Collecteur :.....	29
II.2.1.2. La Turbine :.....	30
II.2.1.3. La cheminée :.....	31
II.2.2. Principe de fonctionnement d'une CCS :.....	32
II.2.3. Avantages et Inconvénients d'une tour solaire :.....	32
II.2.3.1. Avantages [3]:.....	32
II.2.3.2. Inconvénients [3] :.....	33
II.2.4. Stockage dans les CCS :.....	33
II.2.4. 1. Le sol comme milieu de stockage :.....	33
II.2.4. 2. Les galets comme milieu de stockage :.....	33
II.2.4. 3. L'eau comme milieu de stockage :.....	34
II.2.4. 4. D'autre milieu de stockage :.....	34
II. 3. Les projets :.....	35
II.3.1. Le prototype de Manzanares :.....	35
II.3.2. Le projet espagnol :.....	36
II.3.3. Le projet Australien (Buronga) :.....	37
Chapitre III : Etat de l'art sur les centrales à cheminée solaire	
III.1 .Etudes théoriques sur les CCS :.....	41
III.2. Etudes théoriques sur les CCS avec stockage :.....	48
III.3. Etudes expérimentales :.....	51
III.4. Etudes économiques :.....	53
Chapitre IV : Modélisation mathématique des transferts thermiques dans les CCS	
IV.1. Introduction :.....	56
IV.2. Equations de bilans énergétiques relatives aux centrales à cheminées solaires sans stockage thermique : (Modèle de Schlaich [6]).....	57
IV.2.1. Rendement de la centrale à cheminée solaire (CCS) :.....	57
IV.2.2. Puissance mécanique produite par la centrale :.....	63
IV.3. Equations de bilans énergétiques relatives aux centrales à cheminées solaires avec stockage thermique : (Modèle de Hammadi [55]).....	64
IV.4. Développement du modèle mathématique :.....	67
Chapitre V : Résultats et discussions	
V.1. Introduction.....	71
V.2. Données météorologiques du site, objet de l'étude:.....	71
V. 3. Analyse des performances énergétiques des CCS sans stockage thermique.....	73
V.3.1. Application du prototype de Manzanares au site d'Adrar.....	73
V.3.2. Etude de CCS pour une production à grande échelle.....	75

V.3.3. Influence de certains paramètres sur la puissance électrique produite	77
V.3.3.1. Variation du diamètre du collecteur en fonction de la puissance produite :.....	77
V.3.3.2. Variation de la hauteur de la cheminée en fonction de la puissance produite :	78
V.3.3.3. Variation de la vitesse, V_c , en fonction du diamètre du collecteur :.....	79
V.4. Analyse des performances énergétiques des CCS avec stockage thermique	80
V.4.1. Validation du modèle mathématique:.....	80
V.4.1. 1. Validation par la température de l'air à la sortie du collecteur	80
V.4.1. 2. Validation par la puissance électrique produite :.....	81
V.4.2. Effets de la variation des paramètres techniques sur la puissance électrique :.....	83
V.4.2. 1. Effet de la hauteur du stockage (Hs) :	85
V.4.2.2. Effet du diamètre de la cheminée :	86
V.4.2.3. Effet de la hauteur de la cheminée :.....	88
V.4.2.4. Effet du rayon du collecteur :	90
V.4.2.5. Effet de la variation de la vitesse du vent :	91
Conclusion générale.....	94
Bibliographie.....	97

Liste des figures

Figure I-1 Cubes de répartitions d'énergies [1].....	7
Figure I-2 Photo d'un Pyranomètre Eppley modèle PSP [1].....	13
Figure I-3 Photo d'une pyréliomètre [1].	14
Figure I-4 Vue d'un héliographe.....	15
Figure I-5 Composantes du rayonnement solaire atmosphérique.....	17
Figure II-1 Photo de la cheminée solaire de Manzanares [24].	28
Figure II-2 Schéma d'une centrale à cheminée solaire.	29
Figure II-3 Vue intérieure du collecteur d'une CCS [24].	30
Figure II-4 Photo d'une turbine d'une centrale à cheminée solaire.	30
Figure II-5 Photo de cheminée d'une CCS.	31
Figure II-6 Schéma de la cheminée solaire de BURONGA.	38
Figure II-7 Photo de la CCS d'Arizona.....	39
Figure IV-1 Modèle physique d'une CCS avec stockage thermique.	65
Figure V-1 Variation de l'irradiation solaire et la température ambiante avec le temps.	71
Figure V-2 Variation de l'irradiation solaire et la température ambiante avec le temps	71
Figure V-3. Variation de l'irradiation solaire et la température ambiante avec le temps.	72
Figure V-4. Variation de l'irradiation solaire et la température ambiante avec le temps.	72
Figure V-5. Variation de l'irradiation solaire	72
Figure V-6. Variation de l'irradiation solaire et la température ambiante avec le temps	72
Figure V-7. Variation de l'irradiation solaire	72
Figure V-8. Variation de l'irradiation solaire	72
Figure V-9 Variation de la puissance en fonction du temps pour le mois de janvier	74
Figure V-10 Variation de la puissance en fonction du temps pour le mois de février.....	74
Figure V-12 Variation de la puissance en fonction du temps pour le mois de avril	74
Figure V-11 Variation de la puissance en fonction du temps pour le mois de mars	74
Figure V-13 Variation de la puissance en fonction du temps pour le mois de mai	74
Figure V-14 Variation de la puissance en fonction du temps pour le mois de juin	74
Figure V-16 Variation de la puissance en fonction du temps pour le mois de aout.....	75
Figure V-15 Variation de la puissance en fonction du temps pour le mois de juillet	75
Figure V-17 Puissance produite durant le mois de Janvier.	76
Figure V-18 Puissance produite durant le mois de Février.	76
Figure V-19 Puissance produite durant le mois de Mars.....	76
Figure V-20 Puissance produite durant le mois d'Avril.	76
Figure V-21 Puissance produite durant le mois de Mai.	76
Figure V-22 Puissance produite durant le mois de Juin.	76
Figure V-23 Puissance produite durant le mois de Juillet.	77
Figure V-24 Puissance produite durant le mois d'Aout.....	77
Figure V-25 Variation du diamètre du collecteur en fonction de la puissance produite.....	78
Figure V-26 Variation de la hauteur de la cheminée en fonction de la puissance produite.....	78
Figure V-27 Variation de la vitesse d'écoulement d'air en fonction	79
Figure V-28 (a) : Données météorologiques du 2 septembre 1982 du site de Manzanares	81
Figure V-29 (a)- Rayonnement horizontale journalier ; (b)- Puissance électrique produite.....	82
Figure V-30 Données météorologiques d'Adrar relatives aux mois de juillet et décembre.	84

Figure V-31 Puissance électrique produite pour différentes épaisseurs de stockage et correspondants aux mois de Juillet et Décembre (Cas du site de Manzanares).	85
Figure V-32 Puissance électrique produite pour différentes épaisseurs de stockage et correspondants aux mois de Juillet et Décembre (Cas de la CCS de 200 MW).	85
Figure V-33 Effet du diamètre de la cheminée sur la puissance produite (Site de Manzanares).	87
Figure V-34 Effet du diamètre de la cheminée sur la puissance produite (CCS de 200 MW).	88
Figure V-35 Effet de la hauteur de la cheminée sur la puissance produite	89
Figure V-36 Effet de la hauteur de la cheminée sur la puissance produite (CCS de 200 MW).	89
Figure V-37 Effet du rayon du collecteur sur la puissance produite (Site de Manzanares).	90
Figure V-38 Effet du rayon du collecteur sur la puissance produite (CCS de 200 MW).	91
Figure V-39 Effet de la vitesse du vent sur la puissance produite (Site de Manzanares).	92
Figure V-40 Effet de la vitesse du vent sur la puissance produite (CCS de 200 MW).	92

Listes des tableaux

Tableau V-1 Dimensions de la CCS fonction de la puissance fournie.	75
Tableau V-2 Dimensions de la CCS de Manzanares avec celle de 200MW.	84

Nomenclature

A	Surface	m^2
C_p	Chaleur spécifique	$J/(kg.K)$
D	Diamètre	M
f	Facteur de frottement	
G	Rayonnement solaire incident	W/m^2
g	Accélération de la gravité	m/s^2
h	Coefficient de transfert thermique	$W/(m^2.K)$
H	Hauteur	m
k	Conductivité thermique	$W/(m.K)$
\dot{m}, Ma	Débit massique de l'air	kg/s
m	Masse	kg
η	Rendement	
P	Puissance	W
Δp	Différence de pression	Pa
Pr	Nombre de Prandtl	
\dot{Q}	Gain en puissance thermique	W
Q_v	Débit volumétrique	m^3/s
ρ	Masse volumique	kg/m^3
R	Rayon	m
Re	Nombre de Reynolds	
T	Température	K
ΔT	Différence de températures	K
Δt	Pas de temps	s
u, v	Composantes du vecteur vitesse	m/s
\bar{u}	Vitesse moyenne	m/s

V	Vitesse	m/s
r, z	Coordonnées	m

Indices

0	Ambiante
∞	A l'extérieur du collecteur
a	Air
a,o	Air à la sortie du collecteur entrée cheminée
a,i	Air à l'entrée du collecteur
coll	Collecteur
d	Dynamique
e	Environnement
h	Hydraulique
i	A l'intérieur du collecteur
max	Maximale
s	Statique / milieu du stockage
t	Cheminée
tot	Totale
w	Vent
wt	Aérogénérateur

Lettres grec

α	Coefficient d'absorption effective du rayonnement solaire du collecteur
β	Coefficient de pertes énergétiques englobant les pertes par convection, par radiation et par stockage de sol (Pertes corrigées en W/m^2K)

Introduction générale

La demande énergétique mondiale est en nette croissance et les problèmes environnementaux liés à l'utilisation irrationnelle des combustibles d'origine fossile sont de plus en plus alarmants. C'est ainsi que la recherche d'une solution énergétique fiable et respectueuse de l'environnement est devenue une priorité pour tous les états, particulièrement ceux concernés par la signature des protocoles environnementaux (Kyoto, etc..) [1].

Les sources d'énergie traditionnelles (pétrole, gaz naturelle et charbon) satisfont à présent les besoins énergétiques mondiaux. Néanmoins, ces combustibles fossiles ne sont pas des sources d'énergies renouvelables et sont par conséquent menacés d'épuisement sans parler de leur caractère polluant pour l'atmosphère. Dans ce contexte, les énergies renouvelables se présentent comme étant une solution complémentaire dans le mixte énergétique afin de réduire la dépendance énergétique exclusive des combustibles fossiles tout en réduisant les gaz à effet de serre, premiers responsables du réchauffement climatique [2].

L'énergie solaire est une des formes d'énergies renouvelables. Elle se distingue par plusieurs propriétés attirantes tout en étant considérée comme un atout énergétique pour plusieurs pays ayant un bon taux d'ensoleillement annuel. L'un des inconvénients majeurs de l'énergie solaire est son intermittence (jour et nuit, ciel clair ou nuageux etc.). Des solutions d'appoint sont donc indispensables à prévoir. Ces solutions sont généralement coûteuses et assez complexes, et souvent à base d'énergie non renouvelable, remettant ainsi en cause cette solution énergétique. Le stockage thermique est considéré comme l'une des solutions proposées [3].

L'Algérie est l'un des pays du monde qui dispose d'une grande diversité de ressources énergétiques. Les chiffres montrent qu'elle dispose d'un gisement solaire énorme mais très peu exploité [4]. Plusieurs facteurs en sont la cause : technologies très avancés maîtrisés par un nombre limité de sociétés, technologies très chères nécessitant une main d'œuvre bien formée etc...

Les centrales cheminées solaires (CCS) sont mieux adaptées pour les régions arides, où d'immenses surfaces sont disponibles et où le rayonnement solaire est très important. La construction des cheminées solaires ne nécessite pas une technologie très avancée et

représente une solution bien adaptée pour les pays en voie de développement. Leur principe de fonctionnement est relativement simple : l'air, fluide moteur de la cheminée solaire, est chauffée par effet de serre dans un collecteur, la variation de sa densité sous l'effet de la température, engendre un mouvement d'ascension dans la tour cheminée, entraînant ainsi en rotation une ou plusieurs turbines pour produire de l'électricité [5].

Il est à souligner que le 1^{er} prototype de Centrale à Cheminée Solaire a vu le jour dans les années 1980 à Manzanares (Espagne). L'objectif du prototype construit dans le cadre d'une coopération entre les gouvernements allemand et espagnol est d'une part de valider le modèle théorique de Schlaich et al. [6] et d'autre part de bien comprendre la physique des phénomènes ayant lieu dans ces centrales. L'aspect relatif aux techniques de construction n'est pas à négliger pour la maîtrise de la construction d'autres types de centrales à grande échelle.

Le problème de l'intermittence des rayons solaires affecte directement le fonctionnement des Centrales à Cheminée Solaire, compte tenu que ces centrales produisent par ce qui dénommé par « l'électricité solaire ». On parle donc d'une électricité dépendante d'une source d'énergie variable et non continue.

Parmi les multiples solutions à prévoir pour la production continue d'électricité, nous avons choisi le stockage thermique, qui semble, selon la littérature, avoir le plus de chance d'être couronné de succès. C'est la raison pour laquelle nous nous sommes intéressés, dans ce modeste travail, de montrer l'efficacité d'une telle solution, d'un point de vue énergétique et technique.

Afin de pouvoir mener à bien cette étude et analyser l'effet du stockage sur les performances énergétiques des centrales à cheminée solaire, nous avons structuré notre mémoire en cinq chapitres principaux :

Le premier chapitre est relatif à des notions sur l'énergie solaire et le stockage thermique.

Le second chapitre traite des généralités sur les centrales à cheminée solaire.

Le troisième chapitre est dédié à une revue bibliographique décrivant les différents travaux de recherches sur les performances énergétiques des centrales à cheminée solaire sans et avec stockage thermique.

Le quatrième chapitre concerne l'aspect modélisation mathématique des processus de transfert dans les centrales à cheminée solaire. Y sont décrits le modèle de base de Schlaich et al. [6] et d'autres modèles issus de la littérature.

Le cinquième chapitre est relatif aux résultats et discussions, la première partie de ce chapitre traite l'aspect performances des CCS sans stockage thermique et analyse l'influence des conditions météorologiques et géométriques des CCS sur la production d'électricité. Dans la seconde partie du chapitre sont analysées les performances énergétiques de ces centrales par une prise en compte du stockage thermique. La même approche est reprise afin de pouvoir montrer et justifier l'importance et la nécessité du stockage dans ce type de centrales.

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
Energie solaire et stockage d'énergie

Energie solaire et stockage d'énergie

I.1. Introduction

Due à la croissance de la population mondiale et l'avancement de la modernisation, la demande globale en énergie est prévue de doubler durant la première moitié du 21^{ème} siècle et de tripler vers sa fin. Cette augmentation en demande d'énergie s'accompagne avec l'augmentation des prix d'énergie, avec la diminution de sa disponibilité et et avec la croissance de l'inquiétude au sujet de l'environnement, une diversification de formes énergétiques mondiales est prévue [4].

Les problèmes environnementaux deviennent de plus en plus inquiétants avec la croissance de la population mondiale, l'accroissement de l'activité industrielle et surtout de la consommation pratiquement exclusivement focalisée sur les énergies d'origine fossile. Les analyses environnementales se concentraient depuis toujours sur les polluants conventionnels comme le dioxyde de sulfure (SO₂), les oxydes de nitrogène (NO_x), les particules et le monoxyde de carbone (CO). Au cours de ces dernières décennies, l'inquiétude environnementale s'est étendue vers le contrôle des polluants d'air. Ces polluants sont généralement des substances chimiques toxiques nuisibles, même en petites doses. D'autres polluants qu'on considère à impact important à l'échelle planétaire comme le dioxyde de carbone (CO₂) ont reçu une attention particulière. Les effets de ces polluants sont multiples et l'apparition de certains changements climatiques non habituels en sont la preuve : pluies acides, inondations, élévation de la température, montée du niveau de la mer, altération de la couche d'ozone et effet de serre [7].

I.2. Les énergies renouvelables

Vers la moitié du XX^{ème} siècle, les Energies Renouvelables ont connus un essor sans précédent. Jusque-là, les Etats, les industriels, et nous aussi consommateurs, avons longtemps négligé ces énergies naturellement offertes par la planète au profit d'énergies immédiatement plus rentables, mais aussi plus coûteuses pour l'environnement comme le nucléaire, le raffinage de pétrole ou encore le gaz. Néanmoins, ces énergies souvent d'origine fossile, ne sont pas renouvelables et sont par conséquent menacées d'épuisement.

La prise de conscience environnementale, à l'échelle mondiale, de l'épuisement inéluctable des énergies non renouvelables et les effets catastrophiques sur l'environnement et le

réchauffement climatique, a relancé de nouveau les réflexions sur la diversification des formes énergétiques, particulièrement le recours aux énergies renouvelables à travers d'énormes investissements, et surtout le lancement de projets de recherches en vue de développer de nouvelles technologies dans ce domaine dans le soucis de réduire le retour d'investissement des installations industrielles [3]

Les énergies, solaires, éoliennes, hydrauliques, géothermiques conjointement à la biomasse sont les formes les plus courantes d'Énergies Renouvelables. Ces énergies trouvent des applications adaptées et respectueuses de l'environnement dans de multiples domaines.

I.2.1. L'énergie solaire :

Le soleil est une étoile autour de laquelle gravite la terre. Son énergie provient des réactions thermonucléaires de fusion de l'hydrogène en hélium. Sa température superficielle moyenne est estimée à 5800K. La surface lumineuse habituellement visible, ou photosphère, est d'environ 100 km d'épaisseur. La chromosphère est la couche inférieure de l'atmosphère solaire, entre la photosphère et la couronne. Le globe solaire limité par la photosphère à un rayon égal à 696000km, soit environ 109 fois le rayon équatorial de la terre. Sa densité moyenne n'est que de 1,41 de sorte que sa masse est seulement 333.000 fois celle de la terre, pour un volume 1300000 fois plus important. La distance moyenne de la terre au soleil est voisine de 150 millions de km. Le rayonnement solaire met environ 8 minutes pour nous parvenir.

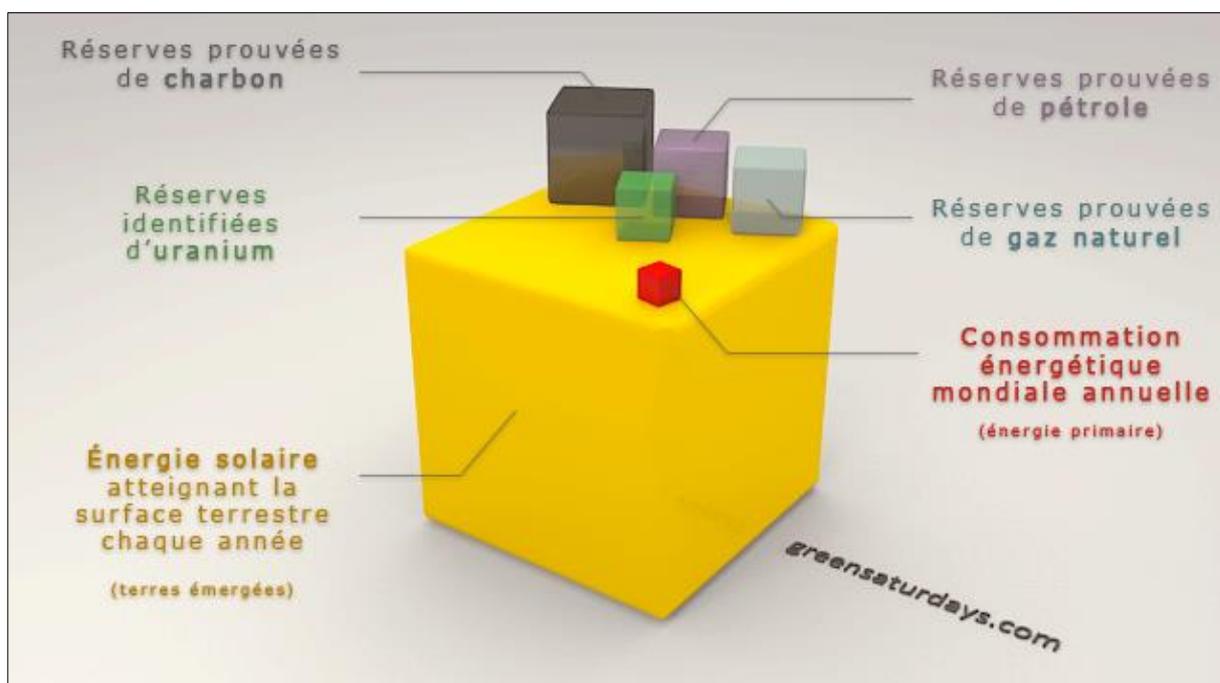


Figure I-1 Cubes de répartitions d'énergies [1]

L'énergie solaire est l'énergie qui maintient la vie sur terre. Elle représente une solution pouvant satisfaire nos besoins en énergie propre dans le futur. L'énergie solaire est la source d'énergie propre la plus large. Presque toutes formes d'énergies renouvelables sont essentiellement des dérivées de l'activité solaire : le vent, le rayonnement solaire, la force de l'eau sont des produits directs ou indirects de l'activité solaire. Le Soleil envoie chaque année à la surface de la Terre à peu près 10 000 fois plus d'énergie que la planète en consomme. Il est donc légitime d'essayer d'en tirer profit. La figure I.1 montre les cubes de répartition d'énergies (renouvelables et non renouvelables).

I.2.2. L'énergie éolienne :

Le principe d'utilisation de l'énergie éolienne consiste à utiliser la force propulsive du vent quand sa vitesse est supérieure à 15 km/heure, pour faire tourner une génératrice et produire de l'électricité. Il s'agit aussi d'une énergie très propre par rapport à l'environnement. Le stockage d'énergie produite constitue la principale contrainte. Quant au prix de revient il est pour le moment 3 à 4 fois supérieur au prix moyen de l'énergie non renouvelable (pétrole, nucléaire et charbon) [8].

I.2.3. L'énergie hydraulique :

Elle consiste à utiliser l'énergie mécanique de l'eau pour faire tourner une turbine et un alternateur pour produire de l'électricité. Son principal avantage est qu'elle soit très propre, et son prix est très bas par rapport aux autres énergies. Elle est abondante dans les régions disposant d'un réseau hydrographique très dense. La principale contrainte relève de l'inondation de grands espaces par les barrages, et des accidents survenus au niveau des barrages, souvent plus meurtriers que ceux occasionnés par les autres énergies [8].

I.2.4. La géothermie :

Le principe consiste à exploiter les écarts de températures existant dans le sous-sol à travers l'utilisation particulières des eaux thermales (sous forme liquide ou vapeur) pour le chauffage ou la production d'électricité. C'est une énergie très propre et peu coûteuse mais très localisée dans de régions à vocation géothermiques [8].

I.2.5. La biomasse :

Elle est relative à la transformation des déchets d'origine végétale ou organique en énergie. La biomasse est l'une des énergies renouvelables les plus rentables, elle est disponible partout et peut être transformée en différentes sources d'énergie. Elle est par contre relativement

polluante (pollue les eaux et les sols) et dégage du CO₂ en entraînant une déforestation importante en cas de sur-utilisation du bois, donc un danger pour l'environnement [8].

I.3. Exploitation de l'énergie solaire

L'énergie solaire est l'énergie due au rayonnement du Soleil. Des ondes radio aux rayons gamma en passant par la lumière visible, tous ces types rayonnements sont constitués de photons, les composants fondamentaux de la lumière et les vecteurs de l'énergie. L'énergie solaire est issue de réactions de fusion nucléaire qui animent le Soleil [9].

Il s'agit d'une énergie renouvelable par excellence surtout pour les pays qui bénéficient d'un ensoleillement presque continu comme l'Algérie. Le principal avantage correspond à sa pérennité, dont on n'envisage pas l'extinction avant plusieurs milliards d'années, et surtout l'absence totale de nuisance sur l'environnement par rapport à toutes les autres formes d'énergies renouvelables ou non renouvelables.

Il existe néanmoins quelques contraintes ayant fait l'objet de critiques sur cette forme d'énergie dont on peut citer : l'intermittence de l'ensoleillement. En effet, cette contrainte correspond au temps d'exposition moyen du lieu géographique où on se situe et où on souhaite produire cette énergie. Il est très variable d'une région à une autre, et surtout par rapport aux périodes de recours à l'énergie (jour et nuit). Le prix de revient représente lui aussi une contrainte importante malgré d'énormes progrès en matière de rendement des panneaux solaires, de stockage et de conversion [9].

I.3.1. Caractères particuliers

L'énergie solaire est la seule source d'énergie externe de la terre, elle présente les propriétés suivantes [10]:

- Elle est universelle et sa densité de puissance maximale est de 1kW/m² à midi par ciel bleu sur toute la planète ;
- La densité de puissance maximale reçue au niveau du sol (1 kW/m²) est peu dense on parle alors d'énergie diffuse ;
- Elle est abondante où notre planète reçoit plus de 104 fois l'énergie que l'humanité consomme ;
- Elle est intermittente et variable à cause de l'alternance du jour et de la nuit, des variations saisonnières et quotidiennes de l'ensoleillement.

- L'énergie reçue par une surface donnée n'est pas récupérable en totalité ceci est dû aux pertes d'énergie sous formes conductrice, convective ou rayonnante.
- Elle est propre.

I.3.2. Conversion de l'énergie solaire :

1.3.2.1. Conversion thermique à basse température :

➤ *Les serres :*

Le rayonnement solaire, seule forme d'énergie transmissible à grande distance sous forme d'ondes électromagnétiques, est absorbée (inégalement) par les objets qui y sont exposés, et est converti en chaleur. Si de plus on expose des objets au rayonnement solaire à travers une paroi de verre, les fréquences correspondant au rayonnement infrarouge sont arrêtées, « piégées » par le verre : c'est ce que l'on connaît sous le nom d'effet de serre. Les serres pour cultures florales ou maraîchères sont connues depuis longtemps ; elles assurent des récoltes précoces. L'effet de serre peut être avantageusement complété au moyen d'un réchauffage par ruissellement sur les parois, en faisant appel à la géothermie basse température ou à la récupération de rejets industriels, ceux des centrales électronucléaires par exemple [3].

➤ *Les capteurs solaires :*

Les capteurs solaires plans sont constitués d'un caisson fermé par un couvercle en verre, et renfermant une canalisation parcourue par de l'eau (fluide caloporteur). Tout l'intérieur est peint en noir de façon à absorber le maximum de rayonnement. Le rendement d'un capteur bien réalisé dépasse 50 % et permet de produire l'eau chaude sanitaire d'une habitation. La température atteinte ne dépasse pratiquement pas 80 °C. Le couplage de capteurs solaires avec un chauffe-eau électrique assure la fourniture d'eau chaude quelles que soient les conditions d'ensoleillement. En effet, le gain d'un tel chauffe-eau solaire peut être estimé à environ 50 % de la dépense annuelle, avec un amortissement du surcoût d'installation sur une dizaine d'années.

Les capteurs à concentration permettent d'atteindre des températures supérieures à 150 °C. Une surface réfléchissante de forme cylindrique concentre le rayonnement solaire sur un récepteur parcouru par le fluide caloporteur. L'eau chaude produite peut être utilisée directement pour le chauffage de locaux, de serres, de piscines, ou à des fins industrielles. Elle

peut aussi être transformée en travail mécanique ou électrique de façon très classique, avec toutefois un faible rendement dû à la température trop basse de la source chaude [3].

➤ *Les maisons solaires :*

Le rayonnement solaire peut aussi servir à chauffer directement des locaux d'habitation. Des maisons solaires ont été expérimentées dans des sites variés, les meilleurs étant ceux qui correspondent à un ensoleillement annuel maximal. La construction doit être fermée vers le nord, ouverte au sud et la collecte de l'énergie se fait par les murs, par les panneaux solaires, et éventuellement par une serre ; un système de chauffage d'appoint doit être prévu. Les difficultés proviennent de l'irrégularité du rayonnement, suivant la latitude du lieu, la saison, l'heure de la journée, et l'état de l'atmosphère. De plus, le soleil manque essentiellement quand on en a le plus besoin, de l'automne au printemps. Un stockage de la chaleur est donc primordial, et de préférence sur une longue période, afin d'utiliser en hiver la chaleur captée et stockée pendant l'été [3].

I.3.2.2. Conversion thermique à haute température :

➤ *Le four solaire :*

Le principe mis en œuvre est la concentration du rayonnement solaire avec un facteur multiplicateur beaucoup plus grand que dans le cas précédent relatif aux basses températures. Le meilleur exemple en est le four solaire d'Odeillo, créé en 1968 en Cerdagne, successeur de celui de Lavoisier, après les fours de Meudon (1946) et de Mont Louis (1949).

A Odeillo, le rayonnement solaire est capté par un « champ » de 63 miroirs plans orientables de 45 m² chacun, puis réfléchi sur un miroir parabolique formé de 9 500 miroirs élémentaires de 0,45 m de côté courbés par contrainte mécanique. Le faisceau convergent ainsi obtenu permet d'atteindre une puissance de 1 MW, soit 1 000 fois la puissance reçue au sol.

Les matériaux exposés à ce rayonnement peuvent être portés à des températures de 1 500 à 3 800 °C. Les recherches portent sur les réactions à hautes températures, les propriétés mécaniques et électriques des matériaux et la préparation d'oxydes réfractaires de grande pureté [3].

➤ *La centrale thermique :*

La centrale thermique « **Thémis** », construite en 1976, à Targassonne, dans les Pyrénées-Orientales a permis d'étudier les problèmes liés à la conversion du rayonnement solaire en électricité. La concentration d'énergie était obtenue par des miroirs plans orientables sur une chaudière placée au sommet d'une tour. Avec comme fluide caloporteur des sels fondus portés

à 450 °C et un système de stockage indispensable, la puissance électrique atteinte était de 2,5 MW. L'exploitation de Thémis a été arrêtée en 1986 (le prix de revient du kWh était alors de 10 F contre 0,23 F pour le kWh nucléaire), mais les installations sont utilisées pour des expériences d'astrophysique. En Californie, huit centrales d'une puissance totale de 275 MW produisent de l'électricité à une période de la journée qui correspond à une forte utilisation des climatiseurs. Ces centrales sont reliées à des centrales thermiques à gaz [3].

I.3.2.3. Conversion photovoltaïque :

C'est la transformation directe du rayonnement solaire en électricité dans une photopile. L'effet photovoltaïque découvert en 1839 par Antoine Becquerel est produit généralement dans des disques très minces de silicium monocristallin dont des zones superposées sont dopées par des atomes de bore et de phosphore, une tension de 0,6 V apparaît entre ces zones. Les photons incidents entrent en collision avec les atomes de la cellule et provoquent un mouvement des charges (électrons) entre les deux zones. L'intensité du courant continu fourni est de 0,03 A/cm² de cellule [3].

Avec un prix de revient de l'ordre de cinq (5) euros le watt installé, un rendement de l'ordre de 15 % pour les photopiles industrielles, une durée de vie de 15 à 20 ans, et une grande sensibilité à l'humidité, ce type de convertisseur d'énergie est principalement intéressant pour les installations difficilement raccordables à un réseau de distribution électrique : balises, signalisation routière aérienne ou maritime, relais hertziens, systèmes de pompage, habitations isolées. Le développement des photopiles passe par une amélioration du rendement de conversion et un abaissement substantiel du prix de revient. Des matériaux autres que le silicium cristallin font l'objet de recherches et/ou de développements, tel le silicium amorphe qui revient moins cher (utilisé dans les calculettes, montres, détecteurs, capteurs) et le silicium poly cristallin à l'arséniure de gallium. Une installation de 20 m², qui produira environ 2 000 kWh par an, revient en moyenne à 15 000 € TTC pose comprise. Les recettes annuelles dues à la vente du courant ne dépassent pas 300 €, l'investissement n'est donc rentable qu'après 50 ans !

Des centrales électriques sont en cours d'expérimentation en Allemagne, en Suisse, en Espagne, ainsi qu'en Italie qui détient la plus puissante pour l'Europe : 2 600 000 cellules pour une puissance de 3,3 MW.

I.4. Estimation du gisement solaire d'un endroit terrestre

L'installation d'une centrale de conversion d'énergie solaire en énergie électrique nécessite généralement un investissement colossal. Cet investissement doit être justifié par la rentabilité de cette centrale qui, d'une part doit remplacer une centrale à base d'énergie fossile de même "objectif de production " et d'autre part doit afficher un profit satisfaisant. Afin que cette centrale puisse réaliser ces deux objectifs, plusieurs facteurs doivent être pris en considération : économiques, techniques, logistiques etc. Dans le cadre de notre étude on se limitera à la discussion d'un des plus importants facteurs techniques, qui est le gisement solaire caractérisant le lieu d'implantation de la centrale, compte tenu que l'estimation de ce paramètre jouera un rôle primordiale dans l'étude du rendement de la centrale et donc sa rentabilité.

I.4.1. Estimation du gisement solaire

La récolte d'informations relatives au rayonnement solaire s'effectue en général dans les stations météorologiques à l'aide d'instruments de mesures dont les plus utilisés sont : le pyranomètre, le pyréliomètre et l'héliographe.

- **Le pyranomètre**

C'est un instrument qui sert à mesurer le flux global d'irradiation. Il collecte le rayonnement arrivant sur une surface horizontale noircie qui convertit le rayonnement reçu en chaleur puis en électricité. La différence de température entre cette surface et le corps de l'instrument est proportionnelle à l'éclairement énergétique du rayonnement global. Cette différence est mesurée par une thermopile constituée de plusieurs thermocouples montés en série. La figure I.2 montre une photo d'un Pyranomètre.



Figure I-2 Photo d'un Pyranomètre Eppley modèle PSP [1].

Le pyranomètre de Kipp et Zonen est le plus utilisé. Il est constitué d'une thermopile contenue dans un boîtier métallique fermé à sa partie supérieure par deux hémisphères en verre. Ces dernières limitent les échanges par convection ou par conduction moléculaire avec le milieu extérieur.

L'instrument peut aussi mesurer la composante directe de l'irradiation solaire en lui ajoutant une large couronne blanche qui protège la thermopile de la lumière diffusée par le sol et qui joue en même temps le rôle d'écran thermique. Il peut même mesurer la composante diffuse, pour en faire, le pyranomètre doit être muni d'une bande pare-soleil. Cette bande est munie d'un écran annulaire qui est une bande circulaire axée sur la thermopile et parallèle au plan équatorial. Un simple déplacement axial du pare-soleil tous les deux ou trois jours permet d'ajuster la position du pyranomètre en fonction de la déclinaison solaire. La précision du pyranomètre de Kipp et Zonen est de 3 à 4% [11].

▪ *Le pyréliomètre*

C'est un instrument de mesure de la composante directe de l'irradiation solaire. L'instrument est communément désigné sous l'appellation "N.I.P" (Normal incidence pyrhelimeter). Cet appareil est l'un des plus utilisés dans les stations radiométriques. Il est constitué d'un tube en laiton chromé sur sa partie externe, muni d'une thermopile à sa partie inférieure, d'un diaphragme dans sa partie interne et d'une fenêtre de quartz à sa partie supérieure. Une monture équatoriale lui est associée pour le garder constamment pointé vers le disque solaire [11]. La figure I.3 montre une photo d'un pyréliomètre.



Figure I-3 Photo d'une pyréliomètre [1].

▪ *L'héliographe*

L'héliographe mesure la durée d'insolation en dixièmes d'heures. On distingue l'héliographe classique tel que l'héliographe Campbell Stokes et automatique qui peut être statique comportant des cellules photovoltaïques ou dynamique, des thermocouples et un élément tournant [11]. La figure I.4 montre une vue d'un héliographe.

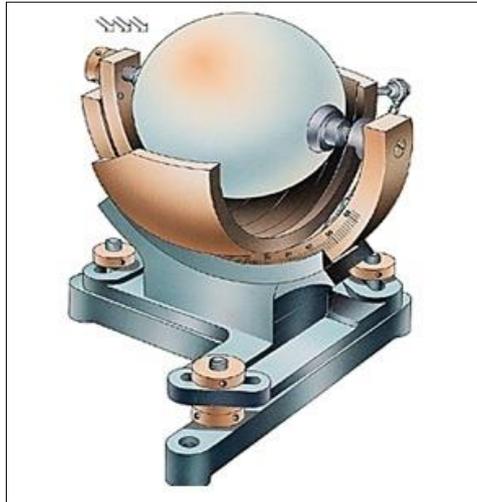


Figure I-4 Vue d'un héliographe.

▪ *Le réseau météorologique Algérien*

La mesure du rayonnement solaire en Algérie est réalisée par l'Office National de la météorologie (O.N.M) à travers son réseau constitué de quatre-vingt et (81) stations météorologiques mesurant la durée d'insolation. Parmi celles-ci, seules sept (07) stations ont assuré entre les années 1970 et 1989 la mesure des composantes diffuses et globales reçues sur le plan horizontal.

De plus, ces séries de mesures comportent des données manquantes causées par des périodes, plus ou moins longues, de non fonctionnement des appareils de mesure. Les informations récoltées en 2011 indiquaient que seules trois (03) stations à savoir celles d'Oran, de Tamanrasset et de Ksar Chellala assuraient d'une manière régulière la mesure du rayonnement solaire sur le plan horizontal.

Huit autres stations automatiques mesurant le rayonnement depuis 2009, ces stations sont : Alger (aéroport), Oran (Sénia), In amenas, Ghardaïa, Annaba, Tamanrasset, Tlemcen et Constantine [12].

- **La nécessité de prévision théorique du gisement solaire**

Dans les régions pourvues de stations météorologiques, fonctionnant régulièrement, depuis une période s'étendant sur plusieurs années et disposant de matériel et de personnel adéquats (pour la qualité et la quantité de mesures) ; dispose de ces données, ce qui rend le travail et l'exploitation de ces dernières plus aisé et surtout plus précis vue qu'on se trouve en présence de valeurs réelles des paramètres. Ainsi toutes les voies d'investigation (traitements statistique, modélisation, corrélation entre paramètres, corrections,...) se trouvent ouvertes afin d'aboutir à des résultats acceptables tant sur le plan théorique, conception de modèle, que pratique.

Néanmoins, pour la majeure partie de sites, les mesures ne peuvent pas avoir lieu et le recours aux méthodes approchées de prédiction des paramètres de gisement est nécessaire pour estimer ces paramètres [13].

I.5. Types de rayonnement solaire

Le rayonnement solaire une fois passé par l'atmosphère peut avoir trois composantes : réfléchi, diffuse ou directe.

- **Rayonnement réfléchi :**

Lorsque le rayonnement réfléchi par une surface est dans une seule et même direction, la réflexion est dite spéculaire. La réflexion spéculaire se produit uniquement sur des surfaces lisses. Le sol réfléchit plutôt le rayonnement de manière anisotrope. L'albédo est défini comme étant l'énergie solaire réfléchi divisée par l'énergie solaire incidente.

- **Rayonnement diffus :**

Elle est dite diffuse lorsqu'elle est renvoyée 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.

A titre d'exemple, l'influence des molécules est plus intense pour les courtes longueurs d'onde que pour les grandes en raison de la loi de diffusion de Rayleigh.

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.

➤ **Rayonnement direct :**

Il correspond au rayonnement arrivant au sol sans avoir subi de diffusion. 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 $0,3 \mu m$ (dans le domaine ultraviolet), au dioxyde de carbone autour de $2,75 \mu m$ et $4,25 \mu m$, mais surtout à la vapeur d'eau dont l'absorption est prépondérante (en particulier autour de $0,9 \mu m$, de $1,1 \mu m$, de $1,4 \mu m$, de $1,9 \mu m$, de $2,4$ à $2,9 \mu m$ et de 3 à $4 \mu m$) et qui module principalement l'allure du spectre solaire reçu au sol.

Il est à souligner que différents modèles existent dans la littérature pour le calcul du rayonnement solaire global [14]. La figure I.5 montre les composantes du rayonnement solaire atmosphérique.

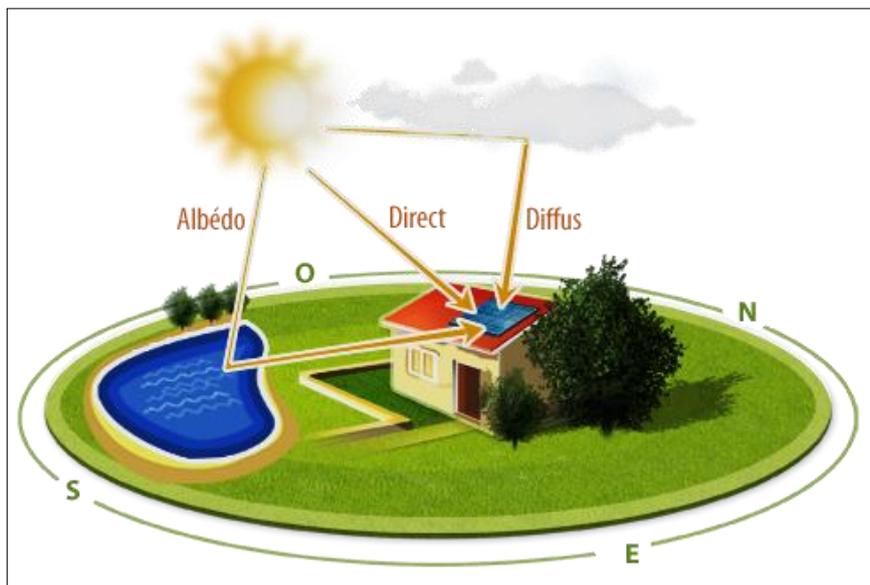


Figure I-5 Composantes du rayonnement solaire atmosphérique.

I.6. Stockage d'énergie

Le stockage de l'énergie thermique est d'une grande utilité dans plusieurs applications d'ingénierie. On peut citer à titre d'exemple les systèmes fonctionnant avec l'énergie solaire, et la nécessité de trouver des moyens efficaces pour exploiter et stocker l'excès de chaleur collectée durant les périodes d'ensoleillement pour ensuite être utilisée pendant la nuit ou autres périodes.

Le même problème se pose pour les systèmes de récupération de l'énergie thermique dégagée lorsque la disponibilité de celle-ci ne coïncide pas avec les périodes d'utilisation de l'énergie thermique.

I.5.1. Importance du stockage d'énergie

Le stockage d'énergie ne joue pas seulement un rôle important dans la conservation d'énergie mais améliore aussi les performances et la fiabilité d'un grand nombre des systèmes énergétiques. Le stockage d'énergie permet l'économie de carburant et rend les systèmes plus efficaces économiquement par la réduction du gaspillage d'énergie.

La majorité des systèmes énergétiques souffre d'une inégalité entre la demande et la provision en énergie. Le stockage permet de restaurer l'équilibre de cette balance et aide ainsi à faire d'énormes économies.

Le stockage d'énergie est le plus important pour les systèmes liés à une source d'énergie intermittente tel que l'énergie solaire. L'utilisation de ce type de source d'énergie pour des applications domestiques et industrielles est en croissance continue et le stockage pourra devenir de plus en plus crucial.

Si aucun système de stockage n'est utilisé dans les systèmes d'énergie solaire alors la majeure partie de la demande en énergie sera satisfaite par une source d'énergie auxiliaire impliquant une fraction de charge solaire annuelle très faible. Dans le cas de l'énergie solaire, les deux systèmes de stockage, à long et à court, termes peuvent être utilisés ce qui peut ajuster la différence entre l'énergie solaire reçue et la demande en énergie et peut égaliser la demande saisonnière en énergie avec la disponibilité du soleil respectivement [15].

I.5.2. Taille et durée du stockage

La taille du stockage est liée à la "densité d'énergie", ou la quantité d'énergie emmagasinée par unité de masse (ou par unité de volume) du matériau du stockage. Une densité d'énergie plus large offre deux avantages : (i) la taille de stockage est réduite et (ii) la quantité du matériau du stockage et celle du conteneur sera réduite, donc, les coûts vont être moindres. Un poids de stockage plus petit a quelques avantages dans les applications du transport et dans celle de l'habitat. Le poids peut ne pas être très important dans le cas d'un stockage sous-terrain mais il devient crucial dans le cas d'un stockage sur le toit.

Une caractéristique importante du matériau du stockage est sa 'capacité volumétrique d'énergie', ou la quantité d'énergie emmagasinée par unité de volume. La densité d'énergie peut être exprimée en kilojoules par kilogramme (kJ/kg), en mégajoules par kilogramme (MJ/kg) ou en kilowatt-heurs par kilogramme (kWh/kg), pendant que la densité volumétrique d'énergie peut être exprimée par kJ/m^3 , MJ/m^3 ou kWh/m^3 . Des matériaux plus denses ont un volume plus petit, et donc un avantage d'une capacité énergétique par unité de volume plus large.

La durée du stockage est un autre paramètre à prendre en considération quand on parle de stockage. Si l'énergie est convertie en fuel tel que l'hydrogène, elle peut être stockée presque indéfiniment. Mais, si l'énergie est emmagasinée sous forme d'énergie thermique, on doit assurer que les pertes thermiques durant la période du stockage soient dans des limites acceptables [15].

La taille optimale du stockage thermique solaire dépend du type d'application et est fonction de plusieurs paramètres tels que le type du matériau, la température de stockage, les pertes thermiques lors du stockage. Le facteur coût a un rôle très important dans le stockage, ce coût est fonction du milieu de stockage et du conteneur, du type d'échangeurs de chaleur et de pompes, des énergies auxiliaires si elles existent, de la charge à satisfaire, du type de collecteur, des propriétés thermo- physiques du matériau du stockage, des données climatiques tel que le rayonnement solaire, la température ambiante, la vitesse du vent etc...

I.5.3. Applications du stockage

Les applications du stockage d'énergie peuvent être classifiées en deux catégories : stationnaires et dans le transport.

I.5.3.1. Stockage thermique

Le stockage d'énergie peut être fait sous plusieurs formes : électrique, chimique, thermique etc... le stockage d'énergie sous forme thermique est généralement employée quand on cherche à utiliser l'énergie emmagasinée sous la même forme.

Les caractéristiques désirées en un milieu de stockage thermique sont :

- Une capacité de stockage très large par unité de volume et de masse ;
- Une efficacité de stockage élevée ;
- Avoir de bonnes propriétés dans l'intervalle de température opérationnelle.

- Une température uniforme ;
- Taux de chargement et déchargement thermique élevé sans avoir de grands gradients de température ;
- Une réversibilité complète ;
- Une stabilité à long terme sous le recyclage thermique ;
- Des pertes thermiques négligeables vers le milieu environnant ;
- Peu cher ;
- Avoir une longue vie ;
- Une compatibilité avec le milieu contenant.

Les principaux types de stockage d'énergie thermique sont : le stockage thermique sensible, là où la température du matériau de stockage varie avec la quantité d'énergie stockée, et le stockage de chaleur latente, qui utilise la chaleur stockée lors du changement de phase (fusion) et le stockage thermique chimique que nous n'allons pas discuter dans ce travail.

I.5.3.1. 1. Stockage thermique sensible :

Le stockage thermique sensible s'effectue par l'augmentation de la température du milieu de stockage. Ainsi, il est désirable pour le milieu de stockage d'avoir une grande chaleur spécifique, une stabilité à long terme pour des cycles thermiques, une compatibilité avec le milieu ambiant et surtout qu'il soit à bas prix.

Le stockage thermique sensible peut être classé selon le milieu de stockage en milieu de stockage liquide (comme l'eau, les fluides à base d'huile, les sels fondus etc.) et milieu de stockage solide (comme les roches, les métaux ou autres) [16].

*** Milieux de stockage liquide :**

Les liquides utilisés pour le stockage thermique sont abondant et économiquement parlant ils sont très compétitifs. Dans ce qui suit nous allons présenter quelques avantages et inconvénients de certains milieux de stockage liquide.

➤ Stockage dans l'eau :

A basses températures, l'eau est l'un des milieux les plus favorables au stockage. Elle a une plus grande chaleur spécifique que d'autres matériaux, elle est abondante et pas chère. Mais du fait de la haute pression de la vapeur d'eau, elle nécessite de coûteuses installations étanches

et résistantes aux hautes pressions et températures. L'eau peut être utilisée sur une large marge de température allant de 25 jusqu'à 90°C. L'eau peut être utilisée dans le stockage comme dans le transport de l'énergie thermique. Comme dans les systèmes fonctionnant avec l'énergie solaire, ce qui fait d'elle le milieu de stockage le plus utilisé de nos jours.

Les réservoirs de stockage d'eau sont construits à partir d'une large variété de matériaux, tels l'acier, l'aluminium, le béton armé ou encore la fibre de verre. Les réservoirs sont isolés avec la laine de verre, la laine minérale ou encore le polyuréthane. La taille des réservoirs varie de quelques centaines de litres à des milliers de mètres cubes.

Pour une plus large application du stockage, les aquifères naturelles souterraines ont été prises en considération. Les aquifères sont des formations géologiques contenant l'eau souterraine, offrant un potentiel moyen pour le stockage de la chaleur durant de longues périodes. Le milieu de stockage dans les aquifères est constitué de gravier saturé en eau ou bien le sable [16].

➤ ***Le stockage dans les eaux salées***

Les bassins solaires offrent une simple et économique méthode pour stocker une grande quantité d'énergie solaire sous forme d'énergie thermique à basse température (50- 90°C). Les bassins solaires peuvent être classés en se basant sur quatre principaux facteurs: (a) convectifs ou non-convectifs, (b) multi couches ou mono couche, (c) collection et stockage séparés ou unis. Toutefois la plus part des recherches se concentrent sur les bassins salés non convectifs. Dans ce types de bassins solaires un gradient de densité est créé en utilisant l'eau salée (ou l'eau de mer). Le chlorure de sodium (NaCl) et le chlorure de magnésium (MgCl₂) représentent les sels les plus utilisés dans ce type de bassins. L'extraction de l'énergie thermique stockée dans les couches inférieures peut être faite sans perturber les couches supérieures [16].

➤ ***Le stockage dans d'autres fluides :***

Les substituts les plus usuels pour remplacer l'eau sont les huiles à base de pétrole et les sels fondus. Les capacités calorifiques varient de 25 à 40% selon le poids. Toutefois, ces substituts ont une basse pression de vapeur comparés à celle de l'eau et peuvent opérer sous de hautes températures dépassant les 300°C. Les huiles sont limitées d'une température de 350°C pour des raisons de stabilité et de sécurité. Peu de mélanges fondus de sel inorganiques sont employés pour des hautes températures. L'hydroxyde de sodium représente l'un d'eux où il a un point de fusion de 320°C et peut-être utilisé pour des températures dépassant les 800°C. Cependant il est hautement corrosif, et présente des difficultés quant à son stockage à haute

température. Les métaux liquides sont eux aussi de possibles milieux de stockage sensible de la chaleur, leurs propriétés sont similaires à celles de l'eau et à celles des huiles à base de pétrole. Ils ont une faible capacité calorifique et un plus grand potentiel en termes de réactivité avec le conteneur [16].

**** Milieux de stockage solide :**

Pour les basses comme pour les hautes températures de stockage de l'énergie thermique, les matériaux solides comme les roches, les métaux, le béton, le sable, les briques etc., sont employés. Dans ce cas l'énergie peut être stockée à basse ou haute température, tant que ces matériaux ne se congèlent pas et ne bouillent pas non plus. Les difficultés liées à la haute pression de la vapeur d'eau et les limitations d'autres liquides peuvent être évitées en stockant l'énergie thermique comme chaleur sensible dans les solides. De plus, les solides ne fuient pas de leur conteneur. Le meilleur produit dans la liste des matériaux solides pour le stockage de la chaleur sensible est la fonte.

Toutefois, la fonte est plus cher que la pierre ou de la brique. Les lits de galets ou les tas de pierres sont généralement préférés comme matériau de stockage en raison de leur faible coût [16].

➤ Stockage dans les roches :

Un lit de galets ou un tas de roches se compose d'un lit de matière rocheuse légèrement tassée et à travers lequel le fluide de transport de chaleur peut circuler. L'énergie thermique est stockée dans le lit tassé par passage de l'air chaud dans le lit et est utilisée à nouveau par recirculation de l'air ambiant dans le lit chauffée. L'énergie stockée dans un système de stockage à lit garni dépend, en dehors des propriétés thermo-physiques de la matière, de plusieurs paramètres, notamment la taille et la forme de la roche, la densité d'emballage, le fluide de transfert de chaleur etc...

➤ Stockage dans les matériaux de construction :

Le stockage de chaleur est applicable à la fois pour les bâtiments neufs comme pour ceux existants déjà et peut être intégré avec les systèmes d'air et de distribution de l'eau. Le matériau de stockage le plus répandue est la brique de céramique. La configuration la plus commune pour le stockage thermique dans les matériaux de constructions est le stockage dans les sols, le

sol devient une surface de radiation à basse température et le béton agissant comme milieu de stockage de la chaleur.

➤ **Stockage dans les métaux :**

La plupart des matériaux proposés pour le stockage d'énergie à haute température (120 à 1400°C) sont soit des sels inorganiques ou des métaux [16]. L'aluminium, le magnésium et le zinc ont été mentionnés comme des exemples appropriés.

L'utilisation des milieux solides peut être avantageuse quand une très bonne conductivité thermique est nécessaire et où le coût est d'une importance secondaire. Les déchets solides industriels comme les résidus de cuivre, les résidus de fer, les résidus de fonte, les résidus d'aluminium et les copeaux de cuivre peuvent être utilisés comme matériau de stockage d'énergie [16].

I.5.3.1. 2. Stockage thermique latent

Le stockage thermique latent est une technique particulièrement intéressante, puisque elle fournit une densité de stockage énergétique très élevée et a la capacité de stocker la chaleur comme chaleur latente de fusion à température constante correspondant à la température de transition de phase pour les matériaux PCM (phase change matériaux). Cela veut dire qu'un matériau PCM, d'une masse et un volume donnés, peut stocker plus d'énergie qu'un autre matériau de même masse et même volume [16].

Les PCM subissent des transformations de phase solide-solide, liquide-gaz et solide-liquide. Relativement, peu des PCM de type solide-solide ont été identifiés d'avoir des chaleurs de fusion et des températures de transition appropriées aux applications du stockage thermique. Les PCM de type liquide-gaz ont généralement des chaleurs de transformation très élevées, mais, à cause de leur changement de volume très large durant la transformation, ils ne sont pas généralement pris en considération pour des applications pratiques.

Les PCM de type solide-liquide sont utiles parce qu'ils stockent une quantité de chaleur relativement large sur un intervalle de température étroit, sans avoir un large changement de volume [17]. Typiquement, le PCM est placé dans des tubes longs et minces empilés dans un conteneur. Durant un cycle de stockage thermique, la chaleur solaire collectée par le collecteur est circulée à travers des espaces étroits entre les tubes faisant fondre le PCM en emmagasinant la chaleur sous les deux formes : sensible et latente de fusion.

N'importe quel système de stockage d'énergie sous forme de chaleur latente doit avoir au moins les trois composants de base suivants [18] :

- i- Une substance de stockage de chaleur qui subit une transformation de phase solide-liquide dans l'intervalle de température opérationnelle.
- ii- Un conteneur pour la substance de stockage de chaleur.
- iii- Un échangeur de chaleur qui sert à transférer la chaleur depuis la source de chaleur vers le PCM.

***Les matériaux de changement de phase (PCM)**

Un nombre très large des matériaux de stockage de chaleur latente ont été signalé dans la littérature. Le paragraphe qui suit est relatif à l'étude de ces matériaux d'un point de vue stockage thermique.

▪ Propriétés désirables d'un PCM dans le stockage thermique :

a- Critère thermodynamique [15]:

Le PCM doit posséder :

- Un point de fusion situé dans l'intervalle de la température opérationnelle du système.
- Une grande chaleur latente de fusion par unité de masse afin qu'une quantité moindre de matériau emmagasine une quantité d'énergie donnée.
- Une grande densité, pour qu'un conteneur à petit volume puisse contenir le PCM.
- Une grande chaleur spécifique pour fournir un stockage additionnel sous forme d'énergie sensible.
- Une grande conductivité thermique, afin que les gradients de température requis pour le chargement et le déchargement du matériau de stockage soit petites.
- Un petit changement en volume durant la transition de phase, pour qu'une simple géométrie puisse être utilisée pour l'enceinte de stockage et l'échangeur de chaleur.

b- Critère cinétique :

Le PCM doit exhiber :

Peu ou aucune surfusion durant la congélation. Le matériau doit cristalliser sur son point de congélation.

c- Critères chimiques :

Le PCM doit montrer :

- Une stabilité chimique.
- Pas de décomposition chimique, pour avoir une bonne longévité pour nos systèmes.
- Pas d'action corrosive sur les matériaux de construction.
- Aucun caractère toxique, explosif et inflammable.

d- Critère économique :

Le PCM doit être :

- Disponible en grande quantité.
- Peu cher.

▪ Classification des PCM :

Les PCM peuvent être classés suivant les catégories principales suivantes [16]:

- Des composés inorganiques comprenant les hydrates de sel, les sels, les métaux et les alliages.
- Des composés organiques comprenant les paraffines, les non-paraffines et les polyalcools.
- Les eutectiques des composés organique et/ou inorganiques.

▪ Les hydrates de sel :

Un nombre d'hydrates de sel tel que le sulfate de sodium deca-hydrate (le sel de Glauber), le chlorure de calcium hexa-hydrate, le thiosulfate de sodium penta-hydrate, l'acétate de sodium tri-hydrate et l'hydroxyde de baryum octa-hydrate ont été largement étudiés dans la littérature à cause de leur coût peu cher [19], [20].

- **Les paraffines**

Les paraffines possèdent plusieurs caractéristiques désirables comme des PCM pour les applications de stockage, tel que leur chaleur de fusion élevée, une surfusion négligeable, une faible pression de vapeur pendant la fusion. Elles sont chimiquement stables et inertes, sans auto-nucléation, ou de ségrégation de phase et sont commercialement disponibles à des coûts raisonnables [21].

Malgré leurs propriétés désirables, ils ont quelques propriétés indésirables telles que leur faible conductivité thermique et leur grand changement de volume pendant la transition de phase. Des matières de remplissage métalliques, des structures métalliques matricielles et des tubes à ailettes ont été utilisés pour améliorer leur conductivité thermique [22]. Afin de maîtriser la large expansion de ces PCM, des conteneurs de plastique et de différentes géométries ont été utilisés.

- **Les non-paraffines**

Les non-paraffines comprennent une vaste variété de matériaux organiques tels que les acides gras, les esters, les alcools et les glycols. Hale et al. [23] ont recensé autour de 70 matériaux organiques de type non-paraffines ayant un point de fusion entre 7 et 187°C et des chaleurs de fusion entre de 42 à 250 kJ/kg.

- **Les eutectiques :**

Les eutectiques sont des mélanges de deux ou plusieurs sels ayant des points de fusion/congélation bien définis. Leur comportement est analogue aux hydrates de sel et ont un grand potentiel pour les applications de stockage thermique.

Les eutectiques peuvent être classifiés comme des eutectiques organiques, des eutectiques inorganiques et des eutectiques organiques-inorganiques.

Chapitre II
Généralités sur les cheminées solaires

II.1. Historique

Cela fait plus d'un siècle que des scientifiques et chercheurs comme le Colonel espagnol Isidoro Cabanyes, l'allemand Hanns Günther ou encore le français Edgard Nazare se penchent sur le sujet des tours solaires. Ce n'est qu'en 1981 qu'un premier prototype de cheminée solaire fut construit à Manzanares (ville espagnole à 150 kilomètres de Madrid) sous la direction de l'ingénieur allemand Jörg Schlaich. Cette cheminée mesurait 194 mètres de haut et possédait une serre de 15 hectares à ses pieds. De plus, le diamètre de la cheminée mesurait 5 mètres. Elle fonctionnait à une puissance de 50 kW pour un fonctionnement d'environ 9 heures par jour et a fonctionné jusqu'en 1989. Elle fut arrêtée en raison d'un coût du kilowattheure qui était cinq fois plus élevé que celui d'une centrale thermique classique [3].

II.2. La centrale cheminée solaire

La centrale cheminée solaire (CCS) est une centrale de production d'énergie électrique à partir de l'énergie solaire. Elle repose sur l'idée d'exploiter l'énergie cinétique du mouvement 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 [14]. La figure II.1 montre une photo de la CCS de Manzanares.



Figure II-1 Photo de la cheminée solaire de Manzanares [24].

II.2.1. Principaux constituants de la CCS :

Les différents composants d'une centrale à cheminée solaire sont : le collecteur, la turbine et la cheminée. La figure II.1 montre le schéma d'une centrale à cheminée solaire.

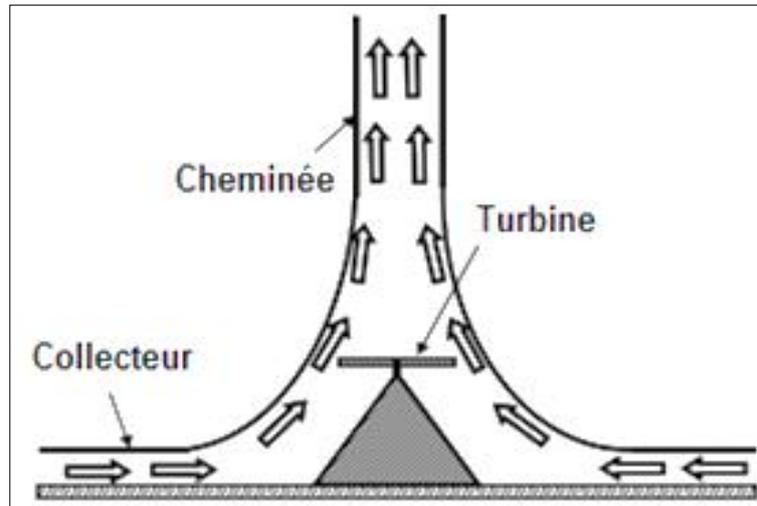


Figure II-2 Schéma d'une centrale à cheminée solaire.

II.2.1.1. Le Collecteur :

Le collecteur est la partie qui est employée pour produire l'air chaud par effet de serre. Sa hauteur va de 2 à 6 mètres et recouvre une vaste surface de plusieurs milliers de m². Comme le poids du verre augmente la masse du toit, les collecteurs doivent avoir une structure avec des tiges assez résistantes et attachées.

Par ailleurs, il n'y a aucune limitation pour la superficie du collecteur : plus grande est la surface, plus grande est la quantité d'énergie produite par la tour solaire. La hauteur sous la serre doit progressivement augmenter de l'extérieur vers le centre afin de diminuer les pertes par frottement et divers matériaux peuvent constituer le dessus de la serre comme le verre ou les films plastiques.

Le plus efficace semble être le collecteur en verre, puisque son rendement de conversion d'énergie solaire en chaleur peut aller jusqu'à 70%. La moyenne annuelle typique est de l'ordre de 50%. En outre, avec un entretien et une maintenance appropriés, sa durée de vie peut facilement être de 60 ans ou plus [3].

La figure II.3 montre l'intérieur du collecteur d'une centrale à cheminée solaire.



Figure II-3 Vue intérieure du collecteur d'une CCS [24].

II.2.1.2. La Turbine :

Les turbines servent à convertir le courant d'air ascendant en énergie mécanique, puis électrique. Elles sont placées soit verticalement dans le collecteur, soit horizontalement dans la cheminée. Afin d'obtenir le maximum d'énergie à partir de l'air chauffé, les lames des turbines doivent couvrir toute la section de la cheminée.

Pour cela, une grande turbine ou plusieurs petites turbines devraient être utilisées au pied de la cheminée [3]. La figure II.4 montre une photo de turbine dans la cheminée d'une CCS.

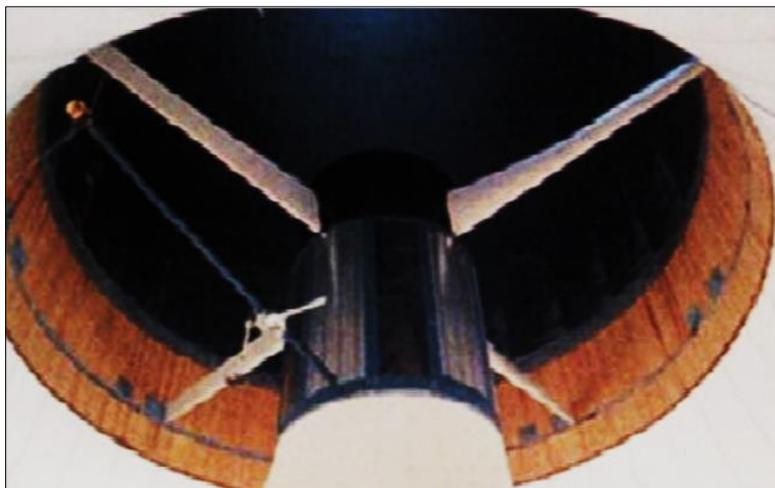


Figure II-4 Photo d'une turbine d'une centrale à cheminée solaire.

II.2.1.3. La cheminée :

La partie la plus importante de la tour solaire c'est la cheminée, elle agit comme une machine thermique. Les pertes par friction étant minimales dans la cheminée, celle-ci agit comme un tube de pression.

Plus haute est la cheminée, plus importante est la quantité d'énergie produite par la tour solaire. L'efficacité de la cheminée ne dépend pas de la température de l'air entrant, mais 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. Cependant, bien que l'efficacité soit proportionnelle à la hauteur de la cheminée, dans la pratique il y a une limitation. Deux principaux types de cheminées sont possibles :

- Les cheminées autoportées : construites en dur "béton ou acier».
- Les cheminées haubanées : en structures plus légères faites de tubes "habillés".

La durée de vie des cheminées en béton est bien supérieure à celle des cheminées en membranes plastiques (une centaine d'années contre quelques années à peine) [3]. La figure II.5 montre une photo de cheminée d'une CCS.



Figure II-5 Photo de cheminée d'une CCS.

II.2.2. Principe de fonctionnement d'une CCS :

Le toit transparent de la serre laisse passer les faibles longueurs d'ondes de la radiation solaire et retient le rayonnement de grandes longueurs d'onde. Une partie du rayonnement solaire chauffe directement l'air sous la serre et l'autre partie est absorbée par le sol qui la restitue ensuite sous forme de chaleur. Une fois chauffé, l'air se dilate et s'écoule sous la serre vers la cheminée. Il acquiert ainsi progressivement de la vitesse. L'air chauffé sous la serre pénètre dans la cheminée placée en son centre et crée un courant d'air ascendant. Au pied de la cheminée des turbines équipées de générateurs produisent de l'électricité.

II.2.3. Avantages et Inconvénients d'une tour solaire :

II.2.3.1. Avantages [3]:

- Les Cheminées Solaires sont particulièrement adaptées à la production d'électricité dans les déserts et les terres arides sans valeur, mais riches en soleil.
- Elles produisent de l'électricité 24 heures par jour à partir d'énergie solaire uniquement.
- Aucun carburant n'est nécessaire.
- Elles ne nécessitent pas d'eau de refroidissement et sont adaptées à des régions où règne une sécheresse extrême (même les CSP « concentrating solar power » ont besoin d'eau comme source froide !).
- La Tour Solaire est particulièrement fiable et nécessite peu de maintenances comparativement aux autres usines de production d'électricité.
- Les matériaux nécessaires à la construction d'une Cheminée Solaire : béton, verre et acier, sont disponibles en quantités suffisantes partout dans le monde.
- Leur construction ne provoque pas de dommages écologiques et peut employer la main d'œuvre locale.
- Leur fonctionnement ne consomme pas de ressources.
- Exploitation pour l'agriculture.

II.2.3.2. Inconvénients [3] :

- Quelques estimations stipulent 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.

II.2.4. Stockage dans les CCS :

La majorité des systèmes de stockage d'énergie dans les CCS proposés jusqu'à présent par les chercheurs sont des systèmes de stockage thermique à basse température. Plusieurs études et analyses ont été faites afin de comprendre et de simuler l'effet du stockage sur la cheminée solaire, et aussi, afin de comparer et de préciser le milieu de stockage le plus adéquat pour les CCS du point de vue économique, technique etc...

Dans ce qui suit, nous allons présenter les milieux de stockage les plus utilisés.

II.2.4. 1. Le sol comme milieu de stockage :

Le sol sous le collecteur représente un milieu de stockage d'énergie thermique très important. Il représente même l'un des avantages de la centrale. Le sol sous le collecteur est chauffé par le soleil pendant la journée et de l'énergie est stockée, la chaleur sera libérée pendant la nuit et continue à faire fonctionner la turbine. L'énergie emmagasinée est fonction de la capacité calorifique du sol, alors plus le type de sol sur lequel la centrale est installée est caractérisé par une capacité calorifique plus élevée : plus l'énergie emmagasinée est élevée et plus le fonctionnement pendant l'absence du soleil sera plus performant.

Parmi les types de sol les plus mentionnés dans la littérature on trouve : le sol à sphaigne sèche, le sol d'argile, le sable, la roche en calcaire, la roche en granite, le sol en grès, la roche en marbre et la roche solide.

II.2.4. 2. Les galets comme milieu de stockage :

Afin d'optimiser la production nocturne, nous pouvons placer sous la serre des lits de galets qui ont un pouvoir de stockage de chaleur très important. En effet, durant la journée, ces lits de

galets sont exposés constamment aux rayons du soleil et donc emmagasinent cette chaleur afin de la restituer durant la nuit.

II.2.4. 3. L'eau comme milieu de stockage :

Le stockage d'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. Puisque la capacité calorifique de l'eau (4.182kJ/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 d'énergie électrique. La production d'énergie électrique atteint la valeur maximale généralement vers midi, mais cette valeur diminue avec l'augmentation de la quantité d'eau de stockage. Dans le cas où il n'existe pas d'eau de stockage, la production d'énergie électrique pendant le jour est plus élevée que celle avec l'eau de stockage, 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 on a de l'eau de stockage, la production d'énergie électrique augmente avec la diminution du volume d'eau dans les tubes de stockage pendant le jour. A titre d'exemple pour les tubes de 5cm de diamètre l'énergie électrique produite pendant le jour est plus élevée que celle avec des tubes de 10cm de diamètre, mais pendant la nuit, c'est l'inverse. Ce qui nous nécessite de choisir une quantité convenable d'eau de stockage [14].

II.2.4. 4. D'autre milieu de stockage :

On trouve dans la littérature des études faites sur d'autres milieux de stockage tel que : le béton, l'asphalte, la brique etc... La disposition de la couche de stockage de l'un de ces matériaux prend en priorité la région près de la cheminée où la température est la plus élevée sous tout le collecteur, puis vient le reste des zones sous le collecteur.

II. 3. 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'Allemagne, l'Espagne et les Etas Unis. Ci-dessous quelques projets de CCS réalisés à travers dans le monde.

II.3.1. 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 [6].

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 tour a été construite avec des tubes de guidages couverts par des plaques trapézoïdales d'une épaisseur de $1.25mm$. Elle repose sur une base circulaire surélevée de $10m$ 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 plastic 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 m² ;
- Collecteur couvert de verre : 6.000 m².

II.3.2. Le projet espagnol :

Un autre projet de tour solaire, a été prévu pour arriver à échéance avant 2011, le financement est trouvé, et 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 [14].

➤ **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 projets, ce dernier 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 le tourisme.

II.3.3. Le projet Australien (Buronga) :

Un projet de tour solaire, appelé Projet de Buronga, était 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. L'énergie produite reste largement inférieure à celle d'un réacteur nucléaire moderne (soit encore 7 fois plus), mais soutient la comparaison.

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 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.
- Puissance produite : 200 MW.

Le 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. La figure II.6 montre le schéma de la cheminée solaire de BURONGA.

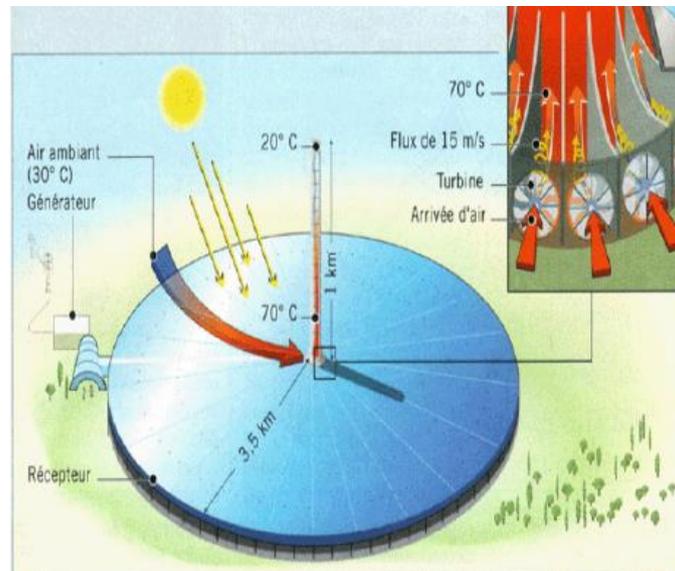


Figure II-6 Schéma de la cheminée solaire de BURONGA.

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 [14], 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 de 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. La figure montre une photo du prototype de CCS américain.



Figure II-7 Photo de la CCS d'Arizona.

Chapitre III

Etat de l'art sur les centrales à cheminée solaire

Etat de l'Art sur les Centrales à Cheminée Solaire

III. 1 Etudes théoriques sur les CCS :

Le travail pionnier de J. Schlaich [6] 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 théoriques et / ou expérimentales pour la modélisation des CCS à grande échelle.

En effet, Schlaich et al. [24] et [25] 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 [24].

Une étude théorique simplifiée de la CCS a été décrite et 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 rencontrer les CCS, tout en justifiant les avantages de tels systèmes.

Une étude fondamentale sur le prototype de la CCS espagnol a été réalisée par Haaf et al. [26] Dans leur article, les auteurs ont analysé brièvement le bilan énergétique, les critères de conceptions et l'analyse des coûts.

Haaf 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 [27] a présenté une analyse pour déterminer l'efficacité globale de la cheminée solaire. Padki et Sherif [28] Et [29] ont mené des investigations sur la viabilité des CCS

destinées à la production de l'énergie électrique à moyenne et grande puissance et la production d'énergie en lieu rural.

Padki et Sherif ont discuté les effets des paramètres géométriques sur les performances énergétiques de la CCS. Ils ont proposé un modèle analytique simple pour la prédiction des performances d'une CCS basé sur un modèle mathématique construit à partir 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.

Pasumarthi et Sherif [30] ont fait une étude pour démontrer la viabilité de la centrale à cheminée solaire comme technologie alternative, appropriée et adaptables 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 [30] 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 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 collecte ou par augmentation de la hauteur de la tour. Dans le cas où l'augmentation de la hauteur de la tour s'avère coûteuse, ou elle n'apporte pas 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 Manzanares en Espagne avec une marge d'erreur de 20 % sur la vitesse d'écoulement et de 5 à 9% sur la puissance produite.

Yan et al. [31] 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 des 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.

Bernardes et al. [32] 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 Bernardes et al. 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 [33] 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, de la friction interne et de l'échange thermique entre les différentes zones.

Gannon et Von Backström se sont penchés sur une analyse thermodynamique idéale du cycle d'écoulement d'air, supposé comme gaz parfait isentropique, à travers une CCS. Ils se sont intéressés, dans une première partie, par la définition des 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 couplage fort 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 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 collecte d'énergie 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 des radiations solaires en comparaison avec la température ambiante. La puissance produite augmente de manière non linéaire avec l'augmentation de la surface de collecte 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 à celles à faibles tailles. Les auteurs ont conclu qu'une centrale à cheminée solaire constituée d'un capteur à air de 500 m de rayon et d'une tour de 200 m de hauteur et de 10 m de diamètre est capable de produire de 110 à 190 kW.

Dans l'analyse de Ming et al. [35] 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 tels 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 [36], a tenté de déterminer dans son étude, la dépendance du potentiel énergétique sous forme de chaleur acquis par l'air circulant dans le collecteur avec 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 [37] 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 [38] 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.

Pretorius, J.P., Kröger ont comparé la puissance annuelle produite, calculée avec deux estimations du coefficient de perte dû au changement de passage entre la section horizontale et verticale « HTVTS » « horizontal to vertical transition section » respectivement 0,25 et

0,14. Les résultats ont montrés que la puissance annuelle obtenue par des calculs utilisant le coefficient de perte le plus élevé « 0.25 », était sous-estimé par 0.4% uniquement.

Pretorius et al. [39] 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. 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.

L'étude de Chergui et al. [40] 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 et a permis de déterminer le champ de vitesse et de température.

S. Larbi et al. [41] ont étudié les performances d'une CCS pour son application dans le sud algérien. Les résultats obtenus 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 [42] a introduit dans son modèle une analyse énergétique afin de montrer l'influence des paramètres d'entrée sur les paramètres de sortie et d'illustrer leur tendance.

Dans leur article, Zhou et al. [43] 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.

Dans l'étude de Koonsrisuk et al. [44] ont décrit la théorie « constructive » 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 fixes 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 négligeables [25].

Chiemeka Onyeka Okoye et Ugur Atikol. . [45] ont étudié la faisabilité d'installer une centrale a cheminée solaire (CCS) au nord de Chypre. La méthode utilisée pour les simulations de la production d'électricité a été comparée et vérifiée par les enregistrements expérimentaux du prototype de Manzanares.

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 .

Kröger et Buys [46] ont élaboré des relations analytiques pour la détermination de la différence de pression due aux effets de frottements et des corrélations de transfert thermique pour l'écoulement radial développé entre le toit et le collecteur.

Kirstein et Backström [47] ont fait des recherches sur le coefficient de perte dans la section de transition entre la turbine et la cheminée comme étant dépendant de l'angle des pales de guidage de l'arrivée d'air et de la hauteur du toit du collecteur.

Pastohr et al. [48] ont utilisé le logiciel FLUENT (code commercial CFD) pour modéliser une CCS semblable géométriquement à celle de Manzanares dans le but d'effectuer une analyse détaillée 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 simplifié proposé par les auteurs, ce qui a conduit à la conclusion de pouvoir employer ce dernier tout simplement pour des études paramétriques en vigueur.

Sandeep et Patel [49] ont optimisé la géométrie des composants principaux du CCS en utilisant le logiciel ANSYS-CFX pour étudier et améliorer les caractéristiques d'écoulement à l'intérieur d'une CCS. La taille de la cheminée et le diamètre de collecteur de la CCS ont été pris constants et égaux à 10 m et 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 collecteur et la cheminée ont été considérés avec différents angles de divergence (0° - 3°) et différentes ouvertures d'admission de la cheminée de 0.6 m à 1 m.

Le diamètre de la cheminée a été également changé de 0.25 m à 0.3 m. Dans leur simulation, les auteurs ont utilisé le logiciel CFX (code commercial CFD) où ils ont constaté que la meilleure configuration était réalisée à l'aide d'une cheminée d'angle de divergence de 2° et de diamètre égal à 0.25 m avec une ouverture de collecteur de 0.05 m et de diamètre de sortie de 1 m. La température à l'intérieur du collecteur est plus haute pour l'ouverture inférieure ayant pour résultat un écoulement plus élevé du point de vue taux et puissance.

III.2. Etudes théoriques sur les CCS avec stockage :

Les études concernant l'effet du stockage au niveau des collecteurs des cheminées solaires qui mérite d'être mentionner étaient initialement introduites par Pasumarthi and Sherif [50] où la performance du collecteur a été étudiée par l'extension de la base du collecteur et par l'introduction d'un absorbeur intermédiaire.

Zhou et al. [51] ont développé un modèle mathématique afin de comprendre le comportement du rendement de la centrale suivant différentes valeurs d'intensité de radiation solaire, de surface du collecteur et de hauteur de la cheminée. Ninic [36] a analysé différents types de collecteur en utilisant de l'air sec et humide.

Bonnelle [52] a suggéré l'implémentation d'un collecteur sous forme d'une structure de nervures. Cependant, une telle configuration doit montrer des avantages économiques et techniques afin d'être adopté.

Hedderwick [53] et Pretorius [54] ont étudié et discuté la distribution de la température dans le sol sous le collecteur.

Hammadi [55] a étudié l'effet du système de stockage thermique sur la production d'énergie de la centrale en montrant que la présence de la couche d'eau de stockage a engendré un déplacement de la position du pic de la courbe de production de la centrale loin de midi donnant une courbe de production plus lisse.

Une étude expérimentale conduite par Miqdam and Hussein [56] à Baghdâd a souligné l'effet du matériau de la base de la cheminée sur la température de l'air du collecteur. Trois types de bases ont été utilisés : béton, béton noir et caillou noir. Les résultats de comparaison ont montré que la plus haute différence en température a été obtenue pour les bases en cailloux noirs.

Zheng et al. [57] ont analysé les performances d'une cheminée solaire avec une couche de stockage énergétique en utilisant le gravier ($\rho=2555 \text{ kg/m}^3$, $C_p=814.8 \text{ J/Kg K}$ et $K=2.00 \text{ W/m.K}$) et le sol ($\rho=1700 \text{ kg/m}^3$, $C_p=2016 \text{ J/Kg K}$ et $K=0.78 \text{ W/m.K}$) et leurs effets sur la production d'énergie de la centrale.

Ming et al. [58] ont employé leur système de stockage énergétique hybride entre le sol et l'eau pour réduire les fluctuations de la génération d'énergie de la cheminée solaire.

Zhou et al. [59] ont choisi la paraffine comme matériau de stockage énergétique dans le collecteur. Ils ont pu réaliser que pour un fonctionnement continu de la centrale et dans les mêmes conditions de rayonnement solaire, la vitesse du courant d'air et la valeur maximum de production de la centrale ont marqué une augmentation.

Xu et al. . [60] ont effectué une simulation numérique d'une cheminée solaire avec une couche de stockage énergétique similaire au prototype espagnol. L'étude de Bernardes et al. [5] a fourni une analyse thermique et technique d'une centrale à cheminée solaire avec l'eau comme milieu de stockage. Leurs résultats ont montré que la hauteur de la cheminée, le diamètre et les propriétés optiques du collecteur sont des paramètres importants pour la conception d'une cheminée solaire pendant que les propriétés du sol et la présence de l'eau

comme milieu de stockage ne présente aucune variation significative sur l'énergie produite mais sur l'énergie produite suivant le temps.

Bernardes [61] a évalué l'influence de l'effusivité thermique du sol (ou coefficient de pénétration thermique) sur la performance de la centrale à cheminée solaire en considérant des valeurs entre 1000 et 2000 $\text{Ws}^{1/2}/\text{K m}^2$.

Pretorius et al. [54] ont réalisé des simulations sur les effets du stockage thermique en considérant le granite comme milieu de stockage. Pretorius and Kröger [62] ont analysé les effets de différents types de sol et de vitrage du toit du collecteur sur l'efficacité d'une centrale à cheminée solaire de grande échelle.

Ming et al. [58] ont effectué des simulations numériques pour analyser les caractéristiques du transfert thermique et l'écoulement d'air dans une centrale à cheminée solaire avec stockage d'énergie.

Sangi et al. [63] ont analysé les effets des dimensions du collecteur et ont étudié une centrale à cheminée solaire avec système de stockage d'énergie seulement sous des conditions stables.

Kreetz [64] a présenté un modèle numérique incluant le cas de l'utilisation de l'eau comme moyen de stockage d'énergie solaire dans le collecteur. Les calculs ont montré la possibilité d'un fonctionnement continu jour et nuit, de la CCS.

Deux méthodes 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 [65] et l'installation de système de stockage thermique. L'intégration de système de stockage thermique à eau a également révélé d'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.

III.3. Etudes expérimentales :

Durant ces dernières années, plusieurs prototypes expérimentaux de cheminées solaires 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. 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 [66].

Le profil de puissance produit est en étroite corrélation avec le profil d'insolation pendant la journée 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 [66].

En 1983, Krisst [67] 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, de 7 m de diamètre et un collecteur de 9 m² de surface a été construit par Kulunk en Turquie [68].

En 1997, un dispositif de centrale à cheminée solaire a été mis en place par Pasurmarthi et Sherif [69] en Floride. Le collecteur de 9.15 m de diamètre avait une toiture en Lexan, la tour cheminée a 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 noir clair avec une transparence d'environ 60% était utilisé comme absorbeur et toiture pour la partie d'extension du collecteur de configuration « Type II ». Un absorbeur en toile 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.

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.

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 [70] 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 consistant en l'inversion de la température de l'air à la sortie de la cheminée solaire juste après le lever du soleil 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.

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 [71]. La CS a été fabriqué 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 160m².

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.

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/m², 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/m². 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 cheminée de 11 m de hauteur et 1 m de diamètre, sur le campus de l'Université Fédérale de Minas Gerais, à Belo Horizonte, Brésil [72].

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 était 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.

III.4. Etudes économiques :

Les coûts des CCS de différentes capacités de production d'énergie et avec un collecteur fait du plastique ont été estimés par quelques chercheurs [25]. Bernardes, avec des différentes capacités de production d'énergie et avec un collecteur fait du plastique des CCS, a estimé le coût d'une CCS de 100 MW avec un toit du collecteur en plastique.

Weibing Li et al. [73] ont développé un modèle différent des modèles existants pour analyser le coût des CCS. Le modèle permet de calculer 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 ont montré que le prix minimum d'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'étude de sensibilité menée par les auteurs a permis de montrer que la VNT est très sensible aux changements dans le prix de l'électricité et le taux d'inflation solaires.

Siva et al. [74] ont mis au point un modèle mathématique pour analyser le coût et le profit d'une centrale à cheminée solaire à base renforcé par le béton construite en Chine. En se basant sur ce modèle et des hypothèses pour les valeurs des différents paramètres, ils ont présenté un travail où ils ont calculé la valeur présente totale net (VPTN) et le prix minimum d'électricité en divisant la période totale de fonctionnement en quatre périodes.

Les résultats ont montré que le prix minimum d'électricité dans la première période est plus élevé que le prix actuel d'électricité, mais le prix minimum d'électricité dans les trois autres périodes est de loin moins cher que le prix actuel d'électricité.

Xinping Zhou et al. [75] ont présenté une analyse économique en analysant durant une période totale de service une centrale de 100 MW. Ils ont relevé que le coût est influé par plusieurs facteurs y compris les investissements, le coût d'opération et de la maintenance, la durée de vie de la centrale, le délai de récupération, le taux d'inflation, le taux minimum du revenu, le prix de vente d'électricité etc...

Papageorgious [76] a estimé le coût des composants d'une CCS de 100 MW en excluant certaines dépenses additionnels alors que Zhou and Yang [77] ont estimé le coût d'électricité d'une CCS supposée être installée au désert sur les hauts montagnes du nord-ouest de la chine en excluant également certaines dépenses.

Chapitre IV
Modélisation mathématique des
transferts thermiques dans les CCS

Modélisation Mathématique des Transferts Thermiques dans les Centrales à Cheminée Solaire avec et sans Stockage Thermique

IV.1. Introduction :

La modélisation mathématique des transferts thermiques dans les centrales à cheminée solaire (CCS) est basée sur les équations de bilan de conservation moyennant certaines hypothèses simplificatrices. Dans le cadre de ce chapitre, nous présenterons deux modèles mathématiques, le premier ne prend pas en considération le stockage thermique dans le calcul des performances énergétiques, le second par contre prend en considération le stockage thermique.

Les hypothèses communes à l'ensemble des modèles mathématiques 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.2. Equations de bilans énergétiques relatives aux centrales à cheminées solaires sans stockage thermique : (Modèle de Schlaich [6])

Nous nous sommes intéressés au modèle de Schlaich [6] pour déterminer les performances énergétiques des centrales à cheminée solaire (CCS). Rappelons que ce modèle est relatif au calcul des performances énergétiques dans les CCS sans stockage thermiques. Il est basé sur les hypothèses suivantes :

- L'écoulement est laminaire et bidimensionnel ;
- L'écoulement est incompressible axisymétrique en régime stationnaire ;
- Les parois de la tour "cheminée" sont supposées adiabatiques ;
- Du fait que les vitesses sont relativement faibles en convection naturelle, le terme de la dissipation visqueuse est négligeable ;
- Les propriétés thermophysiques du fluide sont constantes ;
- La masse volumique du fluide obéit à l'approximation de Boussinesq.

IV.2.1. Rendement de la centrale à cheminée solaire (CCS) :

Le rendement total, η , de la CCS est défini comme étant le produit de trois rendements individuels. Il est donné par l'expression :

$$\eta = \eta_{coll} * \eta_t * \eta_{Wt} \quad (4.1)$$

Où :

η_{coll} : Rendement du collecteur, c'est-à-dire l'efficacité avec laquelle les radiations solaires sont converties en chaleur.

η_c : Rendement de la cheminée, il décrit l'efficacité de la transformation de la chaleur convertie par le collecteur en énergie dans l'écoulement.

η_{Wt} : Rendement de l'aérogénérateur.

IV.2.1. 1. Rendement 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 $G \left(\frac{W}{m^2} \right)$ multiplié par la surface du collecteur A_{coll} .

Il est donné par :

$$\eta_{coll} = \frac{\dot{Q}}{G * A_{coll}} \quad (4.2)$$

Avec

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

G : Rayonnement solaire incident mesuré en (W/m^2).

A_{coll} : Surface du collecteur.

▪ **1^{ère} expression du rendement du collecteur :**

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

$$\dot{Q} = \dot{m} * C_p * \Delta T \quad (4.3)$$

Où :

\dot{m} : Débit massique de l'air.

C_p : Chaleur spécifique de l'air.

ΔT : Différence de températures entre l'entrée et la sortie du collecteur.

Avec :

$$\dot{m} = \rho_{coll} * V_t * A_t \quad (4.4)$$

et

ρ_{coll} : Masse volumique de l'air à la sortie de collecteur.

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

A_t : Section de passage.

En injectant l'expression du débit volumique, \dot{m} , dans celle de \dot{Q} , le rendement devient :

$$\eta_{coll} = \frac{\rho_{coll} * V_t * A_t * C_p * \Delta T}{G * A_{coll}} \quad (4.5)$$

▪ 2^{ème} expression du rendement du collecteur :

L'application d'un bilan thermique sur le collecteur donne l'expression :

$$\dot{Q} = \alpha * A_{coll} * G - \beta * \Delta T * A_{coll} \quad (4.6)$$

Où :

α : Coefficient d'absorption effective du rayonnement solaire du collecteur.

β : Coefficient de pertes énergétiques englobant les pertes par convection, par radiation et par stockage de sol (Pertes corrigée en W/m^2K).

En combinant les équations (4.5) et (4.6) on aura :

$$\eta_{coll} = \alpha - \frac{\beta * \Delta T}{G} \quad (4.7)$$

En combinant la 1^{ère} équation du rendement avec la 2^{ème}, nous pouvons trouver le terme de la vitesse de l'air :

$$V_c = \frac{\alpha * A_{coll} * G - \beta * \Delta T * A_{coll}}{\rho_{coll} * A_c * C_p * \Delta T} \quad (4.8)$$

IV.2.1. 2. Rendement de la cheminée :

Le rendement de la cheminée est défini par :

$$\eta_c = \frac{P_{tot}}{\dot{Q}} \quad (4.9)$$

Avec :

\dot{Q} : Gain en puissance thermique de l'air déjà défini dans l'équation (4.3).

P_{tot} : Energie contenue dans le fluide.

L'énergie du fluide s'exprime sous la forme :

$$P_{tot} = \Delta p_{tot} * V_{t,max} * A_c$$

Où :

Δp_{tot} : Variation de la pression totale avec la hauteur de la cheminée.

La différence de pression Δp_{tot} peut être divisée en deux composantes, statique et dynamique. En négligeant les pertes par frottement et on aura :

$$\Delta p_{tot} = \Delta p_s + \Delta p_d \quad (4.10)$$

Avec :

Δp_s : Différence de pression statique diminue dans la turbine.

Δp_d : Composante dynamique décrivant 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 :

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

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 :

$$P_{tot} = \frac{1}{2} \dot{m} * V_{t,max} \quad (4.11)$$

La vitesse d'écoulement d'air dans la cheminée sera évaluée par l'application de l'équation de conservation de la quantité de mouvement sur une section de la tour, ce qui donne :

$$\rho_t V_t \frac{d(V_t)}{dz} = -\frac{dp}{dz} - (\rho_t - \rho_e) * g \quad (4.12)$$

De l'équation (4.12) et après transformation on peut déduire l'expression de la vitesse de l'écoulement dans la cheminée :

$$V_t = \sqrt{\frac{2}{\rho_t} \left(- \int_0^{H_t} dp - \int_0^{H_t} (\rho_t - \rho_e) * g * dz \right)} \quad (4.13)$$

Avec :

g : Accélération due à la gravité.

H_t : Hauteur de la cheminée.

ρ_e : Masse volumique de l'air dans l'environnement extérieur.

ρ_t : Masse volumique de l'air dans la cheminée.

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

$$V_{t,max} = \sqrt{-\frac{2}{\rho_t} \left(\int_0^{H_t} (\rho_t - \rho_t) * g * dz \right)} \quad (4.14)$$

Ainsi et avec l'hypothèse de simplification stipulant que les profils de température sont parallèles à l'intérieur de la cheminée, la vitesse atteinte par les courants de convection libre peut être décrite par l'équation modifiée de Torricelli, donnée par :

$$V_{c,max} = \sqrt{2 * g * H_t * \frac{\Delta T}{T_0}} \quad (4.15)$$

Avec :

T_0 : Température ambiante.

ΔT : Différence de température entre l'entrée et la sortie du collecteur.

En combinant l'équation (4.9), (4.10), (4.11) et (4.15), nous déduisons ainsi le rendement de la cheminée :

$$\eta_c = \frac{g * H_t}{c_p * T_0} \quad (4.16)$$

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

IV.2.1. 3. Rendement de la turbine :

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 :

$$\Delta P_s = \Delta P_{tot} - \frac{1}{2} \rho_t * V_c^2 \quad (4.17)$$

- **Puissance théorique :**

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

$$P_{Wt} = V_t * A_t * \Delta P_s \quad (4.18)$$

Par analogie du débit volumétrique avec la puissance électrique, ΔP_s représente la tension électrique E :

$$W = I * E \equiv Q_V = A_t * V_t$$

Les termes ΔP_s et V_c sont couplés avec l'équation (4.18). Ainsi :

$$Q_V = \sqrt{\frac{\rho_k}{2} (\Delta P_{tot} - \Delta P_s)} \quad (4.19)$$

- **Puissance maximale :**

La puissance $P = Q_V * \Delta P_s$ 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 une valeur maximale entre ces deux extrêmes.

D'où :

$$P_{Wt} = \Delta P_s * \sqrt{\frac{\rho_k}{2} (\Delta P_{tot} - \Delta P_s)} \quad (4.20)$$

La dérivation de l'équation (4.20) permet de calculer le point optimal :

$$\Delta P_s = \frac{2}{3} \Delta P_{tot} \quad (4.21)$$

En injectant l'équation (4.21) dans l'équation (4.17), on trouve :

$$P_{tot} = \frac{2}{3} \Delta P_{tot} * V_{t,max} * A_t \quad (4.22)$$

La puissance maximale est atteinte quand 2/3 de la différence de pression totale est utilisée par la turbine. Il correspond à la condition de ppm « point de puissance maximum » pour une centrale hydroélectrique.

On peut ainsi noter que la puissance utile maximale au niveau de la turbine représente 2/3 de celle produite entre le collecteur et la cheminée (en l'absence de la charge de la turbine).

IV.2.2. Puissance mécanique produite par la centrale :

La relation (4.9) modifiée donne l'expression :

$$P_{tot} = \eta * A_{coll} * G \quad (4.23)$$

D'où :

$$P_{tot} = \frac{2}{3} * \eta_{coll} * \eta_t * \eta_{Wt} * A_{coll} * G \quad (4.24)$$

et

$$P_{Wt,max} = \frac{2}{3} * \eta_{coll} * \eta_{Wt} * \frac{g * H_t}{C_p * T_0} * A_{coll} * G \quad (4.25)$$

On conclue donc que :

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

Remarque :

Le terme, ΔP_s , n'est pas indépendant de V_C dans la cheminée solaire, mais couplé comme l'indique l'équation (4.15). En remplaçant ΔP_s par l'optimum trouvé dans l'équation (4.17), on déduit l'expression de la vitesse du fluide pour un point de puissance maximale:

$$v_{c,max} = \sqrt{2 * g * H_t * \frac{\Delta T}{T_0}} \quad (4.26)$$

IV.3. Equations de bilans énergétiques relatives aux centrales cheminées solaires avec stockage thermique : (Modèle de Hammadi [55])

Le bilan énergétique sur le collecteur donne :

$$\alpha G A_{coll} - h_i A_{coll} (T_s - T_a) = m_s C p_s \frac{dT_s}{dt} \quad (4.27)$$

Avec :

$$m_s = r_s A_{coll} H_s \quad (4.28)$$

Le bilan énergétique sur l'air à travers le collecteur donne:

$$h_i A_{coll} (T_s - T_a) - h_\infty A_{coll} (T_a - T_\infty) = m_a C p_a (T_{a,o} - T_{a,i}) \quad (4.29)$$

Avec :

$$Ta = \frac{(Ta,o+Ta,i)}{2} \quad (4.30)$$

La figure IV.1 montre le modèle physique de la CCS avec ses dimensions

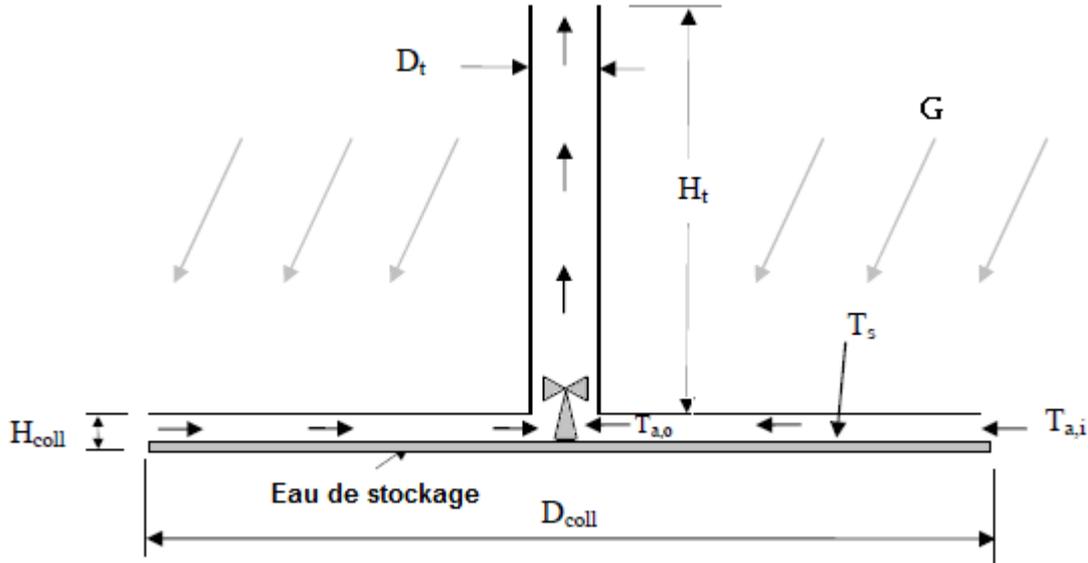


Figure V-1 Modèle physique d'une CCS avec stockage thermique.

Le coefficient de transfert thermique à l'intérieur du collecteur est donné par une corrélation fournie par Gnielinski [78] valide pour les conduites lisses pour un large intervalle de valeurs de nombre de Reynolds, y compris la région de transition. Il est exprimé par :

$$h_i = \frac{(f/8)(Re - 1000)Prk}{1 + 12.7\sqrt{f/8}\left(Pr^{\frac{2}{3}} - 1\right)D_h} \quad (4.31)$$

Le facteur de frottement, f , peut être obtenu par le diagramme de Moody ou par l'équation suivante :

$$f = [0.79\ln(Re) - 1.64]^{-2} \quad (4.32)$$

Cette corrélation est valide pour :

- Pr compris entre 0.5 et 2000
- Re compris entre 3000 et $5 \cdot 10^6$.

Il est à souligner que la corrélation donnée ci-dessus ne s'applique que pour les cas où le flux de chaleur surfacique est uniforme ou la température surfacique est uniforme.

D_h , représente le diamètre hydraulique du collecteur solaire en considérant le flux à travers le collecteur comme étant celui entre deux plaques parallèles. Il s'exprime par :

$$D_h = 2 * H_{coll} \quad (4.33)$$

De l'équation de continuité, on déduit :

$$\dot{m}_a = \rho_{a,o} \frac{\pi}{4} D_t^2 u_t = \rho_a \pi D_{coll} H_{coll} u_{coll} \quad (4.34)$$

Où :

$$\rho_a = \frac{\rho_{a,i} + \rho_{a,o}}{2} \quad (4.35)$$

La vitesse moyenne à travers le collecteur peut être exprimée par :

$$\bar{u}_{coll} = \frac{\dot{m}_a}{2\pi\rho_a(r_{coll} - r_t)} \int_{r_t}^{r_{coll}} \frac{dr}{r} = \frac{\dot{m}_a}{2\pi\rho_a(r_{coll} - r_t)} \ln \frac{r_{coll}}{r_t} \quad (4.36)$$

Où : r_{coll} et r_t sont respectivement, les rayons du collecteur et de la cheminée.

Le coefficient de transfert thermique de l'air ambiant est donné par :

$$h_\infty = 5.7 + 3.8u_w \quad (4.37)$$

La vitesse de l'air chaud à la sortie du collecteur (entrée de la tour) est estimée en utilisant l'équation de Bernoulli donnée par :

$$u_t = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho_{a,o}}} \quad (4.38)$$

La différence de pression entre l'air à la base de la tour et l'air ambiant à la sortie est donnée par :

$$\Delta p = g \int_0^{H_t} (\rho_{a,o} - \rho_\infty) dH_t = g(\rho_{a,o} - \rho_\infty) H_t \quad (4.39)$$

L'application de l'approximation de Boussinesq, l'équation donnant l'expression de la vitesse de l'air à la sortie du collecteur sera :

$$u_t = \sqrt{\frac{2g(T_{a,o} - T_\infty)H_t}{T_\infty}} \quad (4.40)$$

La puissance électrique produite est ainsi donnée par :

$$p_e = \frac{1}{3} \eta_{wt} \rho_{a,o} A_t u_t^3 \quad (4.41)$$

IV.4. Développement du modèle mathématique :

Le système d'équation obtenu est composé de deux équations à trois inconnues : m_a , T_s et $T_{a,o}$ avec le rayonnement solaire et la température ambiante qui sont dépendants du temps. On choisit ainsi de décrire $T_{a,o}$ en fonction de m_a et T_s à partir de l'équation (4.28) et l'injecter dans l'équation (4.26). Les étapes sont décrites comme suit :

1. On injecte les équations (4.27) et (4.28) dans (4.26):

$$\alpha G A_{coll} - h_i A_{coll} \left(T_s - \frac{T_{a,o} - T_{a,i}}{2} \right) = \rho_s H_s A_{coll} C_p s \frac{dT_s}{dt} \quad (4.42)$$

2. On injecte l'équation (4.29) dans (4.28) pour obtenir :

$$h_i A_{coll} \left(T_s - \frac{T_{a,o} - T_{a,i}}{2} \right) - h_\infty A_{coll} \left(\frac{T_{a,o} - T_{a,i}}{2} - T_\infty \right) = m_a C_p a (T_{a,o} - T_{a,i}) \quad (4.43)$$

3. De la relation (4.31), on déduit l'expression de $T_{a,o}$:

$$T_{a,o} = \frac{h_i A_{coll} \left(T_s - \frac{T_{a,i}}{2} \right) - h_\infty A_{coll} \left(\frac{T_{a,i}}{2} - T_\infty \right) + m_a c_p a T_{a,i}}{m_a c_p a + \frac{h_i A_{coll}}{2} + \frac{h_\infty A_{coll}}{2}} \quad (4.44)$$

En injectant (4.44) dans (4.43), on trouve :

$$\frac{dT_s}{dt} = \frac{\alpha G}{\rho_c * p_s * H_s} - \frac{h_i}{\rho_c * p_s * H_s} \left[T_s - \frac{\left(\frac{m_a * c_p a}{A_{coll}} \right) + \frac{1}{2} (h_i * T_s + h_\infty * T_\infty)}{\left(\frac{m_a * c_p a}{A_{coll}} \right) + \frac{1}{2} (h_i + h_\infty)} \right] \quad (4.45)$$

Remarque :

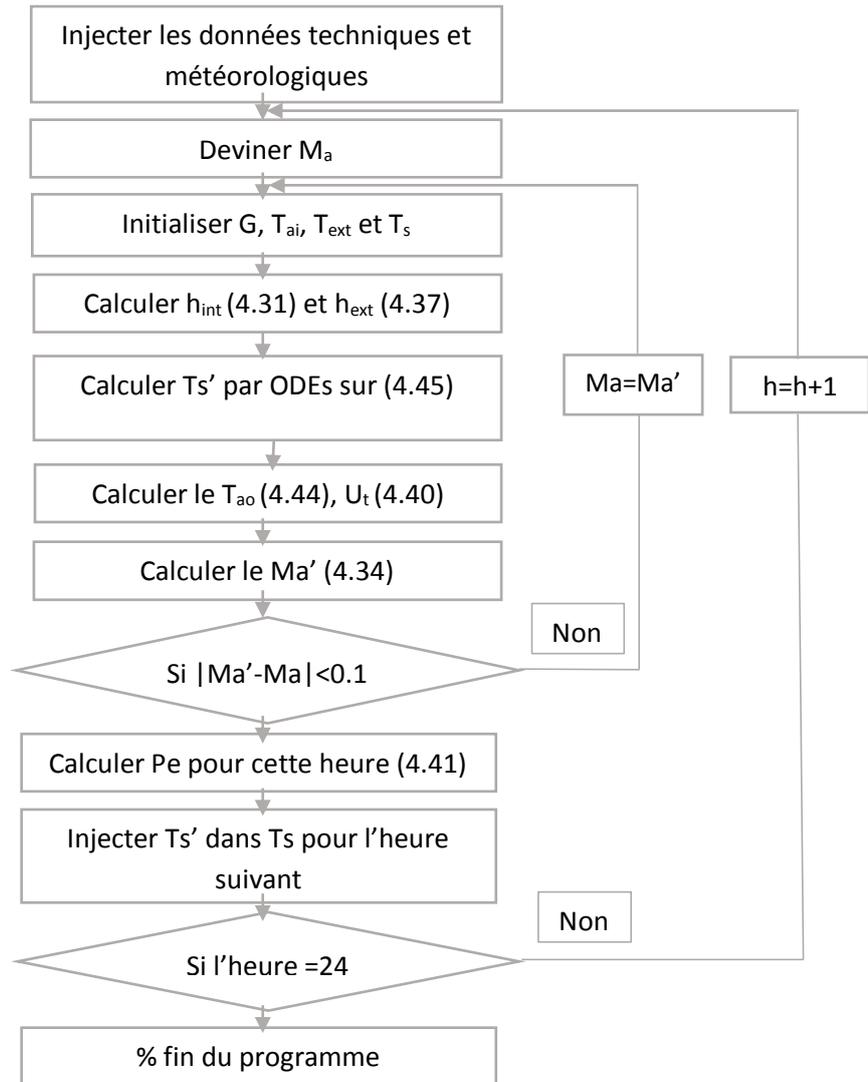
Un module appelé **ODEs** (Ordinary Differential Equation solver) sur le logiciel Matlab va être utilisé pour la résolution de cette équation différentielle.

L'algorithme de la procédure de résolution est :

L'algorithme de résolution de notre modèle est le suivant :

<i>Variables</i>		
1-	j entier	
2-	Ma, Ts', hint, hext, Tao, Ut, Ma', Pe réels	
<i>Début</i>		
3-	Définir T	%vecteur
4-	Définir Gt	%vecteur
5-	Définir Dt, Dcoll, Mua, Pr, k, Uwind, Hext, Rhos, α, cps, Hs, Cpa, Acoll, Dt, Hcoll, Rhoa	%voir nomenclature
6-	Pour 1<j<24 faire	%heure de la journée
7-	Affecter à Ma : #	%deviner une valeur
8-	répéter	%début do...while
9-	Initialiser Tai, Text, G, Ts	
10-	Affecter à hint : l'équation (4.31)	
11-	Affecter à hext : l'équation (4.37)	
12-	Affecter à Ts' : ODEs [l'équation (4.45)]	
13-	Affecter à Tao : l'équation (4.44)	
14-	Affecter à Ut : l'équation (4.40)	
15-	Affecter à Ma' : l'équation (4.34)	
16-	Tant que (Ma - Ma')>0.1	%fin do...while
17-	Affecter à Pe : l'équation (4.41)	
18-	Affecter à Ts : Ts'	%pour l'heure suivant
19-	Affecter à j : j+1	%passage à l'heure suivant
20-	dessiner le graphique	
<i>Fin du programme</i>		

L'organigramme de la procédure de résolution :



Chapitre V
Résultats et discussions

V.1. Introduction

Le présent chapitre est relatif à l'analyse des performances énergétiques des centrales à cheminée solaire (CCS). Deux types de centrales ont été analysés : les centrales sans stockage thermique et les centrales avec stockage thermique. Les analyses des performances énergétiques de ces centrales sont basées sur les modèles mathématiques vus au chapitre IV. Les données techniques de la CCS du site de Manzanares ont été utilisées et appliqués conjointement aux données météorologiques du site d'Adrar pour apprécier ou non l'importance de la puissance électrique récupérée mensuellement. Ces analyses sont basées essentiellement sur le modèle de Schlaich [6]. Les résultats obtenus ont été validés expérimentalement et théoriquement par d'autres issus de la littérature.

V.2. Données météorologiques du site, objet de l'étude:

Les données météorologiques (température ambiante et irradiation solaire) du site d'Adrar pour les mois de Janvier à Aout sont données par les figures V.1 à V.8. Ces figures montrent que la température moyenne journalière la plus faible est celle du mois de janvier et est égale à 23°C, tandis que la température moyenne journalière maximale correspond au mois de juillet et est égale à 47°C. Il est à noter que le rayonnement solaire minimal est relatif au mois de janvier et est égal à 450 W/m², tandis que le rayonnement solaire maximal correspond au mois de juillet et est égal à 1100 W/m².

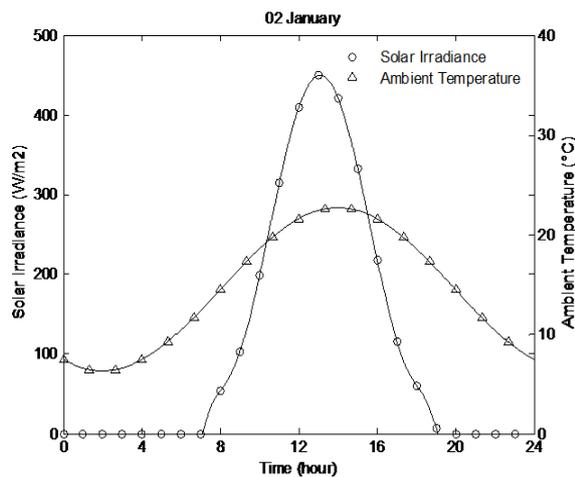


Figure V-1 Variation de l'irradiation solaire et la température ambiante avec le temps.

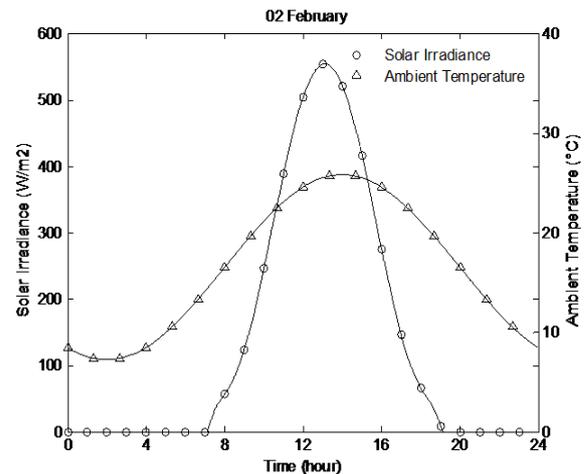


Figure V-2 Variation de l'irradiation solaire et la température ambiante avec le temps

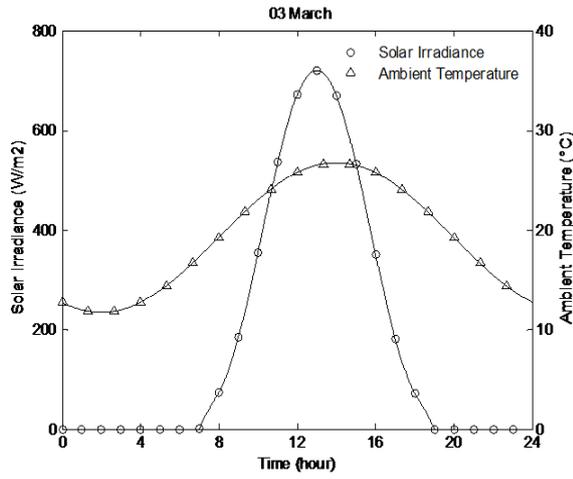


Figure V-3. Variation de l'irradiation solaire et la température ambiante avec le temps.

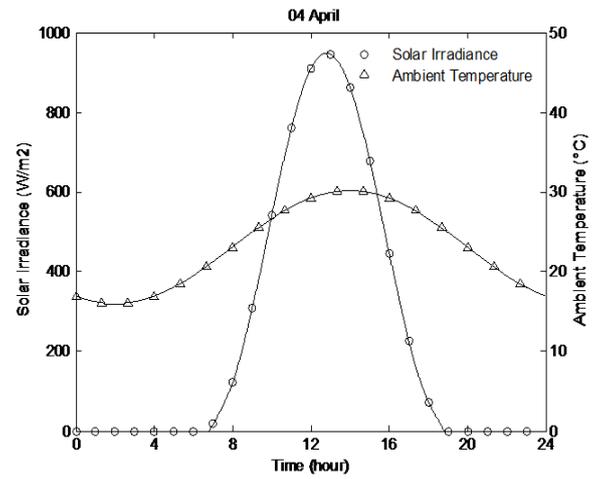


Figure V-4. Variation de l'irradiation solaire et la température ambiante avec le temps.

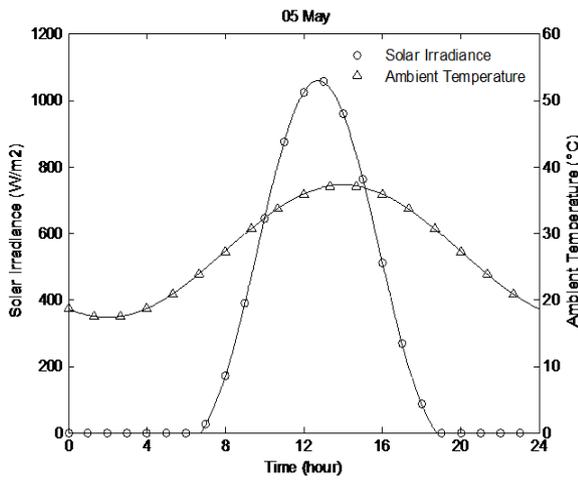


Figure V-5. Variation de l'irradiation solaire et la température ambiante avec le temps.

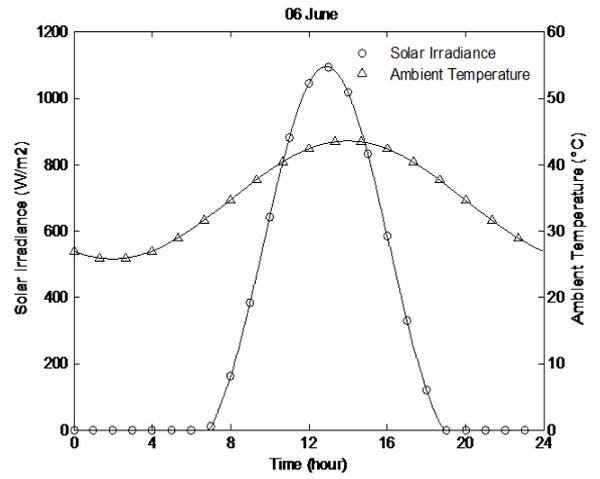


Figure V-6. Variation de l'irradiation solaire et la température ambiante avec le temps.

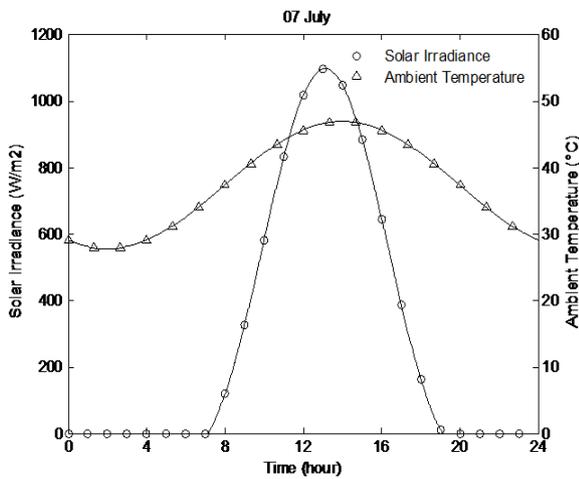


Figure V-7. Variation de l'irradiation solaire et la température ambiante avec le temps.

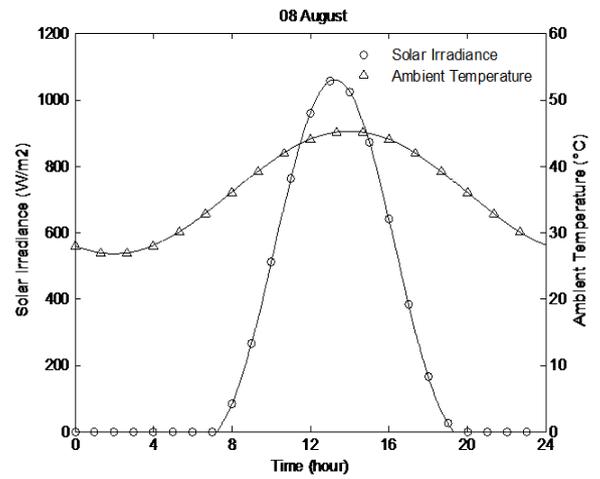


Figure V-8. Variation de l'irradiation solaire et la température ambiante avec le temps.

V. 3. Analyse des performances énergétiques des CCS sans stockage thermique

V.3.1. Application du prototype de Manzanares au site d'Adrar

Cette analyse est basée sur le modèle mathématique (modèle de Schlaich qui permet de prédire les performances des centrales à cheminée solaire sans stockage thermique) développé dans le chapitre précédent. Pour cette analyse, on désire quantifier l'importance de la puissance produite par la centrale de Manzanares si cette dernière était implantée dans la région d'Adrar.

V.3.1. 1. Données techniques du prototype :

- 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;
- 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 m² ;
- Collecteur couvert de verre : 6000 m².

Les figures V.9 à V.16 montrent l'évolution de la puissance produite pour les mois de janvier à Aout. On note pour l'ensemble des graphs une production nulle pendant la nuit, ce qui est évident pour ce modèle qui ne prend pas en considération le stockage thermique. La puissance évolue pendant le jour jusqu'à atteindre un pic entre 12 et 14 heures. Pour les mois les moins ensoleillés (janvier, février et mars) on note une puissance produite d'environ 35kW. Il est à noter qu'il existe une évolution importante de la puissance produite à partir du mois d'Avril où la puissance maximale produite atteint presque 60 kW, la puissance maximale de 65 MW est produite dans les mois les plus ensoleillés (juin à aout).

Ces résultats sont bien supérieurs à ceux obtenus au site de Manzanares compte tenu qu'Adrar est une région bien plus ensoleillée que la région de Manzanares. De plus, même si le modèle théorique de Schlaich [6] ne prend pas en considération l'effet du stockage thermique, le stockage du sol influe sur les résultats expérimentaux.

Depuis ce qui a été dit on peut confirmer l'effet majeur de l'irradiation solaire sur la puissance électrique produite.

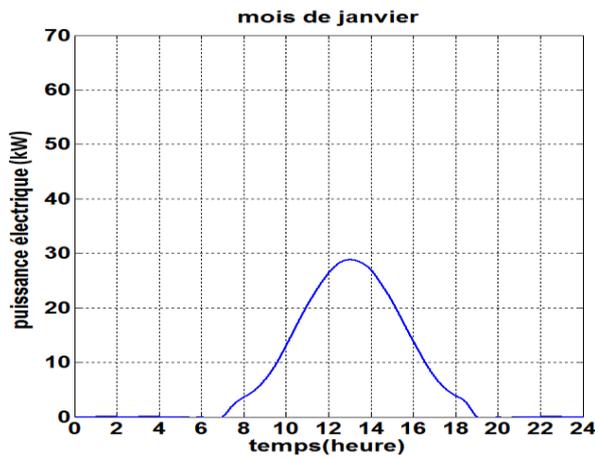


Figure V-9 Variation de la puissance en fonction du temps pour le mois de janvier

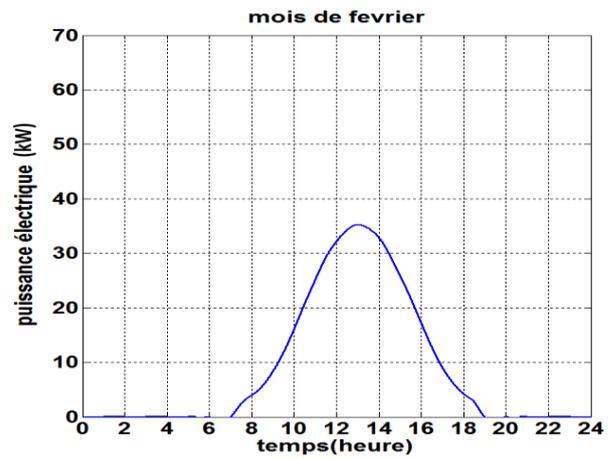


Figure V-10 Variation de la puissance en fonction du temps pour le mois de février

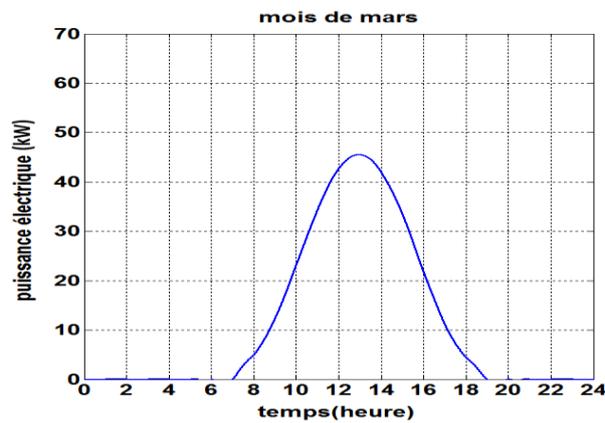


Figure V-12 Variation de la puissance en fonction du temps pour le mois de mars

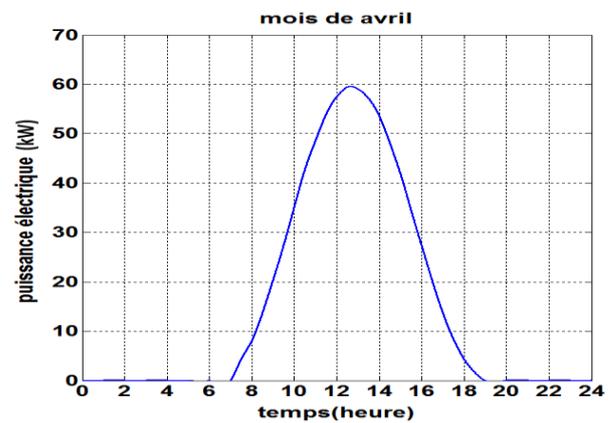


Figure V-11 Variation de la puissance en fonction du temps pour le mois de avril

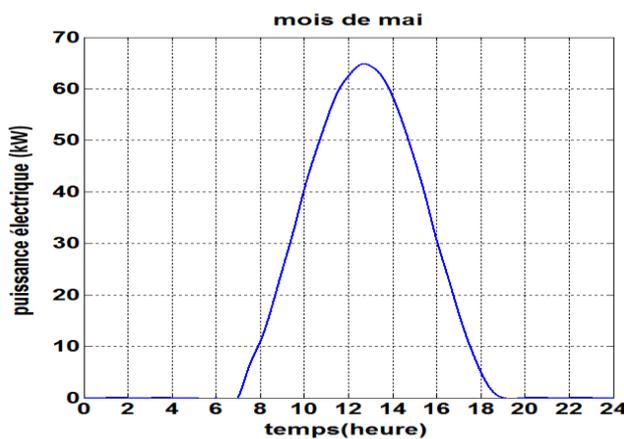


Figure V-13 Variation de la puissance en fonction du temps pour le mois de mai

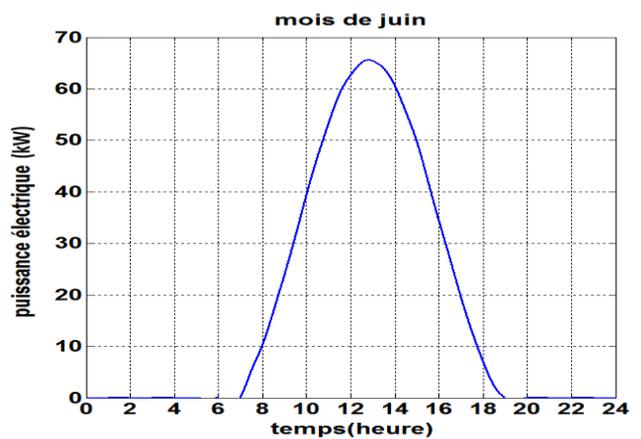


Figure V-14 Variation de la puissance en fonction du temps pour le mois de juin

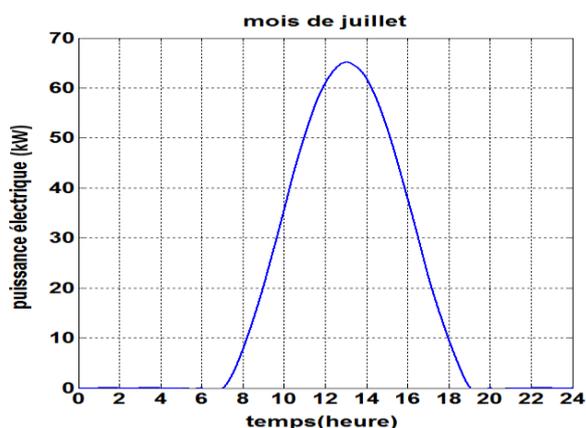


Figure V-16 Variation de la puissance en fonction du temps pour le mois de juillet

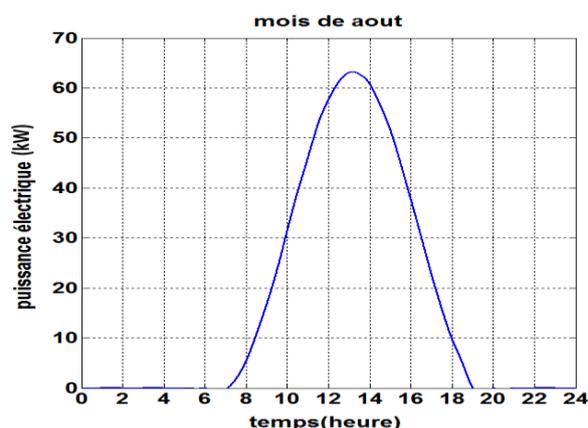


Figure V-15 Variation de la puissance en fonction du temps pour le mois d'août

V.3.2. Etude de CCS pour une production à grande échelle

L'analyse basée sur le modèle de Schlaich [6] pour différentes puissances de CCS donne les dimensions du collecteur et de la cheminée. Le tableau V-1 donne le diamètre du collecteur et la hauteur de la cheminée correspondants à différentes puissances de CCS (50, 100, 150 et 200 MW).

Tableau V-1. Dimensions de la CCS fonction de la puissance fournie.

Puissance maximale (MW)	50	100	150	200
D_{coll} (m)	2800	3800	4500	5000
H_c (m)	760	820	880	950

Les figures V.17 à V. 24 montrent que pour les dimensions données par le tableau 5-1 on observe une évolution similaire pour les différentes puissances données. On note également une puissance nulle pendant la nuit pour l'ensemble des mois compte tenu que le modèle de Schlaich [6] ne prend pas en considération l'effet du stockage, pendant le jour. Une évolution de la puissance atteignant un pic entre 12 et 14 heures et diminuant jusqu'à s'annuler est également observée.

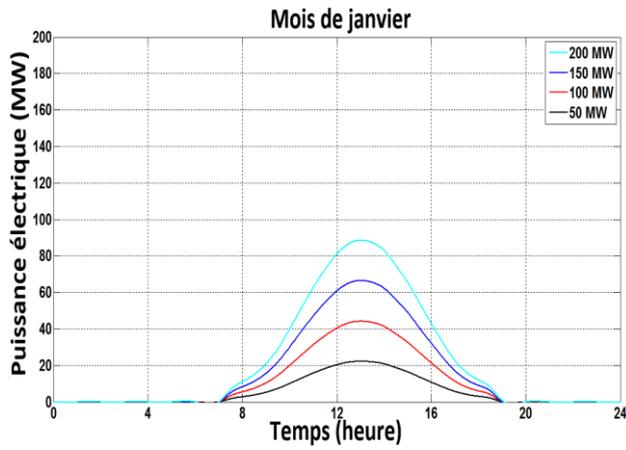


Figure V-17 Puissance produite durant le mois de Janvier.

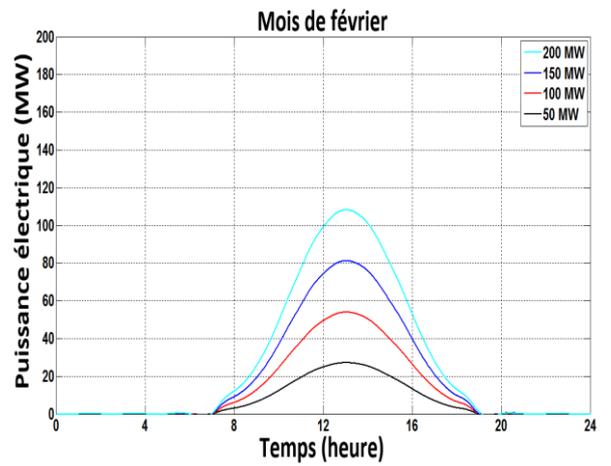


Figure V-18 Puissance produite durant le mois de Février.

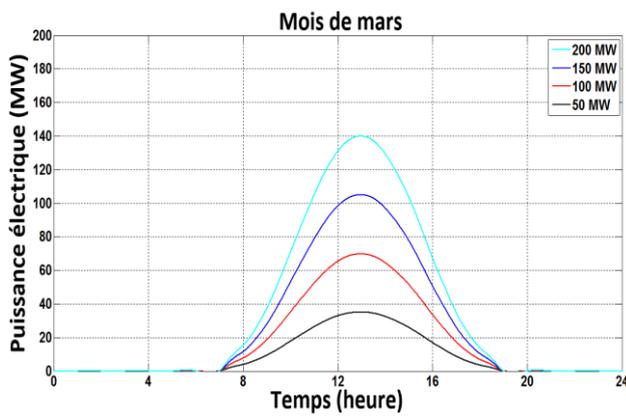


Figure V-19 Puissance produite durant le mois de Mars.

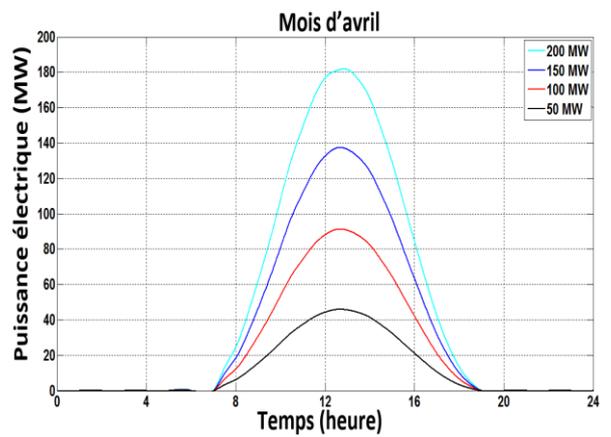


Figure V-20 Puissance produite durant le mois d'Avril.

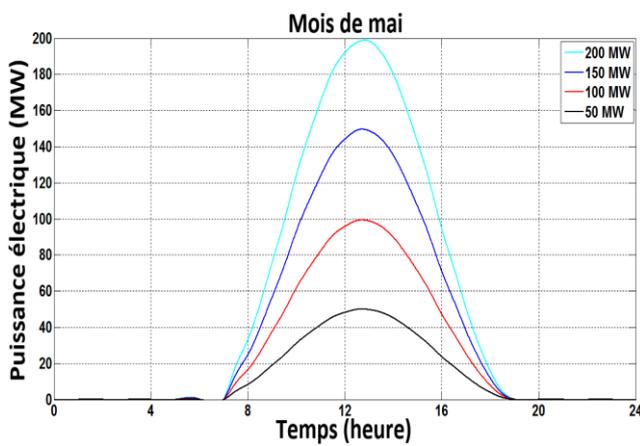


Figure V-21 Puissance produite durant le mois de Mai.

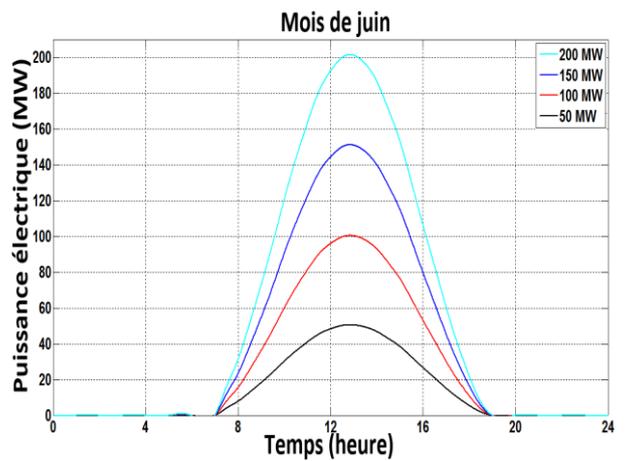


Figure V-22 Puissance produite durant le mois de Juin.

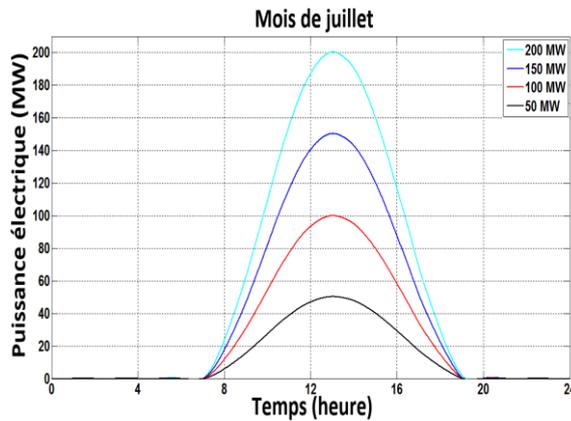


Figure V-23 Puissance produite durant le mois de Juillet.

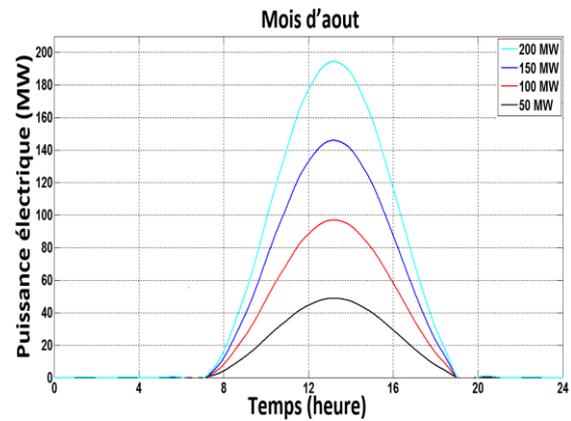


Figure V-24 Puissance produite durant le mois d'Aout

V.3.3. Influence de certains paramètres sur la puissance électrique produite

L'effet des paramètres dimensionnels sur les performances énergétiques des CCS a été analysé. Les paramètres étudiés sont : le diamètre du collecteur et la hauteur de la cheminée.

V.3.3.1. Variation du diamètre du collecteur en fonction de la puissance produite :

Le diamètre du collecteur est l'un des paramètres essentiels dans la construction de la centrale. En effet c'est lui qui permet à l'air d'absorber l'énergie solaire par l'effet de serre. Il détermine aussi la surface du collecteur qui va être couverte et joue donc un rôle dans la détermination du coût de revient de la CCS. Ce qui fait justifie pleinement son choix dans l'analyse de son influence sur les performances de la centrale.

Les données utilisées sont :

$$T_0 = 320\text{K} ; G = 1098 \text{ W/m}^2 ; \eta_{\text{coll}} = 0.6 ; \eta_{\text{wt}} = 0.8 ; H_c = 1000 \text{ m.}$$

La figure V.25 montre l'évolution du diamètre du collecteur en fonction de la puissance électrique produite. Notons que cette évolution est quasi- proportionnelle mais non linéaire entre la puissance produite et le diamètre du collecteur, car l'augmentation dans le diamètre du collecteur entraîne une augmentation dans l'énergie solaire absorbée par l'air. L'énergie solaire emmagasinée sera convertie en énergie cinétique de mouvement d'air qui va être à son tour convertie en énergie électrique. On note que pour une puissance de 200 MW le diamètre du collecteur peut atteindre presque 5000 mètres et pour une puissance de 12 MW on aura besoin d'un collecteur de 1000 mètres de diamètre.

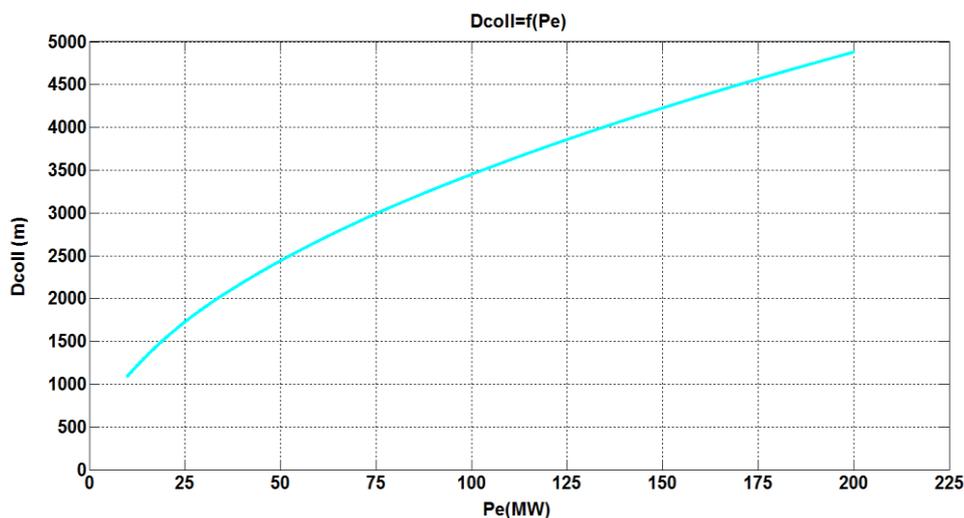


Figure V-25 Variation du diamètre du collecteur en fonction de la puissance produite.

V.3.3.2. Variation de la hauteur de la cheminée en fonction de la puissance produite :

La hauteur de la cheminée représente l'un des paramètres essentiels dans la détermination des performances des CCS, de plus la hauteur de la cheminée peut atteindre les 1000 mètres et plus, ce qui peut présenter un « challenge » de génie civil lors de sa construction de plus complexe qui augmentera le coût d'investissement. Ce qui justifie la prise en compte de ce paramètre dans l'analyse de l'influence de la hauteur de la cheminée sur les performances des CCS. La figure V.26 montre l'évolution de la hauteur de la cheminée en fonction de la puissance électrique produite.

Les données utilisées sont :

$$T_0 = 320\text{K} ; G = 1098 \text{ W/m}^2 ; \eta_{\text{coll}} = 0.6 ; \eta_{\text{wt}} = 0.8 ; D_{\text{coll}} = 5000 \text{ m.}$$

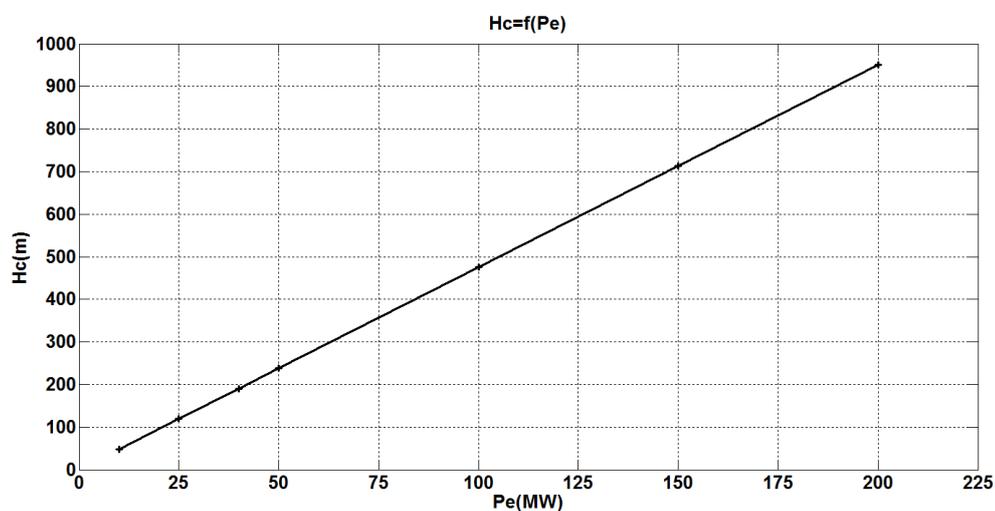


Figure V-26 Variation de la hauteur de la cheminée en fonction de la puissance produite.

La figure montre une évolution linéaire entre la hauteur de la cheminée et la puissance produite. En augmentant la hauteur de la tour cheminée la différence de pression de l'air entre la base de la tour et son sommet augmente ce qui provoque une augmentation du débit d'air circulant dans la veine cheminée. Cette augmentation s'accompagne par une augmentation de la vitesse de l'air ainsi que la puissance produite. On note que pour une puissance de 200 MW la tour doit atteindre 1000 mètres de hauteur alors que pour une puissance de 12 MW on aura besoin que de 60 mètres de hauteur pour la tour.

V.3.3.3. Variation de la vitesse d'écoulement, V_c , en fonction du diamètre du collecteur :

L'effet du diamètre du collecteur sur la vitesse de l'air à l'entrée de la tour a été analysé. Les données utilisées sont :

$$T_0 = 320\text{K} ; G = 1098 \text{ W/m}^2 ; \eta_{\text{coll}} = 0.6 ; \eta_{\text{wt}} = 0.8 ; \Delta T = 25\text{K} ; D_{\text{cheminée}} = 50 \text{ m.}$$

La figure V. 27 montre une évolution proportionnelle mais non linéaire entre le diamètre du collecteur et la vitesse d'écoulement d'air à l'entrée de la cheminée. L'augmentation du diamètre du collecteur entraîne une augmentation d'énergie solaire absorbée et par conséquent la vitesse de l'air augmente aussi. Pour un diamètre de collecteur égal à 1000 m, la vitesse de l'air à la sortie de ce dernier est égale à 9m/s alors que pour un diamètre du collecteur de 2000 mètres la vitesse de l'air à la sortie de ce dernier atteint 36 m/s.

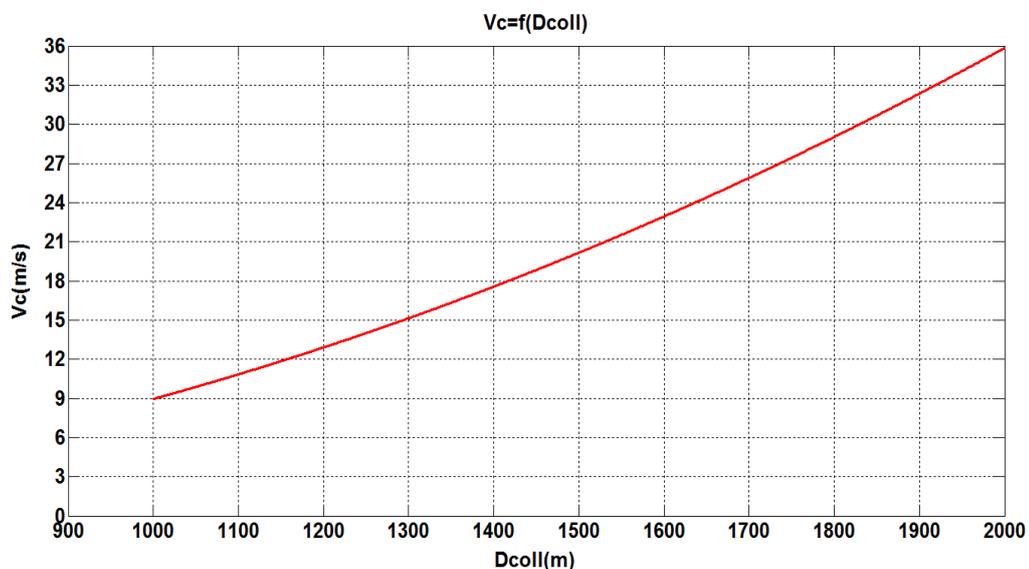


Figure V-27 Variation de la vitesse d'écoulement d'air en fonction

V.4. Analyse des performances énergétiques des CCS avec stockage thermique

V.4.1. Validation du modèle mathématique:

Afin de valider le modèle mathématique utilisé (voir chapitre IV) pour la modélisation des performances énergétiques des CCS dotées de système de stockage thermique, les résultats théoriques obtenus par notre programme MATLAB (vitesse de l'air à la sortie du collecteur et puissance électrique produite) ont été comparés avec les données expérimentales du prototype de Manzanares.

En plus des données géométriques de la CCS, les données météorologiques (rayonnement solaire et température ambiante) ont été injectées dans notre programme MATLAB afin de pouvoir déterminer les performances énergétiques par calcul.

Les données techniques injectées dans le programme MATLAB, déterminées suivant une température de fonctionnement moyenne de 300K sont:

- Le produit de transmittance et d'absorbance du collecteur de 0.65 ;
- Le coefficient d'absorptivité de l'eau du stockage de 0.8 ;
- La masse volumique de l'eau égale à 1000 kg/m^3 ;
- La chaleur spécifique de l'eau égale à 4178 J/kg.K ;
- La masse volumique du sol égale à 1900 kg/m^3 ;
- La chaleur spécifique du sol égale à 840 J/kg.K ;
- La conductivité thermique du sol égale à $k=1.26 \text{ W/m.K}$;
- La chaleur spécifique de l'air égale à 1006 J/kg.K ;

Le modèle mathématique a été validé suivant deux données expérimentales :

- Suivant la température d'air à la sortie du collecteur fournie par Haaf [79] ;
- Suivant la puissance électrique produite fournie par Schlaich [6].

V.4.1. 1. Validation par la température de l'air à la sortie du collecteur

Comme il est déjà mentionné, les données météorologiques du site de Manzanares du 2 septembre 1982 (voir figure V.28.a) fournies par Haaf [79] ont été utilisées pour la validation du modèle mathématique. Les résultats générés par le programme MATLAB ont été comparés aux résultats expérimentaux du prototype de Manzanares de la même journée.

La figure (V.28.b) montre la comparaison entre les résultats théoriques et expérimentaux à la sortie du collecteur durant la journée. Il est à noter que le modèle mathématique de Hammadi [55], dont les équations ont été résolues numériquement par notre programme sous environnement MATLAB, présente un accord satisfaisant comparativement aux résultats expérimentaux. Cet accord est montré clairement suivant l'ensemble des résultats expérimentaux de la journée. Les résultats théoriques de Haaf [79] présentent un large écart par rapport aux résultats expérimentaux pendant que nos résultats représentent un écart maximal de 4°C.

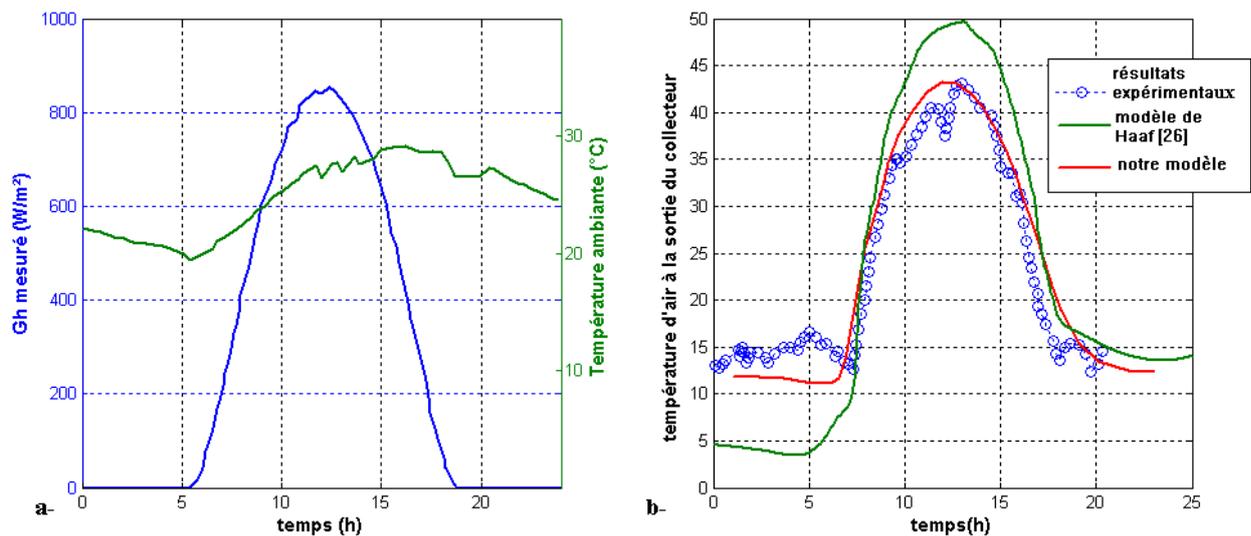


Figure V-28 (a) : Données météorologiques du 2 septembre 1982 du site de Manzanares
(b) : Evolution au cours du temps de la température de l'air à la sortie du collecteur.

V.4.1. 2. Validation par la puissance électrique produite :

En injectant les données météorologiques du 8 juin 1987, fournies par Schlaich [25] (voir figure V.29.a) dans notre programme MATLAB et en prenant en considération tous les paramètres considérés et en considérant le sol comme milieu du stockage, nous obtiendront les résultats relatifs au calcul de performances des CCS avec stockage thermique.

Les résultats ainsi obtenus sont comparés à ceux obtenus expérimentalement (fournis par Schlaich [25] dans une perspective de validation des résultats issus du modèle utilisé en terme de puissance électrique produite.

Dans cet esprit, trois configurations ont été examinées dans le souci de tester la configuration pouvant approcher le mieux les résultats expérimentaux du prototype de Manzanares. Les modèles de configurations utilisées sont :

- Modèle d'une CCS sans stockage (modèle de Schlaich) ;
- Modèle d'une CCS avec eau de stockage (10cm d'épaisseur) ;
- Modèle d'une CCS avec le sol comme milieu de stockage (roche calcaire).

La figure (V.29.b) montre la comparaison entre les résultats théoriques et expérimentaux des puissances électriques calculées et mesurées durant la journée du 8 juin 1987. Les résultats montrent l'effet de deux paramètres différents : la présence et l'absence du rayonnement solaire et l'effet du stockage du sol sur la puissance électrique produite.

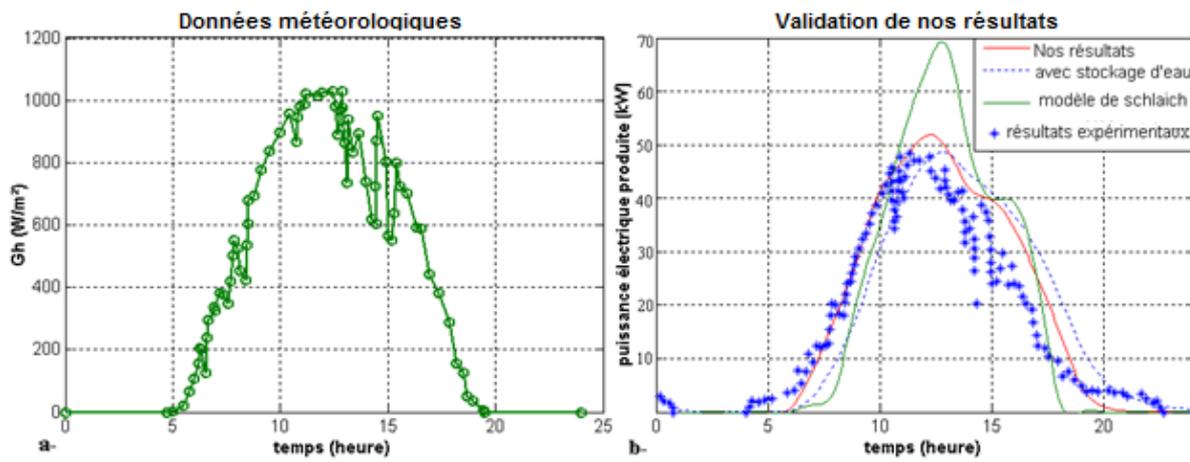


Figure V-29 (a)- Rayonnement horizontal journalier ; (b)- Puissance électrique produite.

Après 23h et avant 5h, aucune production d'électricité n'est remarquée, cela revient essentiellement à l'absence du rayonnement solaire. Entre 5h et 19h, la production d'électricité croît puis décroît en atteignant un pic de 48.9 kW entre 11h et 13h en suivant clairement le profil de la courbe du rayonnement solaire journalier. De 19h à 23h, une production d'électricité faible mais existante même avec l'absence du rayonnement solaire représentant ainsi une preuve de l'effet du stockage thermique du sol.

La validation de notre modèle prend en considération le sol comme milieu du stockage (courbe en rouge sur la figure V.29.b). Il est à noter que le modèle génère des résultats très proches de ceux obtenus expérimentaux : un très bon accord est obtenu pendant plusieurs heures de la journée, avec une déviation légère pendant le soir et vers la nuit. Ce résultat montre la validation de notre modèle.

En ce qui concerne les modèles physiques utilisés pour l'approche du prototype de Manzanares, il est clair que le modèle relatif à la configuration du sol comme milieu de stockage (roche calcaire) est le mieux adapté. Les résultats issus du modèle de Schlaich [6] (sans stockage) donnent un écart important entre ceux obtenus par le modèle et les résultats expérimentaux obtenus sur site. Cet écart est dû au fait que le modèle est simplifié et ne prend en considération ni le stockage ni les pertes thermiques. La configuration relative à l'utilisation de l'eau comme milieu de stockage est moins bon par rapport à celui du sol pour la période journalière mais il présente donne de bons résultats en ce qui concerne le stockage thermiques entre 19h et 23h.

V.4.2. Effets de la variation des paramètres techniques sur la puissance électrique produite :

Nous nous sommes intéressés dans ce paragraphe à analyser l'effet de la variation de certains paramètres techniques sur la production électrique de centrales à cheminée solaire, équipées d'un système de stockage thermique et utilisant les données météorologiques du site d'Adrar

L'analyse a été faite en considérant les points suivant :

- i. Deux types différents de CCS :
 - a- Une centrale de l'échelle du prototype de Manzanares ;
 - b- Une centrale de grande échelle de puissance nominale théorique produite de 200MW ;

- ii. Deux mois différents :
 - a- Le mois le plus ensoleillé : moi de juillet ;
 - b- Le mois le moins ensoleillé : moi de décembre.

- iii. Deux données météorologiques du site d'Adrar :
 - a- La température ambiante journalière (figure V.30);
 - b- Le rayonnement solaire journalier (figure V.30).

- iv. Variation de cinq paramètres techniques différents :
 - a- La hauteur du stockage ;
 - b- Le diamètre de la cheminée ;
 - c- La hauteur de la cheminée ;
 - d- Le rayon du collecteur ;
 - e- La vitesse du vent.

La figure V.30 illustre l'évolution au cours du temps du rayonnement solaire et de la température ambiante pour les mois de Juillet et de décembre. Ces données météorologiques ont été choisies pour le mois qui correspondent au maximum et au minimum de rayonnement solaire. Les dimensions de CCS considérées dans cette étude sont données au tableau V-2.

Tableau V-2 Dimensions de la CCS de Manzanares avec celle de 200 MW.

	Prototype de Manzanares	Centrale de 200MW
Diamètre de la cheminée	10m	150m
Hauteur de la cheminée	195m	1000m
Diamètre du collecteur	244m	5000m

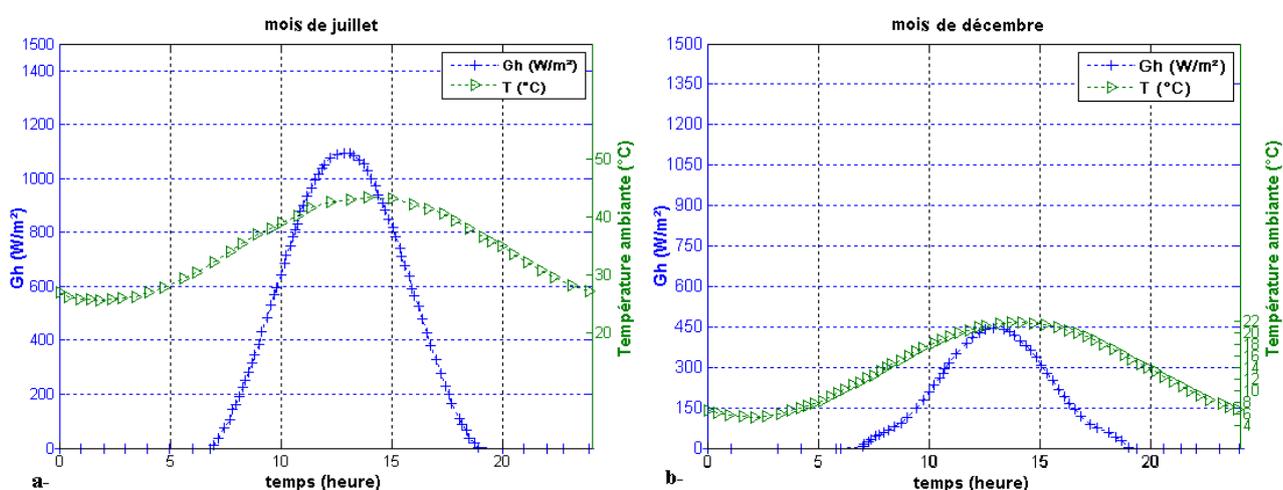


Figure V-30 Données météorologiques d'Adrar relatives aux mois de juillet et décembre.

V.4.2. 1. Effet de la hauteur du stockage (Hs) :

Le modèle utilisé considère le milieu du stockage comme une couche située juste au-dessus du sol et sous le collecteur, d'une hauteur Hs et d'une surface égale à celle du collecteur. Les figures (V.31.a) et (V.31.b) donnent la puissance électrique produite pour le prototype de Manzanares pour différentes couches épaisseurs de stockage. Les figures (V.32.c) et (V.32.d) représentent les résultats pour la centrale de 200MW. Trois épaisseurs de stockage ont été considérées : 5cm, 15cm et 30cm. La figure V.31 montre que plus la hauteur du stockage est élevée plus l'effet du stockage devient important aux extrémités des courbes et donc plus la puissance électrique produite pendant les périodes non-enseillées est plus grande. Cet effet est plus efficace pour les périodes les mieux ensoleillées (mois de juillet).

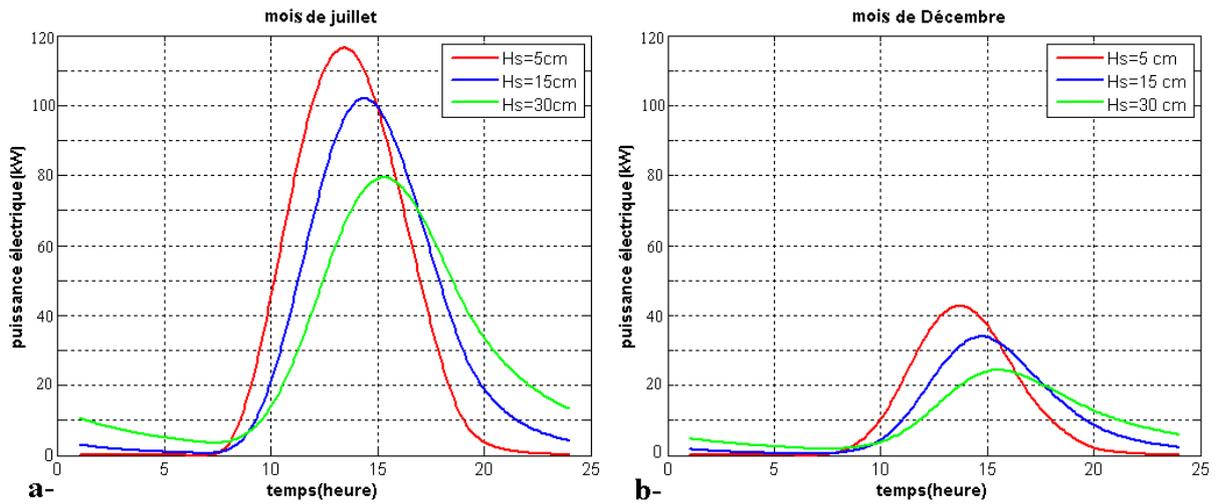


Figure V-31 Puissance électrique produite pour différentes épaisseurs de stockage et correspondants aux mois de Juillet et Décembre (Cas du site de Manzanares).

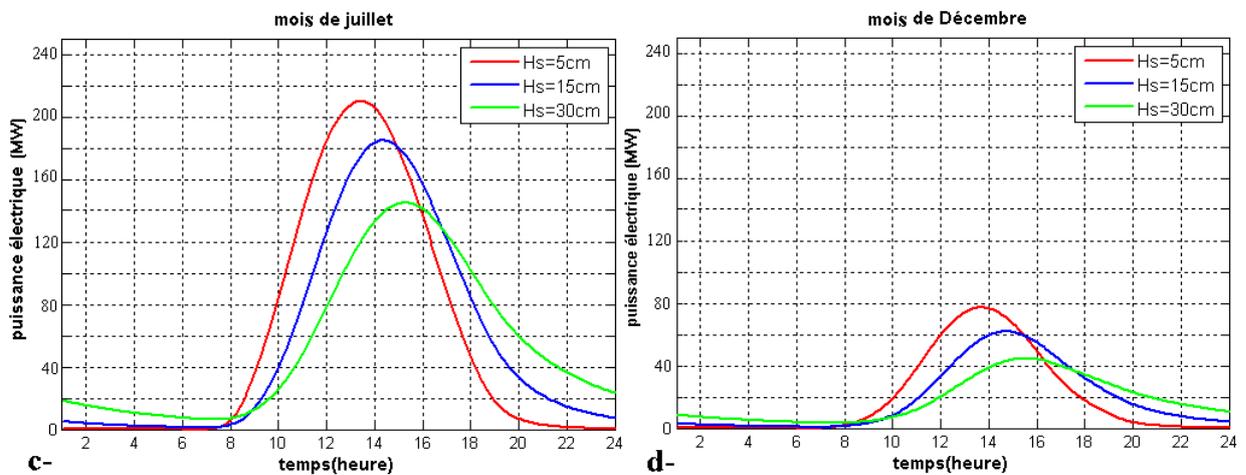


Figure V-32 Puissance électrique produite pour différentes épaisseurs de stockage et correspondants aux mois de Juillet et Décembre (Cas de la CCS de 200 MW).

Il est à mentionner que pour $H_s=30\text{cm}$, le prototype de Manzanares dépasse les 10 kW à minuit pour le mois de juillet et que la centrale de 200MW pour les mêmes données dépasse les 20MW (voir figure V.32.c) à minuit. Ainsi, l'énergie thermique qu'emmagasine le milieu de stockage pendant les périodes ensoleillées est libérée pendant les périodes non-ensoleillées.

Dans le même sujet, on note une sévère atténuation du pic accompagnant l'augmentation de la hauteur du stockage. Cela peut être expliqué par le fait que plus la quantité du stockage est grande, plus la fraction d'énergie thermique emmagasinée est grande, moins est l'énergie transférée à l'air chauffé.

Il est à mentionner que pour une $H_s=30\text{cm}$, le prototype de Manzanares dépasse les 10 kW à minuit pour le mois de juillet et que la centrale de 200MW pour les mêmes données dépasse les 20 MW à minuit. On peut déduire que l'énergie thermique qu'emmagasine le milieu du stockage pendant les périodes ensoleillées est libérée pendant les périodes non-ensoleillées.

Dans le même contexte, on note une sévère atténuation du pic accompagnant l'augmentation de la hauteur du stockage. Cela peut être expliqué par le fait que plus la quantité du stockage est grande, plus la fraction d'énergie thermique emmagasinée est grande, moins est l'énergie transférée à l'air chauffé.

On note aussi que l'énergie électrique journalière produite reste presque constante, ce qui mène à déduire que non pas la quantité d'énergie qui change avec le changement de la quantité du matériau du stockage, mais seul la distribution de la production d'électricité qui change et qui se déplace vers les périodes non-ensoleillées.

V.4.2.2. Effet du diamètre de la cheminée :

Le diamètre de la cheminée est un des paramètres essentiels entrant dans l'étude de la faisabilité dans la construction des CCS, c'est ainsi qu'il est recommandé de comprendre bien son rôle et son effet afin de maîtriser son optimisation. Nous allons ainsi essayer de comprendre l'effet de la variation de ce paramètre sur la production d'électricité des CCS équipées d'un système de stockage thermique.

Les figures (V.33.a) et (V.33.b) représentent les résultats pour le prototype de Manzanares et les figures (V.34.a) et (V.34.b) représentent les résultats pour la centrale de 200 MW. Pour cette analyse, nous avons considéré respectivement trois diamètres différents pour chaque centrale : (10 m, 20 m et 30 m) et (90 m, 120 m et 150 m).

La figure V.34 montre que la production d'électricité journalière est liée directement au diamètre de la cheminée. On peut noter le même effet pour les deux types de CCS étudiés et pour les mois de juillet et pour le mois de décembre. Plus le diamètre de la cheminée est grand plus est la puissance électrique journalière produite.

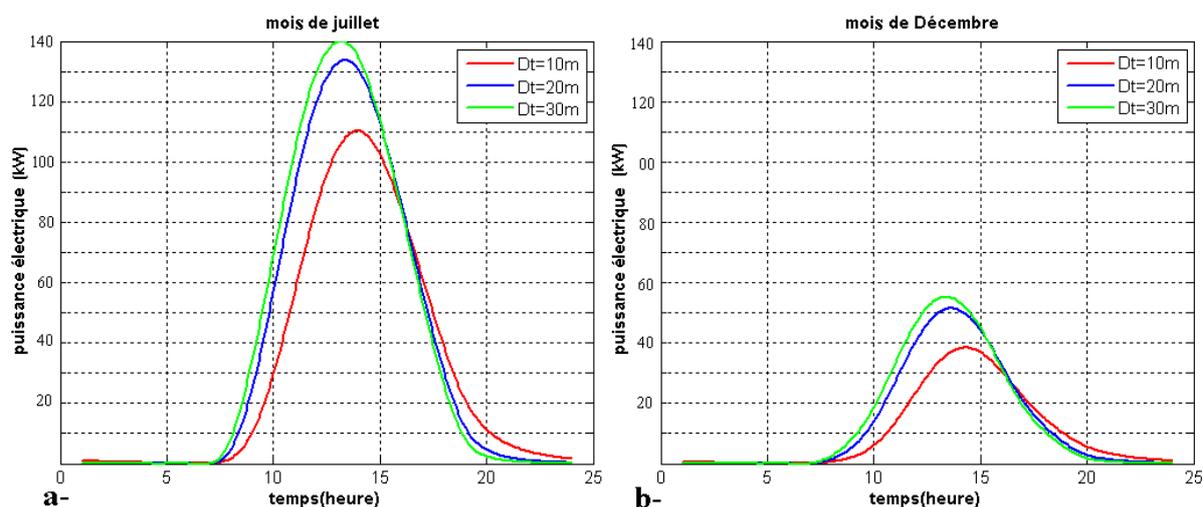


Figure V-33 Effet du diamètre de la cheminée sur la puissance produite (Site de Manzanares).

Cela revient essentiellement au débit d'air ascendant. Puisque la valeur de ce dernier augmente avec l'augmentation de la valeur du diamètre de la cheminée. En augmentant la vitesse de l'air à l'intérieur de la cheminée, son énergie cinétique qui va être convertie en énergie électrique.

Des figure V.33.a et V.33.b, On note qu'entre Dt=20m et Dt=30m l'augmentation du pic est restreinte par rapport à celle entre Dt=10m et Dt=20m. On peut déduire que le diamètre de la cheminée à une limite pour laquelle la puissance produite n'augmente plus, on déduit que le diamètre est un paramètre à optimiser avant la réalisation.

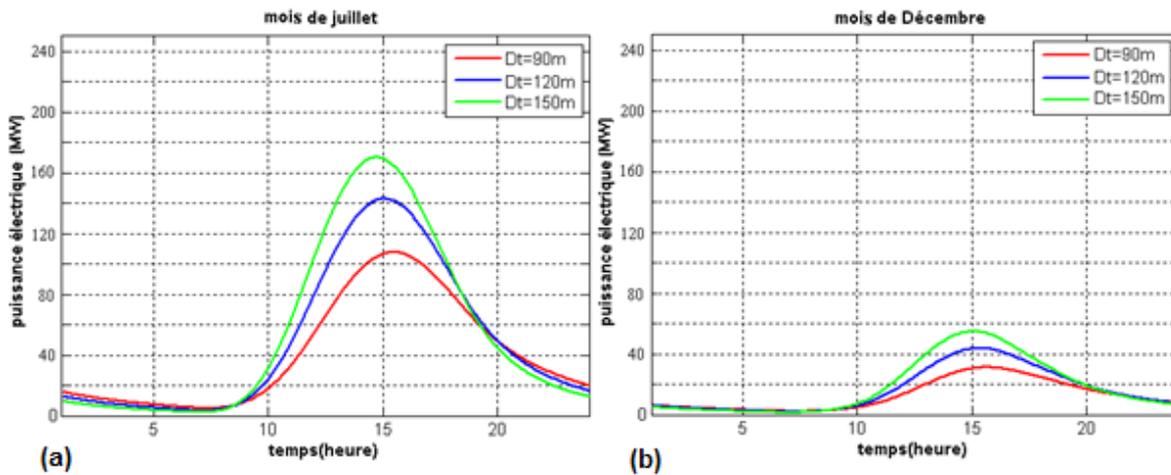


Figure V-34 Effet du diamètre de la cheminée sur la puissance produite (CCS de 200 MW).

V.4.2.3. Effet de la hauteur de la cheminée :

La hauteur de la cheminée est aussi considérée comme l'un des paramètres entrant dans l'étude de faisabilité de la construction des CCS, une cheminée très élevée nécessitera un investissement colossal, une optimisation de cet paramètre est à faire. Nous allons, sur cette section, essayer de comprendre l'effet de la variation de ce paramètre sur la production d'électricité des CCS équipée d'un système de stockage thermique.

Les figures (V.35.a) et (V.35.b) représentent les résultats pour le prototype de Manzanares et les figures (V.36.a) et (V.36.b) représentent les résultats pour la centrale de 200MW. Pour cette analyse, nous avons considéré respectivement trois hauteurs différentes pour chaque centrale : (200 m, 250 m et 300 m) et (800 m, 1000 m et 1200 m).

La figure V.36 montre que la production d'électricité journalière est aussi liée directement à la hauteur de la cheminée. On peut noter le même effet pour les deux types de CCS étudiés et pour les mois de juillet et décembre : plus la hauteur de la cheminée est élevée plus la puissance électrique journalière produite augmente considérablement.

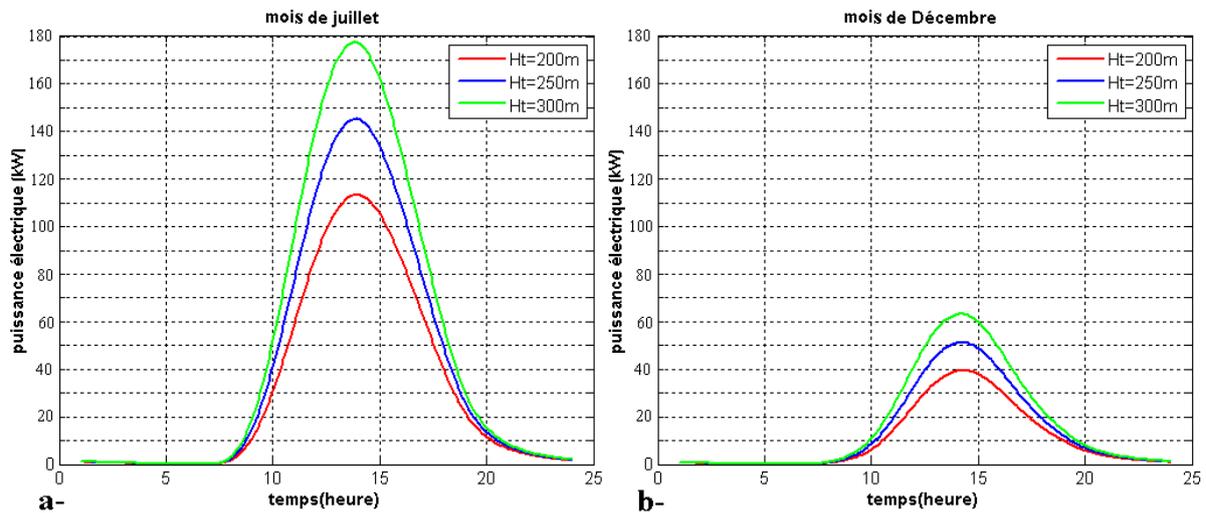


Figure V-35 Effet de la hauteur de la cheminée sur la puissance produite (Site de Manzanares).

Cela revient essentiellement à l’augmentation de la différence de pression entre l’air chaud situé à la base de la cheminée et l’air froid situé plus haut à l’extérieur de la cheminée. Cette différence de pression se traduit par l’effet de flottabilité des couches d’air chaud sur celles d’air froid. Ainsi, plus la différence de pression augmente, plus l’effet de flottabilité augmente, plus la vitesse de l’air ascendant augmente, plus son énergie cinétique augmente et plus l’énergie électrique produite augmente.

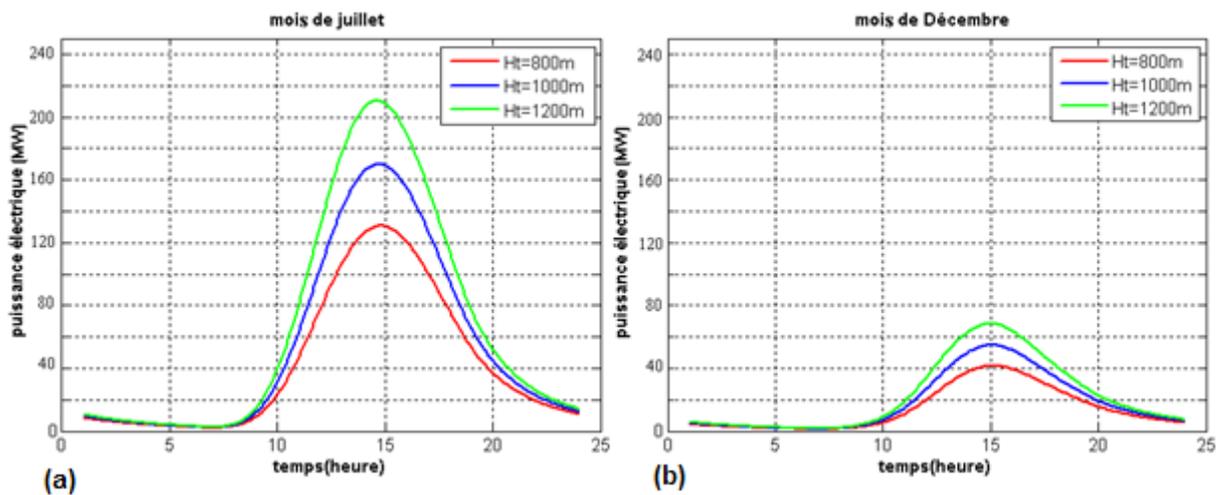


Figure V-36 Effet de la hauteur de la cheminée sur la puissance produite (CCS de 200 MW).

De la figure V.36 on note que l’élévation de la cheminée est accompagnée d’une augmentation de la puissance électrique produite. Il est ainsi nécessaire de chercher un critère d’optimalité permettant de produire plus de puissance électrique avec une hauteur optimale de cheminée, ce critère n’est pas assez évident à trouver. Seulement l’aspect construction et investissement décidera de sa valeur.

V.4.2.4. Effet du rayon du collecteur :

Le diamètre du collecteur représente un paramètre fondamental vu le coût nécessaire pour sa construction. Le coût du m² de parcelle de terre varie d'une région à une autre (le m² des terres agricoles est très cher), une optimisation de ce paramètre est nécessaire pour réduire les dépenses. Nous allons, sur cette section, essayer de comprendre l'effet de la variation de ce paramètre sur la production d'électricité des CCS équipée d'un système de stockage thermique.

Les figures (V.37.a) et (V.37.b) représentent les résultats pour le prototype de Manzanares et les figures (V.38.a) et (V.38.b) représentent les résultats pour la centrale de 200MW. Pour cette analyse, nous avons considéré respectivement trois rayons différents pour chaque centrale : (120 m, 240 m et 360 m) et (2000 m, 2500 m et 3000 m).

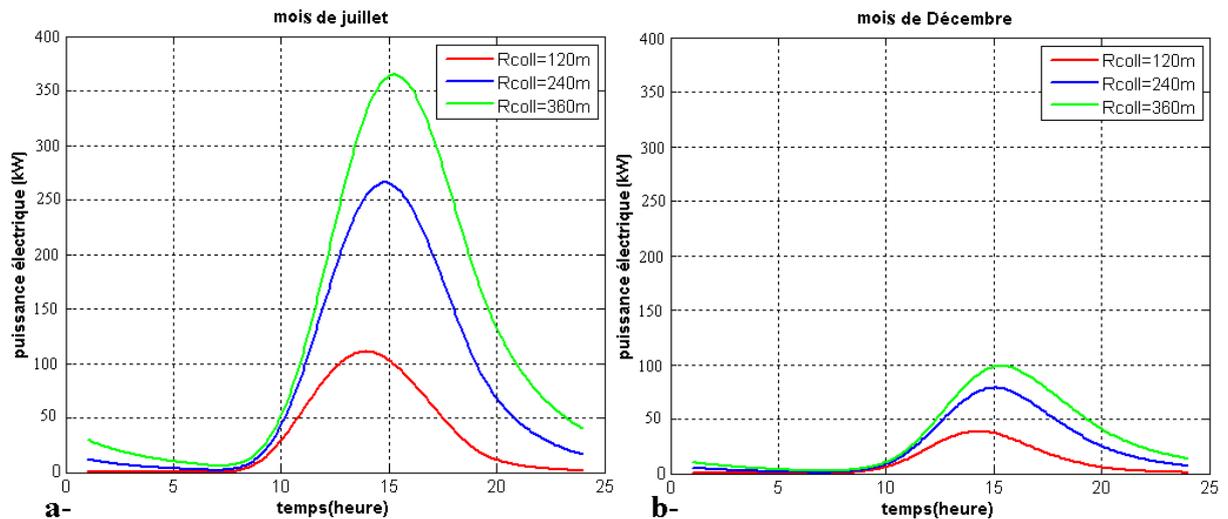


Figure V-37 Effet du rayon du collecteur sur la puissance produite (Site de Manzanares).

La figure V.38 montre que le rayon du collecteur influe directement sur la production d'électricité journalière. On peut noter le même effet pour les deux types de CCS étudiés et pour les mois de juillet et pour le mois de décembre : plus le rayon du collecteur est élevé plus la puissance électrique journalière produite augmente considérablement.

Cela revient essentiellement à l'augmentation de la quantité d'énergie solaire absorbée par le collecteur et transférée à l'air. Ainsi, la température de sortie de l'air sera plus élevée, et la différence de pression à l'intérieur de la cheminée entre l'air ambiant et celui chauffé est plus grande, ce qui conduit comme il a déjà été expliqué à une puissance électrique produite plus grande.

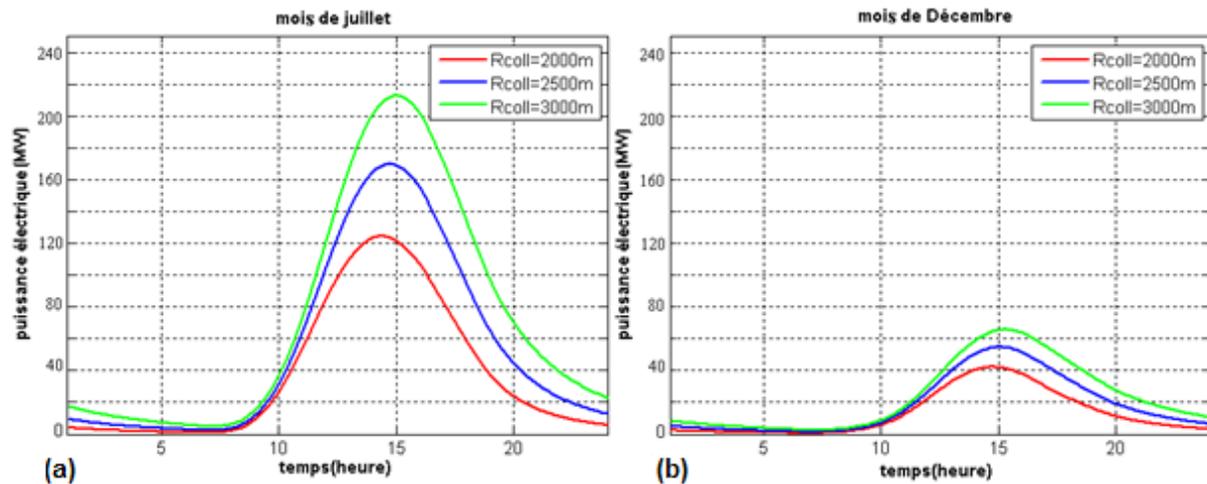


Figure V-38 Effet du rayon du collecteur sur la puissance produite (CCS de 200 MW).

De la figure V.38 on note que l'élargissement de la surface du collecteur est accompagné d'une augmentation de la puissance électrique produite. On peut ainsi déduire que le rayon du collecteur ne peut pas être optimisé en terme de surface/production d'électricité, seul l'investissement mis pour la CCS est le facteur à prendre en considération pour la décision de la valeur de ce paramètre.

V.4.2.5. Effet de la variation de la vitesse du vent :

L'étude de l'implantation d'une CCS dans un site quelconque doit prendre en considération plusieurs paramètres différents dont la vitesse du vent fait partie. Si on se trouve devant deux sites ayant presque le même taux d'ensoleillement, il est nécessaire de passer vers d'autres paramètres. La vitesse du vent qui distingue les deux sites peut être décisive. Nous allons essayer, dans ce paragraphe, de comprendre l'effet de la variation de ce paramètre sur la production d'électricité des CCS équipées d'un système de stockage thermique.

Les figures (V.39.a) et (V.39.b) représentent les résultats pour le prototype de Manzanares et les figures (V.40.a) et (V.40.b) représentent les résultats pour la centrale de 200 MW. Pour cette analyse, nous avons considéré respectivement trois vitesses différentes de vent pour chaque centrale : (3, 5 et 7 m/s) et (5, 9 et 13 m/s).

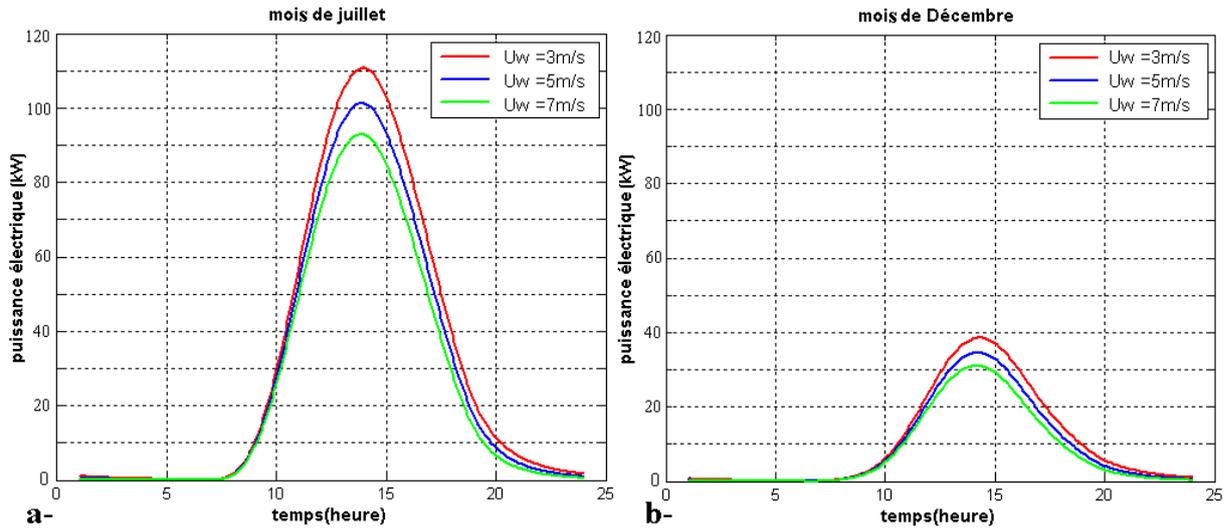


Figure V-39 Effet de la vitesse du vent sur la puissance produite (Site de Manzanares).

La figure V.40 montre que la vitesse du vent influe sur la production d'électricité journalière. Cette influence est notable au niveau du pic de rayonnement solaire. On peut noter également le même effet pour les deux types de CCS étudiés et pour les mois de juillet et pour le mois de décembre : plus la vitesse du vent est élevée plus la puissance électrique journalière produite diminue considérablement particulièrement au niveau du pic de rayonnement solaire. De cette figure on peut déduire que l'effet de la vitesse du vent est considérable sur l'énergie électrique produite, c'est la raison pour laquelle l'étude de ce facteur ne doit en aucun cas être négligée lors du choix du site d'installation de la CCS.

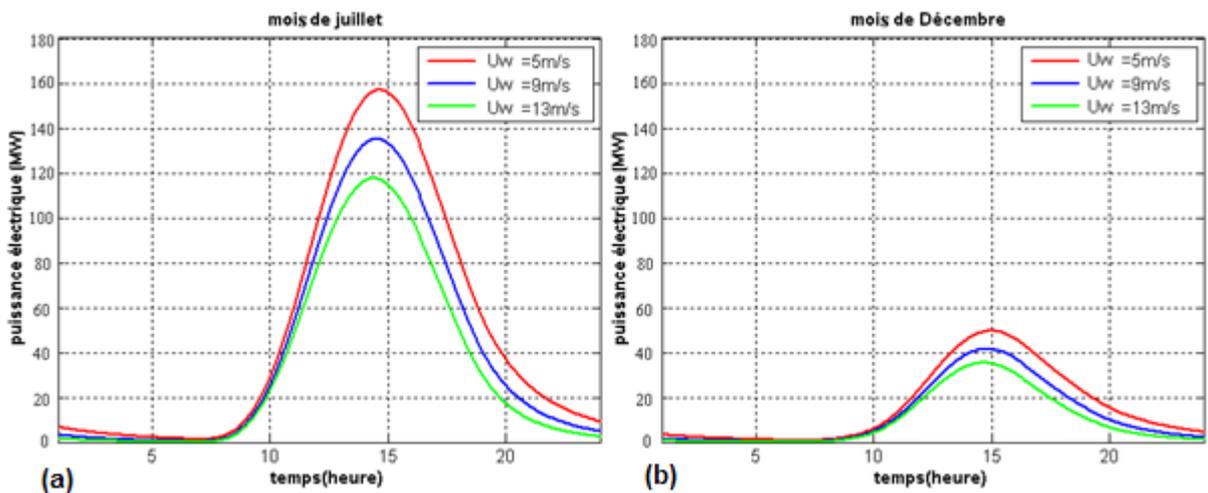


Figure V-40 Effet de la vitesse du vent sur la puissance produite (CCS de 200 MW).

Cette diminution de puissance avec l'augmentation de la vitesse du vent est due essentiellement aux pertes thermiques convectives ayant lieu entre le collecteur et le vent

l'extérieur. Plus la vitesse du vent est importante plus les pertes thermiques augmentent et moins est le transfert d'énergie solaire vers l'air à l'intérieur est efficace. Ainsi, la température de l'air à la sortie du collecteur sera moins élevée que pour les périodes non ventées. Cet effet conduit à la diminution de la différence de pression à l'intérieur de la cheminée, c'est la raison pour laquelle la puissance électrique produite est plus faible.

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire est relatif à l'analyse des performances énergétiques d'une centrale à cheminée solaire (CCS) sans et avec prise en charge du stockage thermique. Le site d'Adrar a été choisi compte tenu de l'importance de son potentiel énergétique solaire par rapport à l'ensemble des régions de l'Algérie et surtout de la banque de données relative à la température et au rayonnement solaire annuels dont on dispose,

Les premiers résultats concernant le prototype de Manzanares, ont permis de montrer qu'une centrale telle qu'a été décrite par Schlaich est fonctionnelle et permet de produire une puissance qui dépend des paramètres dimensionnels et des caractéristiques du site d'implantation (données météorologiques, type du sol, etc...).

Au-delà des dimensions du prototype d'essai de Manzanares (qui sont relativement petites), les résultats sont étendus à des centrales électriques de puissances à grandes échelles. La variation de certains paramètres dimensionnels a permis de mieux comprendre le comportement des CCS et l'influence de leurs caractéristiques géométriques telles le diamètre du collecteur, le diamètre de la tour et sa hauteur sur la puissance produite. Une optimisation du système s'impose pour trouver un compromis entre la puissance électrique produite et le coût de l'installation.

A travers l'étude des performances des centrales à cheminée solaire sans stockage thermique, il a été confirmé que l'un des points considérés comme inconvénient de l'énergie solaire est celui de l'intermittence (jour et nuit, temps clair et nuageux et même hiver/été). En effet, nous avons relevé l'influence majeure de l'irradiation solaire sur une centrale non dotée d'un système pouvant palier à ce problème.

Le stockage thermique proposé comme solution au caractère intermittent du rayonnement solaire a fait l'objet d'une analyse spécifique dans le cadre de cette étude. Les résultats obtenus ont montré que le stockage permet d'élever la puissance produite dans les périodes à faible ensoleillement. Comme pour le cas précédent, la variation de certains paramètres dimensionnels a permis d'aboutir aux mêmes résultats que ceux obtenus pour les centrales sans système de stockage. Le stockage thermique représente ainsi la solution à l'intermittence du rayonnement solaire. Il permet d'éviter le recours aux énergies non renouvelables non respectueuses de l'environnement afin de garantir une production continue.

Les résultats obtenus ont été validés sur la base de résultats expérimentaux obtenus à Manzanares et sur la base de résultats théoriques issus de la littérature. Il est à souligner que le modèle mathématique, avec stockage thermique, analysé dans le cadre de cette étude et résolu numériquement donne des résultats bien meilleurs que ceux de Bernardès [79] et Haff [80]. Le modèle de Schlaich [6] (pour les CCS sans stockage thermique) a été utilisé pour analyser les caractéristiques géométriques de certaines cheminées de différentes puissances.

L'effet de l'épaisseur du stockage sur les performances énergétiques des CCS a été montré dans cette étude. En effet, la conclusion à laquelle on a abouti est que plus la quantité de matière de stockage augmente plus la puissance devient presque constante. Bien évidemment la recherche de critère d'optimalité est un élément très important dans ces études. De plus, il a été démontré que la variation de la puissance peut même s'approcher d'une ligne horizontale avec de faibles fluctuations pour de grandes quantités de stockage.

A travers les résultats obtenus dans cette étude, on peut noter qu'une centrale à cheminée solaire dotée d'un système de stockage thermique adéquat est une des alternatives les plus intéressantes pour garantir une production d'énergie continue et à grande échelle afin de répondre au souci à la fois de l'épuisement des énergies non renouvelables et de la protection de l'environnement. Les performances énergétiques peuvent être ainsi améliorées par amélioration des systèmes de stockage soit en jouant sur la chaleur spécifique des fluides ou des solides utilisés dans le stockage soit en jouant sur le jumelage de stockage par chaleur sensible et latente ou la combinaison des deux à la fois.

Bibliographie

Références Bibliographiques

- [1] **Robert, G. E. F.**, Solar energy, renewable energy and the environment, CRC Press, New York, United States of America, 2010.
- [2] **S. Kalogirou**, Solar energy engineering - Processes and systems, Elsevier, 2009.
- [3] **C. Djassem**, « réalisation et expérimentation d'une cheminée solaire », mémoire de master., Université Kasdi Merbah Ouargla, 2014.
- [4] **Robert, G.e.E.F, Majid g. et Cota, E.**, solar energy, renewable energy and the environment, CRC Press, New York, United States of America, 2010.
- [5] **Bernardes, M., Voß A. et Weinrebe, G.**, Thermal and technical analyses of solar chimneys, Solar Energy, pp 1511-524, vol 75, 2003.
- [6] **Schlaich, J.**, The Solar Chimney, Axel Menges Editions, Stuttgart, Germany, 1995.
- [7] **Kalogirou, S.**, Solar energy engineering-processes and systems, Elsevier, 2009.
- [8] **Abdelmadjid ATTAR**, LES ENERGIES NOUVELLES OU RENOUVELABLES, Auteur : Mr. Abdelmadjid ATTAR, ancien PDG de Sonatrach et ancien Ministre des Ressources en Eau
- [9] **Article d'information, version PDF** : « l'énergie sous toutes ses formes, définitions », édition connaissancesdesenergies.org, site web, 2010.
- [10] **Souad, S.**, «Effet des parametres opérationnels sur les performances d'un capteur solaire plan,» Université de Mentouri Constantine, 2010.
- [11] **NIA, M.**, Etude comparative des méthodes d'estimation du rayonnement solaire, Mémoire Magister Faculté des sciences-département de physique, Université Ferhat Abbas sétif, 2010.
- [12] **Fariza, M.**, «Détermination du gisement solaire par traitement d'images MSG», Mémoire de Magister, faculté de génie électrique et de l'informatique, département d'électronique, université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou 2011.
- [13] **Jannot, Y.**, «Thermique Solaire,» Mars 2011.
- [14] **Yaakoub, M.**, «PFE-Détermination des performances énergétiques d'une centrale à cheminée solaire au sud Algérien,» Mémoire PFE, Ecole Nationale Polytechnique, 2014.
- [15] **Garg, H., Mullick S. et Bhargava A.**, Solar Thermal Energy Storage, Dordrecht, Holland: D. Reidel publishing company, 1985.
- [16] **Hansain, S.**, «Review on sustainable thermal energy storage technologies, part 1: heat storage materials and techniques,» Elsevier Science, Riyadh, 1997.

- [17] **Hasnain, S.**, «Energex,» chez '93 Proc. 5th Intl. Energy Conference., Seoul, Korea, 1993.
- [18] **Hasnain, S., Smiai, M., Al-Saedi, Y. et Al-Khaldi, M.**, «Energy Research Institute Internal Report,» KACST, Riyadh, Saudi Arabia, 1996.
- [19] **Telkes, M.**, Solar Energy Storage Subsystems for Heating and Cooling of Buildings, Virginia, USA, 1975.
- [20] **Heine, D. et Abhat, A.**, in Sun: Mankind's Future Source of Energy, New York: Pergamon Press, United States of America, 1978.
- [21] **Hasnain, A.**, «Ph.D Dissertation,» Dept. of Fuel and Energy, University of Leeds, UK, 1990.
- [22] **De John, A. et Hoogendoorn, C.**, «Thermal Storage of Solar Energy,» D. Reidel Publishing Company, Amsterdam, The Netherlands, 1980.
- [23] **Hale, D., Hoover, M. et O'Neill, M.** «phase change material», NASA Report, NASA-CR-61363, 1971.
- [24] **Schlaich, J. et Schiel, W.**, «Solar chimneys,» Encyclopedia of Physical Science and Technology, pp199-109, 2004.
- [25] **Schlaich, J., Bergermann, R., W. Schiel et G. Weinrebe**, «Design of commercial solar tower systems - utilization of solar induced convective flows for power generation,» chez Proceedings of the International Solar Energy Conference pp.537-581, Kohala Coast, United States, 2003.
- [26] **Haaf, W., Friedrich, K., Mayr, G. et Schlaich, J.**, «Solar chimneys, part I: principle and construction of the pilot plant in Manzanares,» J. Solar Energy, vol. 2, pp.13-20, 1983.
- [27] **Mullet, L.**, «The solar chimney overall efficiency, design and performance,» Int. J. Ambient Energy, vol. 8, pp.135-40, 1987.
- [28] **Padki, M. et Sherif, S.**, «Solar chimney for medium- to large scale power generation,» chez Proceedings of the Manila International Symposium on the Development and Management of Energy Resources, Manila, Philippines, 1989.
- [29] **Padki, M. et Sherif, S.**, «Solar chimney for power generation in rural areas,» chez seminar on Energy Conservation and Generation Through Renewable Resources, Ranchi, India, 1989.
- [30] **Pasumarthi, N. et Sherif, S.**, «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.1443-461, 1998.
- [31] **Yan, M., Sherif, S., Kridli, G., Lee, S. et Padki, M.**, «Thermo-fluid analysis of solar chimneys,» Industrial Applications of Fluid Mechanics, FED, ASME, 1991.
- [32] **Bernardes, M., Valle, R. et Cortez, M.**, «Numerical analysis of natural laminar convection in a radial solar heater,» Int. J. Therm. Sci., vol. 38, pp.142-50, 1999.

- [33] **Backstrom, T. et Gannon, A.**, «Compressible flow through tall chimneys,» chez Proceedings of Solar 2000: Solar Powers Life, Share the Energy, Wisconsin, USA, 2000.
- [34] **Dai, Y., Huang, H. et Wang, R.**, «Case study of Solar Chimney Power Plants in Northwestern Regions of China.,» *Renewable Energy*, vol. 28, pp.11295-1304, 2003.
- [35] **Ming, T., Liu, W. et Xu, G.**, «Analytical and numerical investigation of th solar chimney power plant systems.,» *Int. J. Energy Res.*, vol. 30, pp.1861-873, 2006.
- [36] **Ninic, N.**, «Available energy of the air in solar chimneys and the possibility of its ground level concentration.,» *Solar Energy*, vol. 80, pp.1804-811, 2006.
- [37] **J. Pretorius**, Optimization and control of a large-scale solar chimney power plant. Ph.D. Thesis, South Africa: University of Stellenbosch. , 2007.
- [38] **Pretorius, J. et Kröger, D.**, «Solar chimney power plant performance.,» *J. Solar Energy*, vol. 128, pp.1302-311, 2006.
- [39] **Pretorius, J., Kröger, D., Buys, J. et Von Backström, T.**, «Solar tower power plant performance characteristics,» chez Proceedings of the ISES EuroSun2004 International Sonnenforum 1, Freiburg, Germany, 2004.
- [40] **Chergui, T., Larbi, S. et Bouhdjar, A.**, «Thermo- hydrodynamic aspect analysis of flows in solar chimney power plants- A case study.,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, pp.11410-1418, 2010.
- [41] **Larbi, S., Bouhdjar, A. et Chergui, C.**, «Performance analysis of a solar chimney power plant in the southwestern region of Algeria.,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, pp.1470-477, 2010.
- [42] **Petela, R.**, «thermodynamic study of a simplified model of the solar chimney power plant,» *Solar Energy*, vol. 83, pp.194–107, 2009.
- [43] **Zhou, X., Yang, J., Xiao, B., Hou, G. et Xing, F.**, «Analysis of chimney height for solar chimney power plant,» *Appl Therm Eng.*, vol. 29, pp.1178- 185, 2009.
- [44] **Koonsrisuk, A., Lorente, S. et Bejan, A.**, «Constructale solar chimney configuration,» *Int. J. Heat and Mass Transfer*, vol. 53, pp.1327–333, 2010.
- [45] **Chiemeka, O.**, «A parametric study on the feasibility of solar chimney power plants in North Cyprus conditions,» 2014.
- [46] **Kröger, D. et Buys, J.**, «radial flow boundary layer development analysis,» south african institution of mechanical engineering, *R&D Journal*, pp.195-102, p. 15, 1999.
- [47] **Kirstein, C. et Backström, T.**, «flow through a solar chimney power plant collector-to-chimney transition section,» *Journal of solar energy engineering*, pp.1312-317, 2006.

- [48] **Pastohr, H., Kornaltd, O. et Gürlebeck, K.**, «Numerical and analytical calculations of the temperature and flow field in the upwind power plant.», *Int. J. Energy Res.*, vol. 28, pp.1495-510, 2004.
- [49] **Sandeep, K. et Pastohr, H.**, «Computational studies on the effect of geometric parameters on the performance of a solar chimney power plant», *16:5567–83*, 2013.
- [50] **Shérif. S.A. et Pasumarthi, N.**, «Experimental and theoretical performance of a demonstration solar chimney,» *international journal of energy research*, pp.1443-461, 1998.
- [51] **Zhou, X., Yang, J., Xiao, B. et Hou, G.**, «Simulation of a pilot solar chimney thermal power generating equipment,» *Renewable Energy*, pp. 11637-1644, 2007.
- [52] **Bonnelle, D.**, «Solar chimney, water spraying energy tower, and linked renewable energy conversion devices: presentation, criticism and linked renewable energy conversion devices: presentation, criticism and proposals.», *University Claude Bernard, Lion.*, 2004.
- [53] **Hedderwick, R.**, «Performance evaluation of a solar chimney power plant,» *Stellenbosch, South Africa., Department of Mechanical Engineering, University of Stellenbosch*, 2001.
- [54] **Pretorius, J.**, «Solar tower power plant performance characteristics.», *Stellenbosch, South Africa., Department of Mechanical Engineering, University of Stellenbosch*, 2004.
- [55] **Hammadi, S.**, «Solar updraft tower power plant with thermal storage.», *Basrah Journal for Engineering Research*. 98:49–57., 2008.
- [56] **Miqdam, T. et Hussein, A.**, «Basement kind effects on air temperature of a solar chimney in Baghdad–Iraq weather.», *International Journal of Applied Sciences*, pp.112-20, 2011.
- [57] **Zheng, Y., Ming, T., Zhou, Z., Yu, X., Wang, H., Pan, Y. et Liu, W.**, «Unsteady numerical simulation of solar chimney power plant system with energy storage layer.», *Journal of the Energy Institute*, pp.186-92, 2010.
- [58] **T. Ming, F. Meng, W. Liu, Y. Pan and R. Kiesgen de Richter**, Analysis of output power smoothing method of the solar chimney power generating system, *International Journal of Energy Research*, vol 37, pp1657-1668, 2012.
- [59] **Zhou, Y., Liu, X. et Lid, Q.**, «Unsteady conjugate numerical simulation of the solar chimney power plant system with vertical heat collector,» *Materials Science Forum*, pp. 1704-705, 535-540, 2011.
- [60] **Xu, G., Ming, T., Pan, Y., Meng, F. et Zhou, C.**, «Numerical analysis on the performance of solar chimney power plant system,» *Energy Conversion and Managemen*, pp. 1876-883, 2010.
- [61] **Bernardes, M.**, «Ökonomische und Ökologische Analyse von Aufwindkraftwerken,» *IER, Universit`at Stuttgart, Stuttgart, Germany.*, 2004.
- [62] **Pretorius, J. et Kröger, D.**, «Critical evaluation of solar chimney power plant performance,» *Sol Energy*, pp.1235-41, 2004.

- [63] **Sangi, R., Amidpour, M. et Hosseinizadeh, B.** , «Modeling and numerical simulation of solar chimney power plants.» *Sol Energy*, pp. 1829-38, 2011.
- [64] **Kreetz, H.**, «Theoretische Untersuchungen und Auslegung eines temporären Wasserspeichers für das Aufwindkraftwerk.» chez *Energie und Verfahrenstechnik der TU Berlin*, Berlin:, 1997.
- [65] **Kulunk, H.**, «A prototype solar convection chimney operated under Izmit conditions.» chez 1985, Miami, USA, *Proceedings of the 7th Miami international conference on alternative energy sources*.
- [66] **Haaf, W.**, «Solar chimneys, part II: preliminary test results from the Manzanares Pilot plant,» *Int. J. Solar Energy*, vol. 2, pp. 1141-161, 1984.
- [67] **Krisst, R.**, «Energy transfer system.» *Alternat. Sources Energy*, vol. 63, pp. 18-11, 1983.
- [68] **Kulunk H.**, A prototype solar convection chimney operated under Izmit conditions, *Proceedings of seventh MICAES*, 162, 1985.
- [69] **Pasumarthi, N. et Sherif, S.**, «Performance of a demonstration solar chimney model for power generation.» chez *Proceedings of the 35th Heat Transfer and Fluid Mechanics*, Sacramento, USA, Juin 1997.
- [70] **Zhou, X., Yang, J., Xiao, B. et Hou, G.**, «Experimental study of the temperature field in a solar chimney power setup.» *Appl Therm Eng.*, vol. 27, pp. 12044-2050, 2007.
- [71] **Ketlogetswe, C., Fiszdon, J. et Seabe, O.**, «Solar chimney power generation project—the case for Botswana,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 12, pp.12005- 2012, 2008.
- [72] **Ferreira, A., Maia, C., Cortez, M. et Valle, R.**, «Technical feasibility assessment of a solar chimney for food drying,» *Solar Energy*, vol. 82, pp.1198-205, 2008.
- [73] **Lid, W., Wei, P. et Zhou, X.**, «A cost-benefit analysis of power generation from commercial reinforced concrete solar chimney power plant,», *International Journal of Scientific and Research Publications*, Vol 5, 2013.
- [74] **SivaReddy, V., Kaushik, S., Ranjan, K. et Tyagi, S.**, «State-of-the-artofsolarthermalpowerplants—A review,» *RenewableandSustainableEnergyReviews*, vol. 27, pp.1258-273, 2013.
- [75] **Xinping, Z., Jiakuan, Y., Fen, W. et Bo, X. b.**, «Economic analysis of power generation from floating solar chimney power plant,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, pp. 1736-749, 2009.
- [76] **Papageorgiou, C.**, «Optimum design for solar power stations with floating solar chimneys,» chez *Proceedings of the 32nd National Heat Transfer Conference* pp.763-72, 2004.
- [77] **Zhou X. et Yang J.**, «A novel solar thermal power plant with floating chimney stiffened onto a mountain-side and potential of the power generation in China's deserts,» *Heat Transfer Eng.* in press, Vol 30, Issue 5, 400-407, 2009.

- [78] **Bergman, L. T., Lavine, S. A., Incropera, P. F. et Dewitt, D. D.**, Fundamentals on heat and mass transfer, United States: John Wiley and Sons, 2012.
- [79] **Bernardes, M. et Zhou, X.**, «On the heat storage in Solar Updraft Tower collectors – Water bags,» Science direct-ELSVIER, vol. 91, pp. 22-31, 2013.
- [80] **Hurtado, F., Kaiser, A. et Zamora, B.**, «Evaluation of the influence of soil thermal inertia on the performance of a solar chimney power plant,» ELSEVIER-energy, vol. 47, pp. 213-224, 2012.