

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE 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

Mémoire de projet de fin d'études

pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie Mécanique

**Détermination des Performances Energétiques
d'une Centrale à Cheminée Solaire
avec Stockage Thermique.**

Etude Comparative entre Modèles Mathématiques

Mohamed Nassim KHIAT

Sous la direction de M. Salah LARBI Professeur

Présenté et soutenu publiquement le 22 Juin 2016

Composition du Jury :

Président	Bouزيد BENKOUSSAS	Maître de Conférences- A	ENP Alger
Promoteur	Salah LARBI	Professeur	ENP Alger
Examineur	Mohamed Boubakeur	Maître Assistant- A	ENP Alger

ENP 2016

المخلص

يتمثل هذا العمل في تحليل أداء محطة توليد الطاقة الكهربائية ذات برج شمسي سواء كانت مزودة أو لا بنظام التخزين الحراري. و قد استخدمنا النماذج الرياضية لشلاك و حمادي للتنبؤ أداء محطة توليد الطاقة الكهربائية ذات برج شمسي. تم التحقق من صحة هذه النماذج عن طريق مقارنة نتائجها النظرية بنتائج مأخوذة من المراجع المتوفر. النتائج المتحصل عليها سمحت لنا بفهم تأثير المعطيات الجوية، الأبعاد الهندسية وجود او عدم وجود نظام تخزين الحراري على الفعالية الطاقوية لمحطات توليد الطاقة الكهربائية.

كلمات مفتاحية: محطة توليد الطاقة الكهربائية ذات برج شمسي، تحليل الأداء الطاقوي، التخزين الحراري.

Abstract:

The aim of this study is related to energy performances analysis of solar updraft tower power plants with and without thermal storage system. Different mathematical models were analyzed and compared with experimental results from the literature revue. Adrar site was chosen according to its solar potential compared to other regions of the country (Algeria) and especially the availability of meteorological data on temperature and solar radiation. Obtained results were validated on the basis of experimental data of the prototype of Manzanares (Spain) and on the basis of theoretical results from the mathematical models used. The effect of the storage system's thickness parameter has been highlighted. In addition, the variation of some dimensional parameters related to the solar updraft tower power plant (collector diameter, height and diameter of the chimney tower) allowed to the better understanding of their influence and importance on the electric power produced by this device.

Keywords: Solar updraft tower power plant; Performances analysis; Thermal storage; Mathematical models comparison.

Résumé :

Le travail présenté dans ce mémoire est relatif à une analyse des performances énergétiques des centrales à cheminées solaires avec et sans système de stockage thermique. Différents modèles mathématiques ont été analysés et comparés aux résultats expérimentaux issus de la littérature. Le site d'Adrar a été choisi compte tenu de l'importance de son gisement solaire par rapport aux autres régions du pays (Algérie) et surtout de la disponibilité d'une banque de données météorologiques relative à la température et au rayonnement solaire. Les résultats obtenus ont été validés sur la base de résultats expérimentaux obtenus sur le prototype de Manzanares (Espagne) et sur la base de résultats théoriques issus de la littérature. L'effet de l'épaisseur du système de stockage a bien été montré et la variation de certains paramètres dimensionnels a permis de mieux comprendre le comportement des centrales à cheminée solaire ainsi que l'influence de leurs caractéristiques géométriques telles, le diamètre du collecteur, le diamètre de la tour et sa hauteur, sur la puissance électrique produite.

Mots clés : Centrale à cheminée solaire ; Analyse des performances énergétiques ; Stockage thermique ; Comparaison entre modèles mathématiques.

Remerciements

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

Un grand merci à mon Promoteur, 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 Boubakeur, Maître assistant- A, Examineur. Tous deux enseignants à l'Ecole Nationale Polytechnique.

Enfin, je ne pourrai 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 ma profonde gratitude.

Table des Matières

Liste des tableaux

Liste des figures

Nomenclature

Introduction Générale.....	10
Chapitre I : Energie solaire et stockage thermique	14
I.1 Introduction :.....	14
I.2 Energie solaire :.....	14
I.2.1. Importance de l'énergie solaire :.....	15
I.2.2 Exploitation de l'énergie solaire :	15
I.3 Potentiel solaire Algérien:	18
I.4 Mesure du rayonnement solaire :	18
I.5 Rayonnement solaire :	20
I.6 Perspectives de l'Algérie en matière d'énergie solaire :.....	21
I.7 Stockage d'énergie :	22
I.7.1 Importance du stockage d'énergie :.....	23
I.7.2 Stockage thermique :.....	23
Chapitre II : Généralités sur les cheminées Solaires.....	31
II.1 Historique :.....	31
II.2 Centrale à cheminée solaire :.....	31
II.2.1 Principe de fonctionnement d'une CCS :	32
II.2.3 Composantes de la centrale à cheminée solaire :	32
II.2.4. Avantages et Inconvénients d'une tour solaire :	36
II.3 Stockage dans les CCS :	36
II.4 Projets :.....	39
II.4.1 Prototype de Manzanares :	39
II.4.2 Projets actuels de cheminées solaires :.....	41
II.5 Autre types de cheminées solaires :	44
II-4 Centrales à cheminée solaire, le choix énergétique par excellence pour l'Algérie :	45
Chapitre III : Etat de l'art sur les centrales à cheminée solaire	48
III.1 Introduction :	48
III.2 Etudes théoriques sur les CCS :	48
III.3 Etudes relatives au stockage thermique :	53
III.4 Etudes expérimentales sur les centrales à cheminée solaire :	55

III.4 Etudes économiques :	57
Chapitre IV : Modélisation Mathématique des Transferts Thermiques dans les Centrales à Cheminée Solaire avec et sans Stockage Thermique	60
IV.1 Introduction :	60
IV.2. Modèle mathématique de Schlaich [6] relatif aux centrales à cheminée solaire sans stockage thermique :	60
IV.2.1. Rendement d'une CCS :	61
IV.3. Equations de bilans énergétiques relatives aux centrales cheminées solaires avec stockage thermique : (Modèle de Hammadi [55]) :	66
IV.3.1 Développement du modèle mathématique :	69
IV.4. Modèle mathématique relatives aux centrales cheminées solaires avec stockage thermique (Modèle de Bernardes [8]) :	72
IV.4.1. Le collecteur :	72
IV.4.2. La cheminée :	78
IV.4.3 La turbine et le générateur :	79
IV.4.4 Développement du modèle mathématique :	80
Chapitre V : Résultats et discussions.....	82
V-1 Introduction :	82
V-2 Données météorologiques du site, objet de l'étude :	82
V -3 analyse des performances énergétique des CCS sans stockage thermique :	84
V-3.1 Application du prototype de Manzanares sur le site d'Adrar :	84
V-4 Analyse des performances des énergétiques des CCS avec stockage thermique :	89
V-4.1 Validation des modèles mathématique :	89
V-4.1.1 Validation par la température de sortie de l'air :	89
V-4.1.2 Validation par la puissance de sortie :	90
V-4.1.3 Comparaison de nos résultats avec les résultats théoriques de Bernardes .	91
V-4.2 Effet de la variation des paramètres géométriques et techniques sur la puissance de sortie de la CCS :	91
V-5 Etude d'une CCS à grande échelle :	97
Conclusion Générale	99
Références Bibliographiques	102

Liste des tableaux :

<i>Tableau I-1: Tableau comparatif des potentialités mondiales de quelques énergies renouvelables</i>	6
<i>Tableau V-1 comporte la distribution annuelle de la production d'électricité selon le modèle de Schlaich [6]</i>	71
<i>Tableau V-2 Dimensions d'une cheminée de 200 MW</i>	81

Liste des figures

<i>Figure I-1 : Répartition des ressources d'énergie solaire dans le monde.</i>	14
<i>Figure I-2 : Photo d'un Pyranomètre.</i>	19
<i>Figure I-3 : Photo de l'Héliographe de Campbell.</i>	19
<i>Figure I-4: Composantes du rayonnement solaire atmosphérique.</i>	21
<i>Figure II-1 : Principe de fonctionnement d'une centrale à cheminée solaire.</i>	32
<i>Figure II 2 : Verrière du collecteur d'une cheminée solaire.</i>	33
<i>Figure II-3 : Collecteur d'une cheminée solaire.</i>	33
<i>Figure II-4 : Photo montrant une tour cheminée.</i>	34
<i>Figure II-6 : Cheminée haubanée.</i>	34
<i>Figure II-5 : Cheminée autoportante.</i>	34
<i>Figure II-7 : Turbine pour Cheminée Solaire de large diamètre.</i>	35
<i>Figure II.8 : Turbines verticales</i>	35
<i>Figure II.9 : Petites turbines horizontales</i>	35
<i>Figure II-10. Principe du stockage thermique avec le lit de galet.</i>	37
<i>Figure II-11. Principe du stockage thermique en utilisant l'eau comme de stockage.</i>	38
<i>Figure II.12 : Photo de la cheminée solaire de Manzanares.</i>	40
<i>Figure II.13: Structure de la cheminée solaire de Manzanares.</i>	40
<i>Figure II-14 : Cheminée solaire Australienne.</i>	41
<i>Figure II-15 montre une vue de la cheminée solaire de Ciudad Real (Espagne).</i>	43
<i>Figure II-16 : Cheminée solaire Namibienne.</i>	43
<i>Figure II-17 : Taille comparée de divers projets de Cheminées solaires.</i>	44
<i>Figure II-18 : Cheminée solaire « flottante »</i>	45
<i>Figure V- 1 Données météorologiques du site d'Adrar pour le mois de Janvier</i>	82
<i>Figure V- 2 Données météorologique du site d'Adrar pour le mois de Février</i>	82
<i>Figure V- 3 Données météorologiques du site d'Adrar pour le mois de Mars</i>	83
<i>Figure V- 4 Données météorologiques du site d'Adrar pour le mois de Avril</i>	83
<i>Figure V- 6 Données météorologiques du site d'Adrar pour le mois de Mai</i>	83
<i>Figure V- 5 Données météorologiques du site d'Adrar pour le mois de Juin</i>	83
<i>Figure V- 7 Données météorologiques du site d'Adrar pour le mois de Juillet</i>	83
<i>Figure V- 8 Données météorologique du site d'Adrar pour le mois d'Aout</i>	83
<i>Figure V- 9 Données météorologique du site d'Adrar pour le mois de Septembr</i>	84
<i>Figure V- 10 Données météorologiques du site d'Adrar pour le mois de Octobre</i>	84
<i>Figure V- 11 Données météorologiques du site d'Adrar pour le mois de Novembre</i>	84
<i>Figure V- 12 Données météorologiques du site d'Adrar pour le mois de Décembre</i>	84
<i>Figure V- 13 Variation de la puissance électrique en fonction du temps pour le mois de Janvier</i> 85	
<i>Figure V- 14 Variation de la puissance électrique en fonction du temps pour le mois de Février</i> 85	
<i>Figure V- 15 Variation de la puissance électrique en fonction du temps pour le mois de Mars</i> ...86	
<i>Figure V- 16 Variation de la puissance électrique en fonction du temps pour le mois d'Avril</i>86	
<i>Figure V- 17 Variation de la puissance électrique en fonction du temps pour le mois de Mai</i>86	
<i>Figure V- 18 Variation de la puissance électrique en fonction du temps pour le mois de Juin</i>86	
<i>Figure V- 19 Variation de la puissance électrique en fonction du temps pour le mois de Juillet</i> .86	
<i>Figure V- 20 Variation de la puissance électrique en fonction du temps pour le mois d'Aout</i>	86
<i>Figure V- 21 Variation de la puissance électrique en fonction du temps pour le mois de Septembre</i>	87

<i>Figure V- 22 Variation de la puissance électrique en fonction du temps pour le mois d'Octobre</i>	87
<i>Figure V- 23 Variation de la puissance électrique en fonction du temps pour le mois de Novembre</i>	87
<i>Figure V- 24 Variation de la puissance électrique en fonction du temps pour le mois décembre.</i>	87
<i>Figure V- 25 Variation de l'irradiation solaire et de la température ambiante au cours du temps. Moyennes mensuelles du site d'Adrar</i>	87
<i>Figure V- 26 Variation mensuelle de la puissance électrique pour une année dans la région d'Adrar</i>	88
<i>Figure V- 27 Données météorologiques du site de Manzanares du 02/09/1982</i>	89
<i>Figure V- 28 Température de l'air à la sortie du collecteur en fonction du temps</i>	89
<i>Figure V- 29 Rayonnement solaire horizontale du site de Manzanares du 08/06/1987</i>	90
<i>Figure V- 30 Puissance électrique produite pour la journée du 08/06/1987 à Manzanares</i>	90
<i>Figure V- 31 Données météorologiques du site de Manzanares du 06/08/1987</i>	91
<i>Figure V- 32 Comparaison entre de nos résultats, avec les résultats expérimentaux de Manzanares, et ceux de Bernardes[8]</i>	91
<i>Figure V- 33 Données météorologique de la région d'Adrar pour le mois de juillet et de décembre</i>	92
<i>Figure V- 34 Puissance électrique produite pour différentes épaisseurs de stockage pour le mois de Décembre</i>	92
<i>Figure V- 35 Puissance électrique produite pour différentes épaisseurs de stockage pour le mois de Juillet</i>	92
<i>Figure V- 36 Puissance électrique produite pour différents diamètres de la cheminées pour le mois de Décembre</i>	93
<i>Figure V- 37 Puissance électrique produite pour différents diamètres de la cheminées pour le mois de Juillet</i>	93
<i>Figure V- 38 Puissance électrique produite pour différentes Hauteurs de la cheminées pour le mois de Décembre</i>	94
<i>Figure V- 39 Puissance électrique produite pour différentes Hauteurs de la cheminées pour le mois de Juillet</i>	94
<i>Figure V- 40 Puissance électrique produite pour différents Diamètre du collecteur pour le mois de Décembre</i>	95
<i>Figure V- 41 Puissance électrique produite pour différents Diamètre du collecteur pour le mois de Juillet</i>	95
<i>Figure V- 42 Puissance électrique produite pour des vitesses de vent différentes pour le mois de décembre.</i>	96
<i>Figure V- 43 Puissance électrique produite pour des vitesses de vent différentes pour le mois de décembre.</i>	96
<i>Figure V- 44 Variation de la puissance électrique en fonction du temps pendant une journée du mois de juillet pour une centrale de 200MW.</i>	97

Nomenclature

A	Surface	m^2
b	Coefficient de pénétration thermique	$W/s^{\frac{1}{2}}.K.m^2$
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 pesanteur	m/s^2
h	Coefficient de transfert thermique	$W/m^2.K$
H	Hauteur	m
K	Conductivité thermique	$W/m.K$
\dot{m} ,	Débit massique de l'air	kg/s
M	Masse	kg
η	Rendement	
P	Puissance	W
Δp	Différence de pression	Pa
Pr	Nombre de Prandtl	
Q	Flux de chaleur	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
h_r	Coefficient d'échange radiatif	$W/m^2.K$
U	Coefficient d'échange global	$W/m^2.K$
kr	Hauteur de rugosité	m
Nu	Nombre de Nusselt	
Pr	Nombre de Prandtl	
Ra	Nombre de Rayleigh	
Rl	Constante spécifique de l'air = 287	J/kg.K
S	Rayonnement solaire absorbé	W/m^2
x	Factor de chute de Pression	

Introduction générale

L'énergie est indispensable pour nos activités économiques et dans les multiples aspects de notre vie quotidienne. Cette énergie est principalement utilisée majoritairement dans trois secteurs principaux : l'habitat, le transport et l'industrie. Dans chacun de ces secteurs, l'énergie est consommée essentiellement sous forme thermique (chaleur ou froid) ou électrique. Le développement économique, aussi bien dans les pays industrialisés que dans les pays en voie de développement (à une moindre mesure) est directement lié à l'énergie. Ainsi, la demande énergétique mondiale ne cesse de s'accroître entraînant avec elle des risques environnementaux non négligeables liés à l'utilisation irrationnelle des énergies fossiles (pétrole, gaz, charbon). Notons que ces dernières formes d'énergies connaissent depuis plusieurs années un épuisement inévitable de leurs ressources [1].

En 1992 lors de la conférence de Rio, en 1997, lors du Protocole de Kyoto et récemment lors de la COP 21, la plupart des états ont pris des engagements pour lutter contre les émissions de gaz à effet de serre afin de contribuer à la préservation de l'environnement et de l'équilibre climatique.

Face à ce constat, il devient plus que nécessaire de recherches d'autres ressources énergétiques ou des énergies alternatives, dans un monde qui, depuis plusieurs années repose sur quasiment les mêmes formes énergétiques, l'énergie solaire de son côté brille par son absence [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 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 : les technologies très avancées sont maîtrisés par un nombre limité de sociétés, et les technologies très chères nécessitant une main d'œuvre bien formée etc...

Si l'on s'intéresse aux modes de conversion d'énergie d'origine solaire, on distingue deux classes importantes : la thermique et le photovoltaïque. Dans le domaine de la thermique solaire, on cite les applications relevant du domaine des basses températures (capteurs plans, cheminées solaires, etc..) et le domaine des hautes températures (centrales thermodynamique à base de tour et de concentration par miroirs concaves etc...) [5]. Les

centrales à cheminée solaire (CCS) font partie du domaine des basses températures dont le principe de fonctionnement est très simple : l'air est chauffé par effet de serre sous un collecteur ; compte tenu que l'air chaud est plus léger que l'air froid, une différence de pression se crée entre l'entrer et la sortie de la cheminée entraînant ainsi le fluide en mouvement. En plaçant des turbines à l'entrée de la cheminée, l'air en mouvement entraîne la rotation de ces turbines raccordées à un générateur d'électricité

Le sud Algérien est l'une des régions les mieux adaptées pour abriter des centrales à cheminée solaire grâce notamment à son fort taux d'ensoleillement tout au long de l'année, et à l'espace étendue du désert.

Il est à souligner que le premier 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 de l'énergie solaire constitue un obstacle majeur qui freine le développement de l'exploitation de cette ressource d'énergie.

Parmi les multiples solutions à prévoir, on a choisi le stockage thermique, qui semble selon la littérature [8] la solution la mieux adapté et celle qui a le plus de chance d'être couronné de succès compte tenu du problème de l'intermittence du rayonnement solaire. Nous nous sommes intéressé, dans le cadre de ce projet, 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 bien analyser l'effet du stockage sur les performances énergétiques des centrales à cheminée solaire, on a 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 consiste en une recherche 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], le modèle de Hammadi [7] et le modèles de Bernardes [8].

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 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 thermique

Energie solaire et stockage thermique

I.1. Introduction :

La hausse brutale du prix du pétrole brute en 1974 avait lancé une course aux énergies alternatives dans les pays industrialisés. Dans cette effervescence, plusieurs plateformes d'expérimentation des technologies du solaire ont vu le jour aux USA (Albuquerque, NM et Bastrow) en Espagne (tour solaire de Manzanares) et en France (Themis, Targassonne) où ils ont posé les bases de développement de la production d'électricité par énergie solaire. Le retour du pétrole bon marché en 1986 et sa relative stabilité dans les années 90 ont eu pour conséquence des politiques énergétiques moins favorables au solaire qui tomba dans l'oubli. Depuis le début des années 2000, la prise de conscience générale de la problématique environnementale et climatique, concrétisée par les accords de Kyoto en 1997 ainsi que le flou sur l'étendue des réserves d'énergie fossiles, ont relancé les efforts pour élargir la diversité énergétique avec un regain d'intérêt notable pour l'énergie solaire [9].

I.2. Energie solaire :

Le soleil est une forme omniprésente de l'énergie, presque toutes les formes d'énergie renouvelable présentes sur terre sont des dérivées de l'activité solaire. Le soleil fournit un flux continu d'énergie qui nous réchauffe, provoque la poussée des cultures par photosynthèse, chauffe la terre et la mer et provoque la pluie et le vent. Cette énergie provient des réactions thermonucléaires de fusion de l'hydrogène en hélium. La température du soleil est estimée à 5800K. La distance moyenne entre la terre et le soleil est voisine de 150 millions de Km. Le rayonnement solaire met environ 8 minutes pour nous parvenir. La figure 1.1 montre la répartition des ressources d'énergie solaire dans le monde.

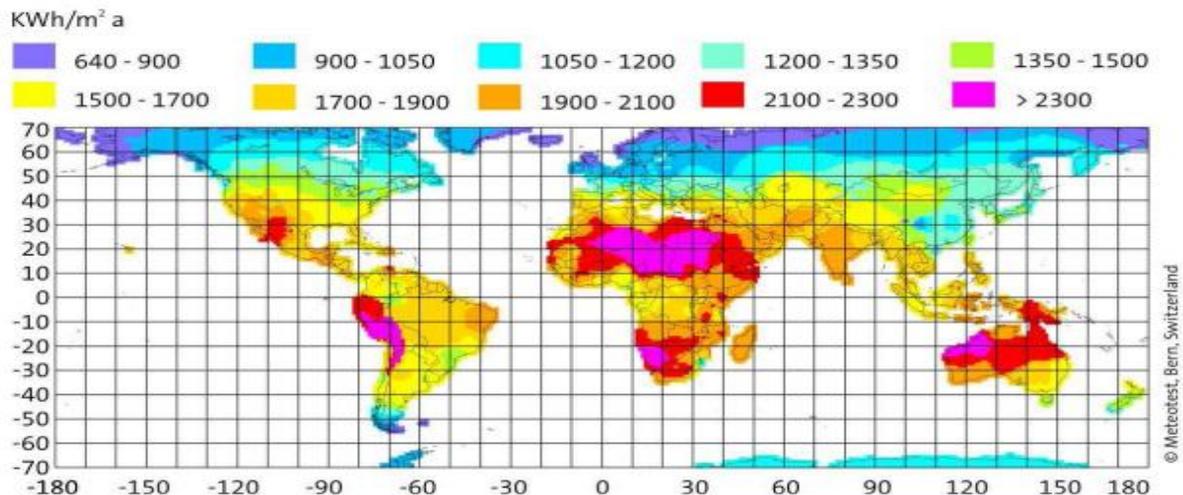


Figure I-1 : Répartition des ressources d'énergie solaire dans le monde.

La beauté de cette énergie est caractérisée par sa gratuité, son abondance et son respect envers l'environnement. Face au défi énergétique auquel l'humanité est confronté, l'énergie solaire est l'alternative par excellence, de nombreux concept de production d'électricité par énergie solaire ont été mis au point.

I.2.1. Importance de l'énergie solaire :

A chaque nouvelle source d'énergie que l'on suppose exploitable apparaît une technologie nouvelle. Le solaire est une source qui suscite beaucoup d'intérêt aujourd'hui par son grand potentiel non exploité. Le Tableau I-1 donne la comparaison des potentialités théoriques brutes des énergies renouvelables dans le monde [1].

Tableau I-1: Tableau comparatif des potentialités mondiales de quelques énergies renouvelables.

	Potentialité mondiale	Par ressource solaire
Hydraulique	5 Gtep	0.0001
Biomasse	100 Gtep	0.001
Eolien	1500 Gtep	0.02
solaire	75000 Gtep	

I.2.2. 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 d'énergie. L'énergie solaire est issue de réactions de fusion nucléaire qui animent le Soleil [10].

Il s'agit d'une énergie renouvelable par excellence surtout pour les pays qui bénéficient d'un ensoleillement presque continu comme l'Algérie. Son 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 pour l'environnement par rapport aux 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 exploiter 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 les énormes progrès en matière de rendement des panneaux solaires, de stockage et de conversion [10].

I.2.2.1. Conversion de l'énergie solaire 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 piégées, par le verre, c'est ce que l'on nomme : effet de serre. Ce concept est utilisé depuis longtemps pour les cultures florales ou maraîchères, 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 [10].

▪ Les capteurs solaires :

Toute surface sombre exposée au soleil absorbe l'énergie solaire et s'échauffe. Les capteurs solaires sont basés sur ce principe : une surface en face du soleil transfère une partie de l'énergie absorbée au fluide en contact avec la surface ; on peut ajouter une ou deux plaques de verre pour améliorer l'efficacité du système. 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. 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 ainsi 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 [10].

▪ 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. La collecte d'énergie se fait par les murs, des panneaux solaires, et éventuellement par une serre où 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 [10].

I.2.2.2. Conversion 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. Le meilleur exemple en est le four solaire d'Odeillo, créé en 1968 en Cerdagne, et successeur de celui de Lavoisier, après les fours de Meudon (1946) et de Montlouis (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 9500 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 1500 à 3800 °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 produite 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 continuent à être 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 correspondant à une forte utilisation des climatiseurs, et sont relayées par des centrales thermiques au gaz [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. Les 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.

Avec un prix de revient de l'ordre de 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. Il reste qu'en France, un module photovoltaïque bien orienté (exposition Sud, inclinaison d'environ 30° , sans ombre portée au module) de 1 m^2 fournit une puissance d'environ 100 Wc (watt crête). Une installation de 20 m^2 (2 kWc), qui produira environ $2\,000 \text{ kWh}$ par an, revient en moyenne à $15\,000 \text{ €}$ TTC pose comprise. Les recettes annuelles dues à la vente de 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 $3,3 \text{ MW}$ [3].

I.3. Potentiel solaire Algérien:

L'Algérie dispose d'un gisement solaire important compte tenu de la durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national, dépassant les 2000 heures annuellement et pouvant atteindre même les 3900 heures sur les hauts plateaux et le Sahara.

La quantité d'énergie reçue au sol quotidiennement est de 5 kWh/m^2 soit près de 700 kWh/m^2 au nord et de 2263 kWh/m^2 au sud. Ce qui favorise l'utilisation de l'énergie solaire dans différents domaines tel que la production d'énergie électrique. La connaissance du gisement est d'un intérêt majeur pour concevoir et dimensionner les systèmes énergétiques solaires. Ainsi un bon dimensionnement n'est possible que si les mesures sont disponibles d'une manière continue dans l'espace et dans le temps. A cet effet, il faut disposer d'un système de mesure continue du rayonnement solaire arrivant au sol et issue des différentes stations météorologiques [11].

I.4. Mesure du rayonnement solaire:

La mesure du rayonnement solaire se fait dans les stations météorologiques sur le plan horizontal à l'aide d'instruments de mesures dont les plus utilisés sont : le pyranomètre, le pyrhéliomètre 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 [12].

- **Le pyréliomètre :**

Les pyréliomètres mesurent le rayonnement direct. Ils comportent une ouverture réduite et une surface réceptrice qui doit être maintenue normale au rayonnement par un système de poursuite automatique. La surface sensible est un disque d'argent noirci placé à la base d'un tube muni d'un obturateur et d'un diaphragme limitant l'angle d'ouverture à 5.7° (le diamètre apparent du soleil est de 0.5°). Le tube est fixé sur une monture équatoriale. On mesure la température du disque d'argent à intervalles réguliers en ouvrant et en occultant alternativement l'entrée de l'appareil [12]. La figure I.3 montre une photo d'un Pyréliomètre.



Figure I-2 Photo d'un Pyranomètre.

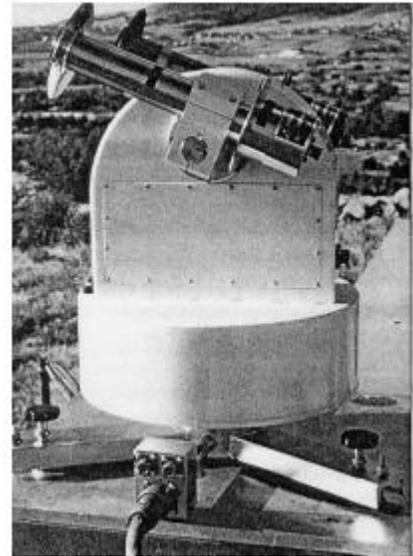


Figure I-3 Photo d'un Pyréliomètre.

- **L'héliographe :**

L'héliographe mesure les périodes de la journée pendant lesquelles l'intensité du rayonnement direct dépasse un certain seuil. Tant que l'on peut observer des ombres sur le sol ($E > 120 \text{ W/m}^2$), les météorologistes parlent de radiation directe à laquelle est sensible l'héliographe. La somme de ces périodes représente la durée d'insolation journalière permettant de définir la fraction d'insolation. Dans l'héliographe de Campbell-Stokes, une sphère de verre concentre le rayonnement direct en un point qui brûle un papier spécial. En se déplaçant le point brûlé décrit le mouvement apparent du soleil en traçant une courbe dont la longueur est proportionnel à la durée d'insolation. L'héliographe de Jordan utilise du papier photographique. On utilise maintenant des héliographes automatiques constitués de cellules photovoltaïques disposées sur une bande cylindrique dont l'axe est perpendiculaire au plan de la trajectoire apparente du soleil. Un dispositif électronique totalise les intervalles de temps d'ensoleillement. Néanmoins, il faut veiller à ce que chaque héliographe ait le même seuil, c'est à dire l'éclairement direct minimal enregistré [12]. La figure I.4 montre une photo d'un héliographe.

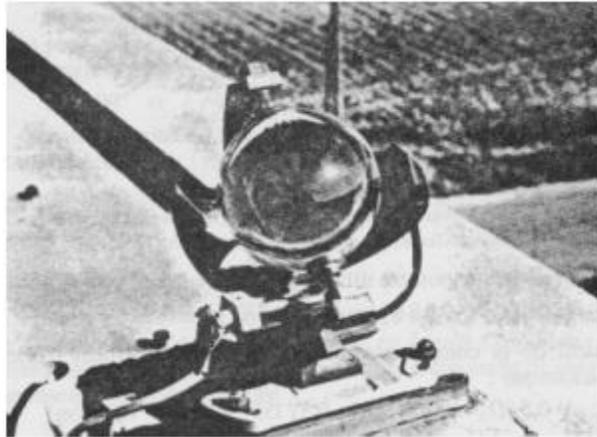


Figure I-3 Photo de l'Héliographe de Campbell

I.5. Rayonnement solaire :

L'énergie reçue au niveau du sol est plus faible que 1354 w/m^2 (la constante solaire) car l'atmosphère absorbe une partie du rayonnement solaire (environ 15%) et la réémet dans toutes les directions sous forme de rayonnement diffus. L'atmosphère réfléchit une autre partie du rayonnement solaire vers l'espace (environ 6%). Le rayonnement global au niveau du sol se définit donc comme la somme du rayonnement direct et du rayonnement diffus. L'énergie reçue par une surface dépend en outre de la saison, de la latitude, des conditions météorologiques, du relief, de la pollution, de l'orientation de la surface considérée [12] etc...

- **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 $0,3 \mu\text{m}$ (dans le domaine ultraviolet), au dioxyde de carbone autour de $2,75 \mu\text{m}$ et $4,25 \mu\text{m}$, mais surtout à la vapeur d'eau dont l'absorption est prépondérante (en particulier autour de $0,9 \mu\text{m}$, de $1,1 \mu\text{m}$, de $1,4 \mu\text{m}$, de $1,9 \mu\text{m}$, de $2,4$ à $2,9 \mu\text{m}$ et de 3 à $4 \mu\text{m}$) et qui module principalement l'allure du spectre solaire reçu au sol [3].

- **Rayonnement diffus :**

Il est dit diffus lorsqu'il est renvoyé dans toutes les directions. Le phénomène de diffusion se produit dans un milieu contenant de fines particules ou des molécules et dépend fortement de la taille des particules considérées. A titre d'exemple, l'influence des molécules est plus intense pour les courtes longueurs d'ondes 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 [3].

▪ **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 réfléchie divisée par l'énergie solaire incidente [3].

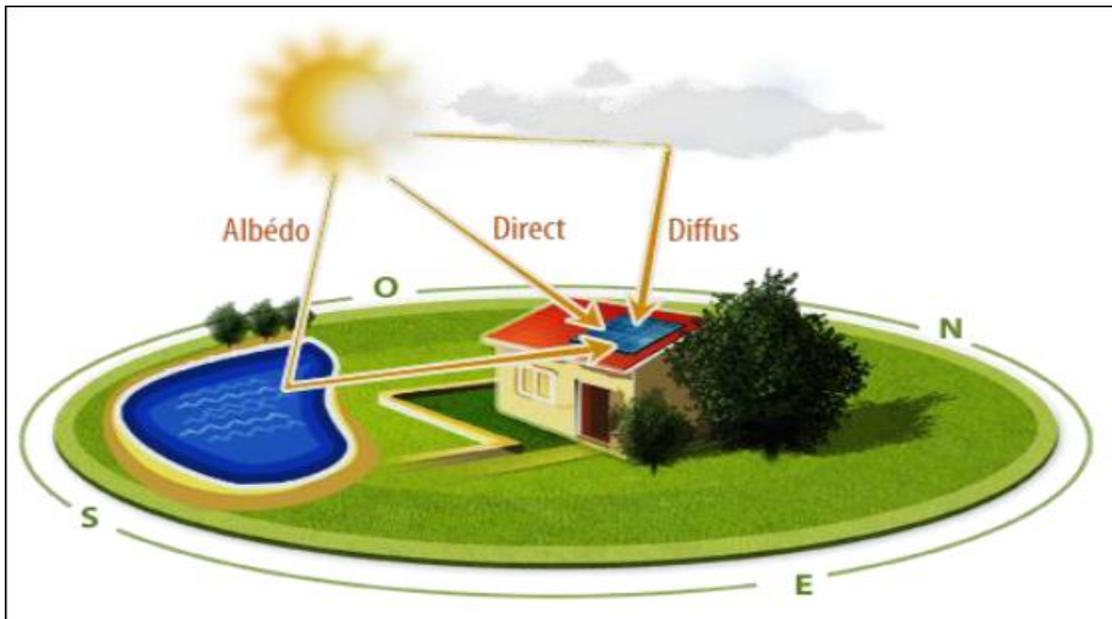


Figure I-4. Composantes du rayonnement solaire atmosphérique.

I.6. Perspectives de l'Algérie en matière d'énergie solaire :

Le potentiel national en énergies renouvelables étant fortement dominé par le solaire, l'Algérie considère cette énergie comme une opportunité et un levier de développement économique et social, notamment à travers l'implantation d'industries créatrices de richesse et d'emplois. Comparativement, les potentiels éoliens, bio-massiques, géothermiques et hydroélectriques sont beaucoup moins importants. Cela n'exclut pas pour autant le lancement de nombreux projets de réalisation de fermes éoliennes et la mise en œuvre de projets expérimentaux en biomasse et en géothermie.

Les projets d'énergie solaire pour la production d'électricité dédiés au marché national sont menés en trois étapes :

- Une première étape, entre 2011 et 2013, sera consacrée à la réalisation de projets pilotes pour tester les différentes technologies disponibles;

- La seconde étape, en 2014 et 2015, sera marquée par le début du déploiement du programme;
- La dernière étape, de 2016 à 2020, sera celle du déploiement à grande échelle.

Ces étapes consacrent la stratégie de l'Algérie qui vise à développer une véritable industrie du solaire associée à un programme de formation et de capitalisation. Ce programme permettra, à terme, d'employer le génie local algérien et d'asseoir un savoir-faire efficace, notamment en matière d'engineering et de management de projets.

L'Algérie s'engage avec détermination sur la voie des énergies renouvelables afin d'apporter des solutions globales et durables aux défis environnementaux et aux problématiques de préservation des ressources énergétiques d'origine fossile. Ce choix stratégique est motivé par l'immense potentiel en énergie solaire. Cette énergie constitue l'axe majeur du programme qui consacre au solaire thermique et au solaire photovoltaïque une part essentielle. Le solaire devrait atteindre d'ici 2030 plus de 37% de la production nationale d'électricité. Malgré un potentiel assez faible, le programme n'exclut pas l'éolien qui constitue le second axe de développement et dont la part devrait avoisiner les 3% de la production d'électricité en 2030.

L'Algérie prévoit également l'installation de quelques unités de taille expérimentale afin de tester les différentes technologies en matière de biomasse, de géothermie et de dessalement des eaux saumâtres par les différentes filières d'énergie renouvelable [13].

I.7. Stockage d'énergie :

Le solaire thermique est l'exemple type d'une ressource de puissance variable dans le temps et déphasée par rapport aux besoins énergétiques. L'amélioration de l'efficacité énergétique concourt à la réduction des gaz à effet de serre, constitue donc un des enjeux majeurs de nos sociétés industrialisées. Or, l'énergie sous forme thermique se caractérise souvent par son inadéquation entre les besoins et les ressources sur plusieurs niveaux : spatial, temporel, en puissance et en température. Le stockage de la chaleur est le moyen le plus évident pour atténuer ces inadéquations, néanmoins, son application industrielle nécessite des compromis sur des critères souvent antagonistes tels que: la densité énergétique (capacité de stockage par unité de volume ou de masse), la puissance thermique instantanée stockée et/ou délivrée, la simplicité du procédé, l'efficacité énergétique (absence de pertes),...etc.

Le stockage de l'énergie solaire thermique s'avère aujourd'hui nécessaire si on veut atteindre une meilleure efficacité et une utilisation à grande échelle de cette ressource. Par définition « stocker de l'énergie consiste à l'emmagasiner pendant une période où elle est abondante ou moins coûteuse (solaire, tarifs de nuit...) pour l'utiliser pendant une période durant laquelle elle est rare ou plus chère» (Dumas, 2002).

I.7.1 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 de systèmes énergétiques. Le stockage d'énergie permet l'économie de carburant et rend les systèmes plus efficaces économiquement par la réduction du gaspillage. 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 plus important pour les systèmes liés à une source d'énergie intermittente telle 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 [10].

I.7.2. Stockage thermique :

Le stockage thermique est un des principaux thèmes de recherche développé en énergétique. Il est aussi un des moyens les plus adaptés à la modulation d'une source variable comme c'est le cas avec le soleil. Le stockage thermique d'une manière générale existe sous trois formes : le stockage par chaleur sensible, le stockage par chaleur latente et le stockage chimique.

Les caractéristiques désirées dans 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 ;
- ✓ un 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 ;
- ✓ pas cher ;
- ✓ une longue vie ;
- ✓ une compatibilité avec le milieu contenant.

Le stockage de l'énergie est un des principaux thèmes de recherche développé en énergétique. Il est aussi un des moyens les plus adaptés à la modulation d'une source variable comme c'est le cas avec le soleil. Le stockage d'énergie d'une manière générale existe sous trois formes:

- le stockage par chaleur sensible ;
- le stockage par chaleur latente ;
- le stockage chimique.

Dans ce qui suit, nous n'allons pas tenir compte du stockage chimique.

I.6.2.1. Stockage par chaleur sensible :

Le stockage thermique par chaleur 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 les cycles thermiques, une compatibilité avec le milieu ambiant et surtout qu'il soit à bas prix.

Le stockage par chaleur 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) [10].

Pour des températures inférieures à 100 °C, l'eau liquide est le composé le plus largement utilisé. Elle est non toxique, peu chère et les échangeurs peuvent être évités si l'eau est utilisée comme fluide caloporteur. Sa régulation est facile. A ces niveaux de température, des systèmes utilisant des roches ou des bétons existent également [14].

▪ **Stockage dans l'eau :**

A basses températures, l'eau est l'un des milieux les plus favorables au stockage d'énergie. Il a une plus grande chaleur spécifique par rapport à d'autres milieux. Elle est caractérisée par son abondance et son coût relativement bas. Mais, du fait de la haute pression de vapeur, il est nécessaire de mettre en œuvre des installations étanches et résistantes aux hautes pressions et températures qui sont très coûteuses. L'eau peut être utilisée sur une large gamme de températures 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, cela fait de lui 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 [10]

▪ Stockage dans les eaux salées :

Les bassins solaires offrent une méthode simple et économique 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 facteurs principaux:

- convectifs ou non-convectifs ;
- multi couches ou mono couche ;
- collection et stockage séparés ou unis.

Toutefois la plus part des recherches se concentrent sur les bassins salés non convectifs. Dans ce type 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 [10].

▪ Stockage dans d'autres fluides :

Les autres fluides utilisés dans les procédés de stockage thermique 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 comparée à celle de l'eau et peuvent opérer sous de hautes températures dépassant les 300°C. La température opérationnelle limite de ces huiles est de l'ordre de 350°C pour des raisons de stabilité et de sécurité.

Les métaux liquides peuvent éventuellement être utilisés comme milieux de stockage de chaleur sensible, leurs propriétés sont similaires à celles de l'eau et à celles des huiles à base de pétrole. Ils ont une faible capacité calorifique mais un plus grand potentiel en termes de réactivité avec le conteneur [10].

▪ Stockage dans les solides :

Pour les basses comme pour les hautes températures de stockage d'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 à 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 candidat dans la liste des matériaux solides pour le stockage de la chaleur sensible est la fonte.

Toutefois, la fonte est plus chère que la pierre ou la brique. Les lits de galets ou les tas de pierres sont généralement préférés comme matériau de stockage en raison de leur faible coût [10].

*** 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 caloporteur 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, de plusieurs paramètres, notamment la taille et la forme de la roche, la densité d'emballage, le fluide de transfert de chaleur [10] 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 d'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 construction 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 [10].

***** 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. 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 [10].

I.6.2.2 Stockage par chaleur latente :

Le stockage par chaleur latente est une technique particulièrement intéressante, puisqu'elle fournit une densité de stockage énergétique très élevée et a la capacité de stocker la chaleur sous forme 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 d'un volume donnés, peut stocker plus d'énergie qu'un autre matériau de même masse et même volume [10].

Les changements de phase sensible sont :

- solide- gaz ;
- liquide- gaz ;
- solide- liquide ;
- Solide-solide.

I.6.2.2.1. Propriété idéale d'un matériau à changement de phase :

Un grand nombre de matériaux à changement de phase possède une température de fusion dans la gamme de températures (0-120°C). Cependant ils ne peuvent être utilisés comme matériaux de stockage que lorsqu'ils possèdent certaines propriétés thermodynamiques, cinétiques et chimiques qui sont définies à partir d'un certain nombre de critères [15].

A. Critère thermodynamique :

Le matériau à changement de phase doit avoir :

- ✓ une température de fusion dans la gamme des températures souhaitées ;
- ✓ une chaleur latente par unité de masse élevée (une petite quantité du matériau doit pouvoir emmagasiner une grande quantité de chaleur) ;
- ✓ une chaleur spécifique élevée de sorte que le matériau puisse disposer d'une chaleur sensible significative ;
- ✓ une fusion congruente ;
- ✓ une petite augmentation de volume pendant la phase de transition.

B. Critère cinétique :

Le PCM doit montrer peu ou aucune surfusion durant la congélation. Le matériau doit se cristalliser sur son point de congélation [10].

C. Critère chimique :

Le matériau à changement de phase doit montrer :

- ✓ une stabilité chimique ;
- ✓ pas de décomposition chimique, pour avoir une bonne longévité pour nos systèmes ;
- ✓ aucune corrosion avec les matériaux de constructions ;
- ✓ le matériau ne doit pas être empoisonnant. Il doit être non inflammable et non explosif.

D. Critères économiques :

Le matériau à changement de phase doit être:

- ✓ disponible en grande quantité ;
- ✓ bon marché.

I.6.2.2.2 Classification des PCM :

A priori aucun matériau à changement de phase ne peut satisfaire tous ces critères. Plusieurs matériaux ont été étudiés comme étant des matériaux à potentiels à changement de phase, mais peu d'entre eux sont commercialisés. Les matériaux à changement de phase se classent en trois grandes familles:

- 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.

A. MCP inorganiques :

Les matériaux ou les substances inorganiques ont une température ou une plage de températures de fusion comprise entre $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $+1000\text{ }^{\circ}\text{C}$. Les plus utilisés sont : l'eau (température de fusion $0\text{ }^{\circ}\text{C}$), les solutions aqueuses de sel (température de fusion inférieure à $0\text{ }^{\circ}\text{C}$), des sels hydratés (température de fusion comprise entre $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $130\text{ }^{\circ}\text{C}$), des mélanges de sels, des mélanges de métaux (température de fusion supérieur à $150\text{ }^{\circ}\text{C}$). Ils ont plusieurs avantages : ils ont une chaleur latente importante et une haute conductivité thermique. Ils ont une fusion nette (c'est à dire une plage de fusion étroite). Ils sont non-inflammables et ils ont un coût d'investissement abordable. Ils sont en général facilement disponibles. Les problèmes majeurs rencontrés lors de leurs utilisations sont en rapport avec la ségrégation, la corrosion et la surfusion nécessitant ainsi l'utilisation d'agent de nucléation afin d'être fiables [16].

B. MCP organique :

Les matériaux ou les substances organiques ont une température ou une plage de température comprise entre $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $150\text{ }^{\circ}\text{C}$. Les plus utilisés sont essentiellement à base de paraffine, des acides gras et des alcools de sucre.

▪ *Les paraffines :*

Les paraffines appartiennent à la famille des composés organiques, elle dérive du pétrole. Ce sont des substances qui ont un teint de cire consistant à la température ambiante. Elles sont essentiellement constituées d'hydrocarbures saturés à chaîne linéaire ou parton ramifiés avec un groupement méthyle substitué en bout de chaîne. Les paraffines pures constituées d'alcane peuvent être caractérisés par leur point de fusion [16].

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 utilisé.

- **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.

C. MCP eutectique :

Les MCP eutectiques sont des substances composées de plusieurs MCP purs. En général, ce sont des mélanges de MCP organiques et inorganiques (organique-organique, organique - inorganique, inorganique-inorganique). Ils ont deux principaux avantages : un point de fusion net similaire à une substance pure et chaleurs latentes volumétriques légèrement supérieures à celles des composés organiques purs. Leurs deux principaux inconvénients : peu de données disponibles sur les propriétés thermiques de ces matériaux et sont peu utilisés au niveau des systèmes industriels [15].

Chapitre II
Généralités sur les centrales à
cheminée solaire

Généralités sur les centrales à cheminée solaire

II.1. Historique :

De nombreux chercheurs à travers le monde ont mis en place divers projets de cheminée solaire. Le célèbre génie italien Léonardo da Vinci était le premier à transformer l'énergie cinétique de l'air chaud ascendant en énergie mécanique en utilisant un dispositif très simple et ingénieux.

Le concept de centrale à cheminée solaire a été proposé pour la première fois par le colonel espagnole Cabanyes. Hanus Günter, dans sa publication de 1931 a décrit et analysé le modèle proposé en 1926 par Bernard Dubois à l'académie française qui prévoyait la construction d'une CCS en Afrique du nord. Depuis 1975, plusieurs brevets ont été accordés à Lucier en Australie, au Canada, et aux Etats-Unis.

Le Professeur Jorg Schlaich de l'université de Stuttgart a également présenté cette technologie dans un congrès en 1978, pour concevoir et construire avec ses coéquipiers le premier prototype d'une CCS à Manzanares en Espagne entre 1981 et 1982. Ce prototype a été financé par le ministre allemand de la recherche et de la technologie et réalisé par la société d'ingénierie Schlaich Bergermann und Partner.

Le prototype doté d'une tour de 194.6 m de hauteur, d'un collecteur de 244 m de diamètre et d'une turbine à rotor unique à quatre pales, orientée verticalement, installée à la base de la tour a fonctionné jusqu'à 1989 en produisant une puissance maximale de 50 kW. La turbine a fonctionné 3067h de jour et 244h de nuit (grâce au stockage thermique du sol), fonctionnant ainsi en moyenne 8h45 par jour. Depuis, plusieurs recherches ont été menées jusqu'à aujourd'hui. En 2006 le bureau d'ingénierie d'OTH baptisé Elioth a breveté le concept de montagne solaire. Fondé sur le même principe, la cheminée est remplacée par un conduit qui épouse le relief montagneux [17].

II.2 La centrale a cheminée solaire :

La centrale à cheminée solaire est l'un des projets les plus ambitieux de la planète pour la production d'énergie alternative. C'est une usine d'énergie renouvelable qui pourrait fournir une puissance électrique importante (200 MW) tout en étant sûr et propre. Son principal avantage est qu'elle peut fonctionner sans intermittence en utilisant le rayonnement du soleil le jour et la chaleur de la croûte terrestre la nuit.

II.2.1. Principe de fonctionnement d'une CCS :

La centrale à cheminée solaire (CCS) repose sur un principe très simple comme le montre la figure II-1. Le rayonnement solaire chauffe l'air par effet de serre sous le collecteur, l'air chaud étant plus léger que l'air froid, une différence de pression se crée entre l'entrée et la sortie du dispositif entraînant ainsi le fluide en mouvement. L'énergie solaire est alors transformée en énergie cinétique. En plaçant des turbines à l'entrée de la cheminée, l'air en mouvement entraîne la rotation de ces turbines, ces dernières sont raccordées à un générateur d'électricité permettant de transformer l'énergie mécanique des turbines en énergie électrique.

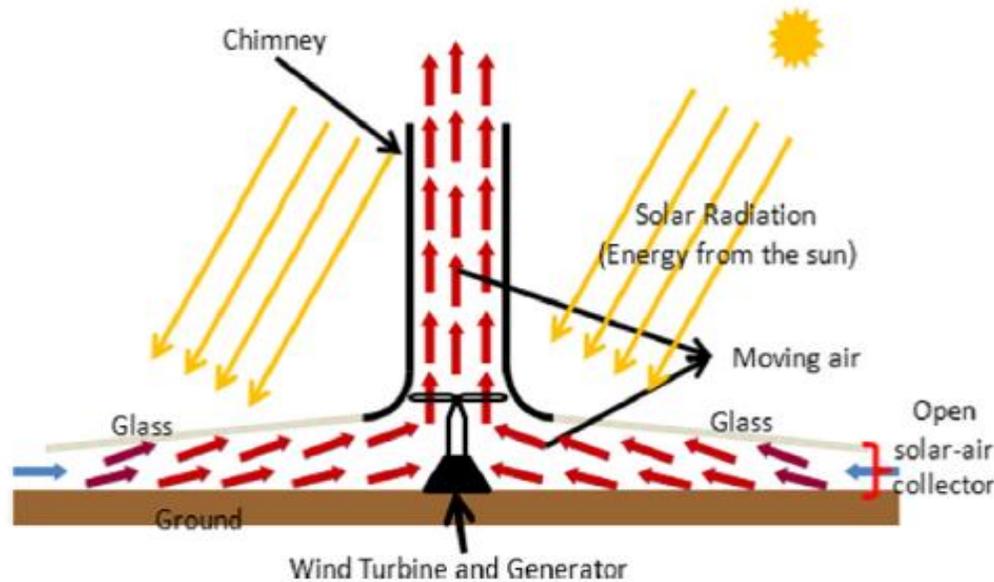


Figure II-1 : Principe de fonctionnement d'une centrale à cheminée solaire.

II.2.3. Composantes de la cheminée solaire :

La centrale à cheminée solaire est composée principalement d'un collecteur, une cheminée et d'un turbogénérateur

II.2.3.1 Le collecteur :

Le collecteur est la partie 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. Les figures II.1 et II.2 montrent respectivement la verrière du collecteur et l'ensemble collecteur- cheminée.



Figure II 2 : Verrière du collecteur d'une cheminée solaire.



Figure II-3 : Collecteur d'une cheminée solaire.

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.

II.2.3.2. La cheminée :

La cheminée est la partie la plus importante de la CCS, elle agit comme une machine thermique. Les pertes par frottement 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.



Figure II-4 : Photo montrant une tour cheminée.



Figure II-6 : Cheminée autoportante.

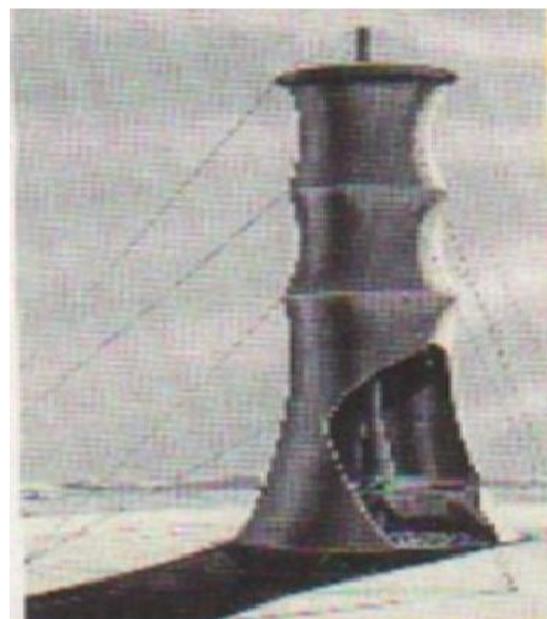


Figure II-5 : Cheminée haubanée.

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".

II.2.3.3 La turbine :

La turbine permet de récupérer l'énergie cinétique acquise par le l'air dans le collecteur et la transformer en énergie mécanique puis en électricité. La figure II.7 montre une photo de turbine. Elle est placée soit verticalement dans le collecteur (Figure II-8), soit horizontalement (Figure II-9). Les turbines doivent couvrir toute la section de la cheminée. A cet effet, une grande turbine ou plusieurs petites turbines devraient être utilisées au pied de la cheminée.

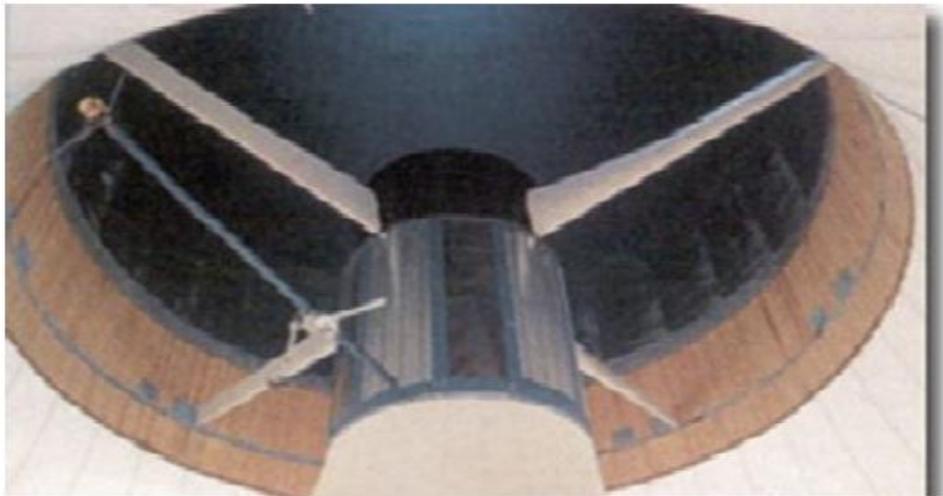


Figure II-7 : Turbine pour Cheminée Solaire de large diamètre.

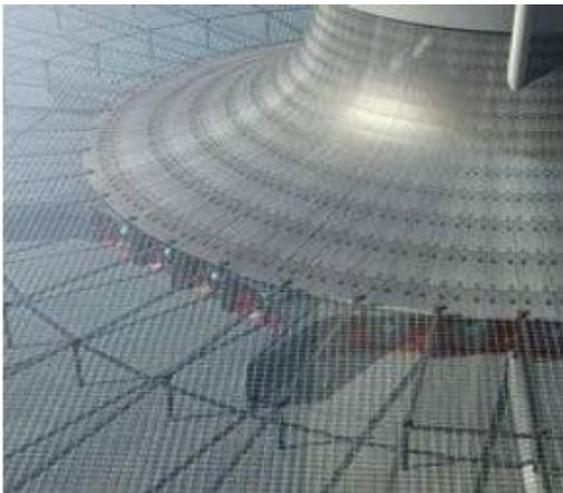


Figure II.8 : Turbines verticales



Figure II.9 : Petites turbines horizontales

II.2.4. Avantages et inconvénients des centrales à cheminée solaire :

II.2.3.1. Avantages [10]:

- Les centrales à cheminée solaire 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 centrales solaires à concentration 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 [10] :

- 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.3. Stockage dans les CCS :

Dans le but d'augmenter l'inertie thermique des CCS on a recouru au stockage thermique. Les procédés de stockage thermique utilisés dans le cas des CCS sont des systèmes de stockage à basse température. Les études déjà menées sur le sujet ont donné des résultats concluants, ce qui

permet d'éliminer le problème d'intermittence du soleil et augmenter les performances des CCS. En effet plusieurs études ont été menées dans ce cadre afin d'augmenter les performances des CCS, et de trouver les milieux de stockage les mieux adaptés à ce type de conversion d'énergie solaire.

Dans ce qui suit on va s'intéresser aux milieux de stockage thermique les plus utilisés.

- **Le sol comme milieu de stockage :**

Le sol sous le collecteur constitue un milieu de stockage thermique pour la CCS. Le sol emmagasine de la chaleur pendant la journée et la restitue la nuit pour permettre un fonctionnement continu de la centrale. La quantité de chaleur emmagasinée dépend directement de la capacité calorifique du sol sous le collecteur : plus la capacité calorifique du sol est grande plus la chaleur emmagasinée est importante plus le fonctionnement pendant la période d'absence du soleil sera performante.

Parmi les types de sol les plus cités 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 [10].

- **Lit de galet comme milieu de stockage :**

L'utilisation de lit de galets comme milieu de stockage thermique dans les CCS a permis de prolonger la période de fonctionnement des centrales. En effet, le lit de galets absorbe une partie du rayonnement solaire émis pendant la journée et l'emmagasine sous forme de chaleur, au coucher du soleil, le lit de galet restitue la chaleur emmagasinée pendant la nuit afin de chauffer l'air sous le collecteur en permettant ainsi un fonctionnement continu de la CCS [3]. La figure II. 10 montre le principe de fonctionnement du système de stockage à base de lit de galets.

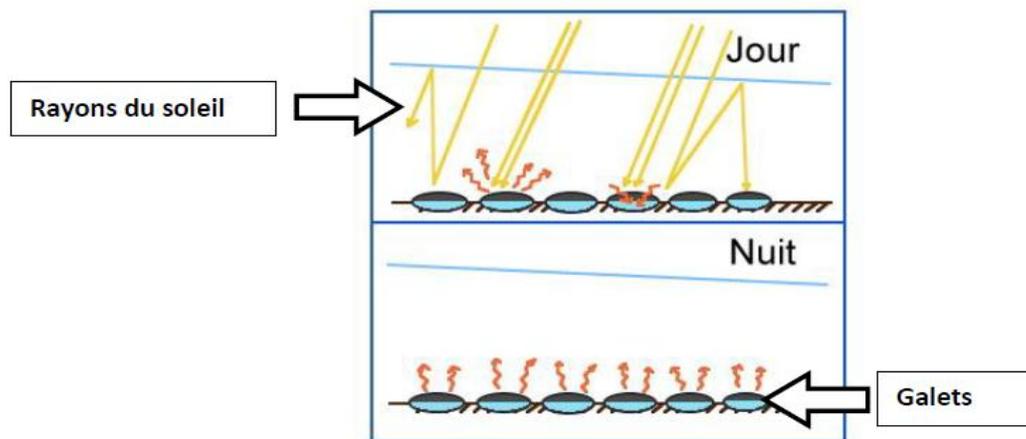


Figure II-10. Principe du stockage thermique avec le lit de galet.

- **L'eau comme milieu de stockage :**

L'eau est mise dans des tubes noirs, disposée côte à côte sur le sol. Les tubes sont remplis d'eau, une seule fois, puisque les tubes sont hermétiquement clos après le remplissage et restent par la suite fermés, afin qu'aucune évaporation ne puisse avoir lieu. La figure II.11 montre le Principe du stockage thermique en utilisant l'eau comme de stockage.

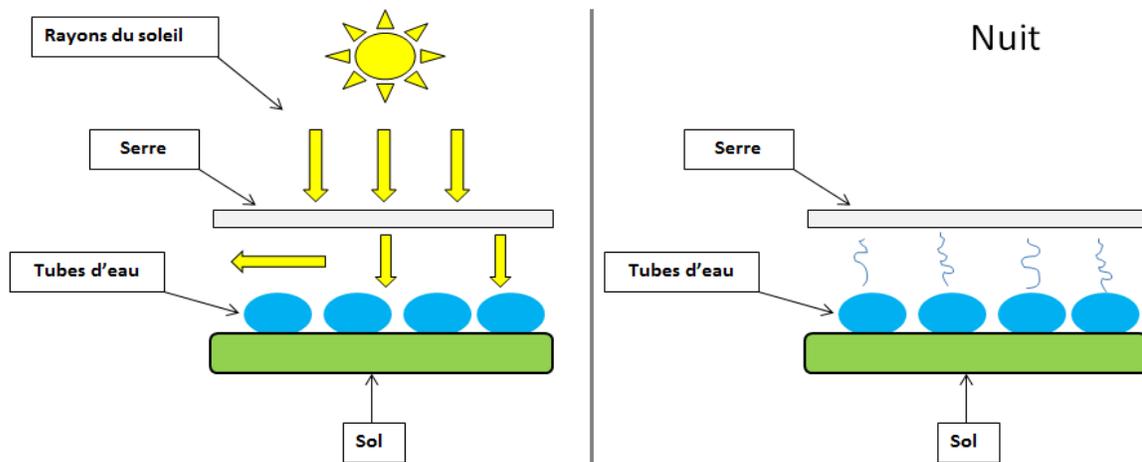


Figure II-11. Principe du stockage thermique en utilisant l'eau comme de stockage.

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 (4.18 kJ/kg) est beaucoup plus grande que celle du sol ($0.75 - 0.85 \text{ kJ/kg}$), l'eau à l'intérieur des tubes stocke une grande partie de la chaleur solaire et la libère pendant la nuit, quand l'air dans le collecteur se refroidit.

Le volume d'eau dans les tubes est calculé pour correspondre à une hauteur d'eau de 5 à 20 cm en fonction de la puissance désirée de production nocturne, l'énergie stockée pour la nuit diminue la production de la journée. Un ajustement de la production peut être effectué aux heures de pointe où l'électricité se vend 3 à 10 fois plus cher qu'aux heures creuses, améliorant ainsi la rentabilité [10].

- **Les PCM comme milieu de stockage :**

Le stockage thermique en utilisant les PCM comme milieu de stockage dans les CCS n'a pas fait l'objet de beaucoup de recherches, car cette technique de stockage est en phase primaire de développement, les chercheurs ne maîtrisent pas encore cette technique comme les techniques de stockage citées auparavant.

Pendant des expériences ont été faites dans ce contexte, ils ont montré que les PCM en tant que matériaux de stockage dans les CCS pouvaient allonger la période de fonctionnement des cheminées solaires d'une manière significative.

▪ 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...

II.4. Les projets :**II.4.1. Prototype de Manzanares:**

Le premier prototype de centrale à cheminée solaire, grandeur nature, a été construit à Manzanares en Espagne à 150 km de Madrid. Le prototype a fonctionné de 1982 à 1989 sous l'égide du ministère Allemand de la recherche et de la technologie, le bureau d'étude Schlaich Bergermann & Partner de Stuttgart à réaliser le prototype. Ce prototype a été réalisé dans le but de vérifier expérimentalement les résultats obtenus à partir des calculs théoriques réalisés au paravent, et d'examiner l'influence de chaque composant sur le rendement et la puissance délivrée par une telle installation sous des conditions technologiques et métrologiques réelles [10].

La cheminée en forme d'une tour cylindrique de 195m de haut et de 10m de diamètre, construite à partir de tubes de guidage recouvert par des plaques trapézoïdales ondulé de 1.25mm d'épaisseur. La tour cylindrique repose sur une base circulaire soutenue par 8 poutres très fines afin de ne pas gêner l'écoulement d'air. La structure est maintenue sur 3 niveaux et dans 3 directions, avec des câbles raccordés au sol.

Le collecteur fusait 45 000 m² de surface, le toit était composé de différents type de plastique et de verre dans le but de déterminer le matériau le plus fiable et le moins chère. L'expérience a montré que 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.

La turbine utilisée est à axe verticale avec 4 pales ajustables en fonction de la vitesse de l'air. L'ajustement des pales permet de régler la chute de pression à travers la turbine, afin de pouvoir obtenir une puissance électrique optimale. Elle était posée sur une structure métallique à 9m du niveau du sol.

Spécification du projet :

- Tour cheminée : 194.6 m de hauteur ;
- Rayon de la tour : 5.08 m;
- Rayon moyen de collecteur : 122.0 m ;
- Hauteur moyenne du 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.

Le projet a été arrêté en raison d'un coût du kilowattheure, cinq fois plus élevé qu'une centrale thermique classique. Les figures II. 12 et II. 13 montrent respectivement les photos de la centrale cheminée de Manzanares et de sa structure.



Figure II.12 : Photo de la cheminée solaire de Manzanares.



Figure II.13: Structure de la cheminée solaire de Manzanares.

II.4.2 Les projets actuels de cheminées solaires :

Après les résultats prometteurs fournis par le prototype de Manzanares, plusieurs pays se sont lancés dans des projets de CCS, malheureusement aucun de ces projet n'a été concrétisé. Dans ce qui suit, nous présenterons quelques projets de CCS à travers le monde.

II.4.2.1 Le projet Australien :

Un projet de tour solaire, appelé Projet de Buronga, était prévu pour 2010, est développé en Australie par la société, Enviromission. La cheminée avait 990 mètres de hauteur, 70 mètres de diamètre. La centrale devrait fournir 200 mégawatts 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 solaire existante 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 (Chooz = 1500 MW par réacteur, soit encore 7 fois plus [18]).

Pour contrer l'effet d'ovalisation de la tour (qui la replierait sur elle-même aussi facilement qu'un cylindre de papier mouillé posé sur une table vu son incroyable légèreté), la société d'ingénierie SBP, responsable du projet, a eu l'idée de placer dans la tour à intervalles réguliers des structures de maintien ressemblant aux rayons d'une roue de bicyclette. Elles ne diminuent que de 2% la vitesse de l'air. Le coût d'investissement serait d'environ 400 millions d'euros, ce qui implique un cout d'investissement de 2 €/W. Par comparaison, un système photovoltaïque de 2008 coûte environ le triple, tandis que la récente centrale solaire thermodynamique PS10 (11 MW) a coûté 3,2 €/W, soit 1,6 fois plus. Le kilowattheure fourni resterait néanmoins toujours cinq fois plus chères que l'électricité produite par le charbon, qui représente 95% de la production en Australie. Le projet reste donc non rentable au prix actuel des ressources fossiles, poussant les promoteurs du projet à prévoir d'autres sources de revenu annexes : visite touristique, culture sous serre [18] etc...La figure II.14 montre une vue de la cheminée solaire d'Australie.



Figure II-14 : Cheminée solaire Australienne.

Spécifications du projet :

- Une cheminée de 990 m de haut (3281 pieds) matériaux composite ;
- Un collecteur de 7 km de diamètre, soit 38,5 km² de verre et de plastique ;
- Une température de l'air chauffé dans la cheminée : 70 °C ;
- Une vitesse de l'air dans la cheminée : 15 m/s (54 km/h) ;
- 32 turbines ;
- Une puissance produite : 200 mégawatts.

Ce projet peut paraître incroyable mais ses concepteurs le disent réaliste. Les études de faisabilité par le bureau d'ingénieurs Allemand SBP, basée à Stuttgart, arrivent à leur terme. Cette tour solaire serait donc construite par l'entreprise EnviroMission dans le désert de Nouvelle-Galles du Sud, dans le comté de Wentsworth. A cause du problème de financement EnviroMission 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 aux vues des sommes mises en jeu et des investissements déjà réunis.

II.4.2.2 Le projet espagnol :

Un autre projet de tour solaire, prévu pour arriver à échéance avant 2010, si le financement est trouvé, est actuellement développé en Espagne dans la localité de Fuente el Fresno, un village de la Province de Ciudad Real. Les travaux devraient être menés en collaboration avec les entreprises espagnoles Campo 3 et Imasa, et la compagnie allemande Schlaich Bergermann. Cette tour de 750 mètres de hauteur serait dès lors la plus haute en Europe [3].

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 (tomates) ;
- Vitesse de l'air dans la cheminée : 43 km/h ;
- Puissance de l'installation : 40 mégawatts, soit la demande en électricité d'environ 120000 personnes.

Coût du projet : 240 millions d'euros, que les partenaires espéraient réunir en 2007. Comme tous les autres, ce projet produit un kWh beaucoup trop cher pour rendre le projet rentable sans source de revenu annexes : en l'occurrence, l'installation d'équipements de télécommunication et de surveillance contre les incendies, et tourisme [3].



Figure II-15 : Cheminée Solaire de Ciudad Real (Espagne).

II.4.2.3 Le projet Namibien :

Dans ce projet, la tour solaire, baptisée « **Greentower** » fait 1,5 km de hauteur et de 280m de diamètre et va fonctionner en générant un courant d'air ascendant, produisant ainsi 400 MW d'électricité. La superficie de la serre est de 38,5 km² (7 km de diamètre) où les cultures de rente peuvent être cultivées. Le coût d'investissement de cette tour solaire serait estimé à 1 milliard de dollars [3]. La figure II-16 montre une vue de la cheminée solaire de Namibie.



Figure II-16 : Cheminée solaire Namibienne.

La figure II-17 montre une vue comparative des tailles de divers projets de cheminées solaires.

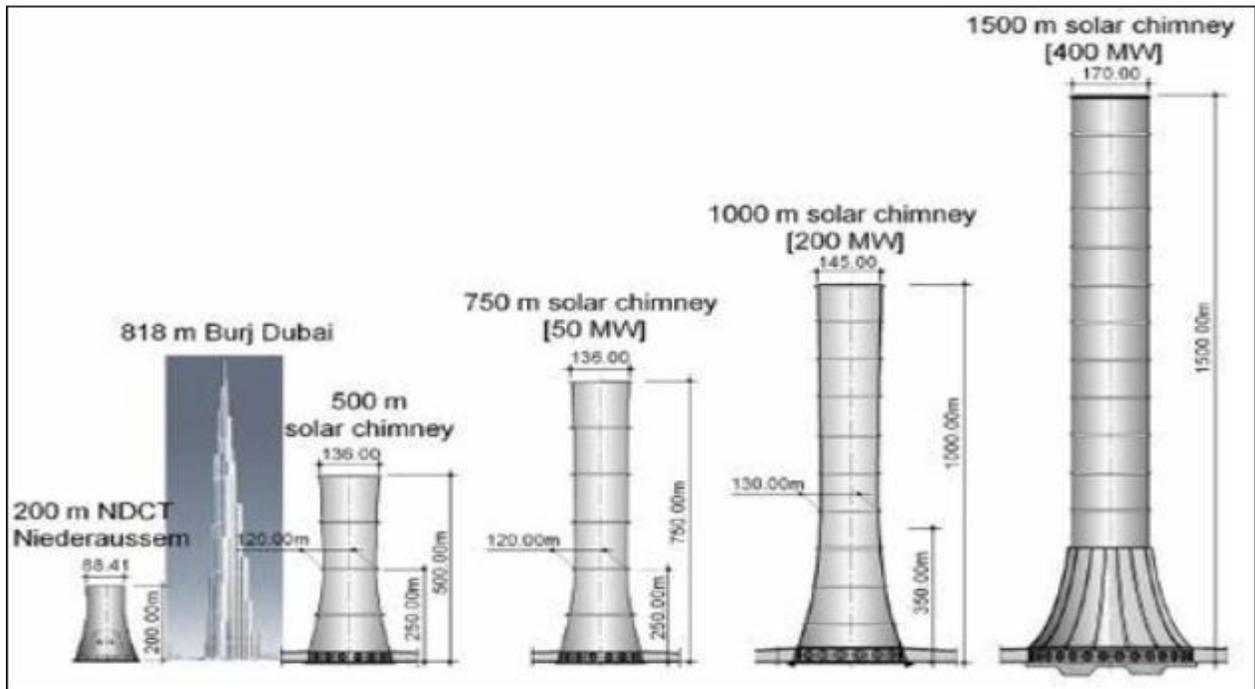


Figure II-17 : Taille comparée de divers projets de Cheminées solaires.

II.5 Autre types de cheminées solaires :

- Montagne solaire :

Le projet ELIOTH, est un système de tour solaire inclinée épousant la forme des montagnes et permettant son intégration dans le paysage naturel. La surface du globe fournit des appuis naturels grâce au relief, dès lors, monter à 1000 ou 3000 mètres ne représente plus un exploit technique majeur, dans la mesure où le conduit de la cheminée épouse le relief et prend appui régulièrement sur le sol [19]. La figure II.18 montre une vue du projet ELIOTH.



Figure II 16 : Parcours de l'air dans la Montagnes Solaires, projet ELIOTH.

Ce projet s'inspire du modèle proposé par l'ingénieur Français Bernard DUBOS à l'académie française en 1926.

▪ **Cheminée solaire « flottante » :**

Dans le but de diminuer les couts liés à la construction d'une cheminée solaire classique, le Professeur, Christos Papageorgiou, a proposé la construction d'une cheminée solaire flottante. Il s'agit d'une structure souple et flexible fixée au sol dans un désert sec. La structure est légère et se gonfle par exemple à l'hélium. La figure II. 18 montre une vue de cheminée solaire flottante.

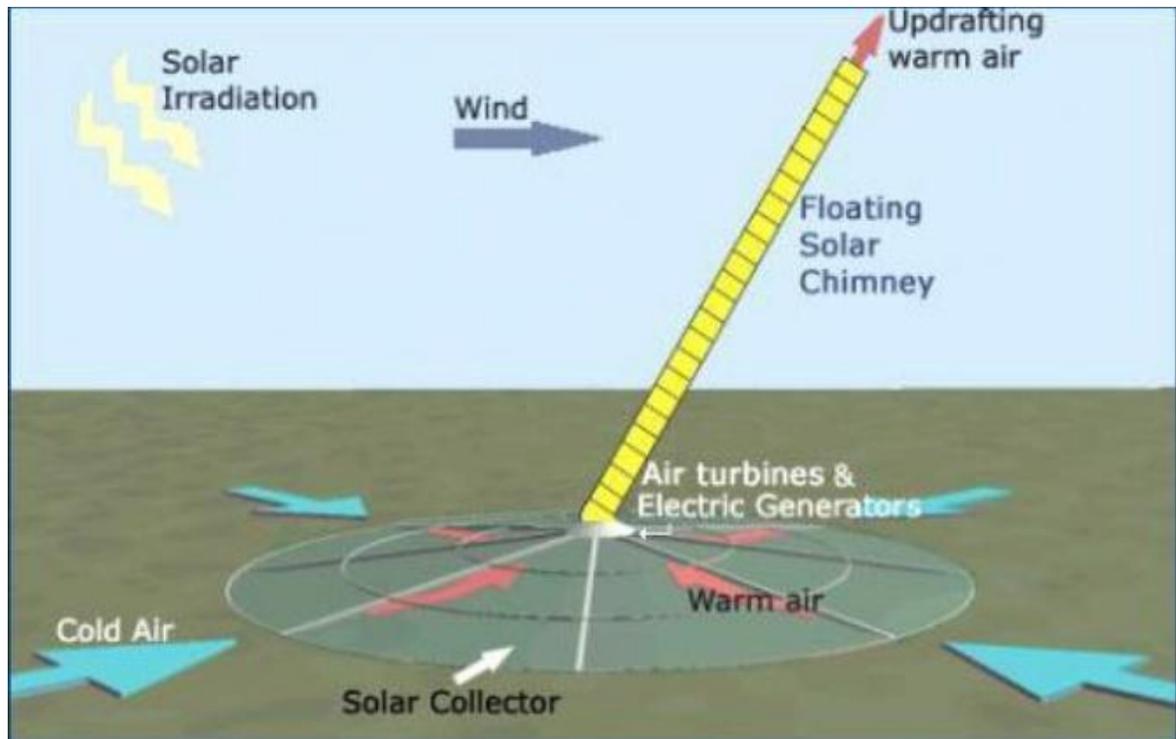


Figure II-18 : Cheminée solaire « flottante »

II-6. Centrales à cheminée solaire, choix énergétique par excellence pour l'Algérie :

Le projet de centrales à cheminée solaire porte en lui un potentiel plein de promesses pour notre pays et pour l'Afrique en général. Les avantages et les points forts de cette technologie sont nombreux. Elle est la seule, par ces atouts intrinsèque, en mesure de rendre possible une industrie énergétique solaire productrice d'électricité verte en masse. Elle fonctionne de jour comme de nuit et n'a pas besoin d'eau de refroidissement. Son fonctionnement et sa maintenance sont simples, sa robustesse et sa longévité remarquable, son intégration aux économies locales est très forte du fait de la simplicité de ses matériaux de construction (Principalement béton et verre ordinaire).

Une comparaison détaillée des technologies solaire citées précédemment avec les centrales à cheminée solaire nous permette de conclure que cette dernière domine très largement

les débats, car les autres anciennes voies n'ont jamais permis l'émergence de la solution énergétique solaire à cause de nombreux handicaps dont l'intermittence de production due à l'intermittence du soleil, les besoins énormes en eau de refroidissement et une très grande fragilité face aux conditions rudes des déserts. Ces handicaps sont associés à une grande complexité qui nous laisserait dépendant en permanence des industries du Nord. Il faut bien prendre conscience que la technologie des CCS constitue une véritable « clé technologique » qui a la capacité de nous faire effectuer le saut tant attendu vers une ère post-carbone. C'est une révolution technologique profonde en perspective... [20].

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

Etat de l'art sur les centrales à cheminée solaire

III.1 Introduction :

Dans ce chapitre on se focalisera sur l'état de l'art sur les CCS. Cet état de l'art permettra de faire le point sur les différentes publications relatives aux cheminées solaires où vont être décrites : les études théoriques, les études sur le stockage thermique dans les CCS, les études expérimentales et enfin les études économiques.

III.2 Etudes théoriques sur les CCS :

Le travail pionnier de J. Schlaich [6] sur le concept de la cheminée solaire 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 [24] et Haaf et al. [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 [25] 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 celles 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 Manzanares (Espagne) a été réalisée par Haaf et al. [26]. Dans leur article, les auteurs ont analysé le bilan énergétique, les critères de conceptions et l'analyse des coûts d'une centrale à cheminée solaire. 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 [28] et Sherif [29] 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 établi 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 structurales 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 ces résultats par le 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 sur deux 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 celui installé 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 du collecteur 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. [32] 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 structurales caractéristiques sur la puissance développée.

Les résultats du modèle mathématique ont été comparés avec les résultats expérimentaux de la centrale de Manzanares, pour être ensuite utilisé pour prédire les performances caractéristiques des CCS à grande échelle et à caractère commercial. Ces résultats montrent que la hauteur de la cheminée, le facteur de chute de pression au niveau de 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 au niveau de 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, des frottements internes et de l'échange thermique entre les différentes zones.

Les auteurs se sont penchés sur une analyse thermodynamique idéale du cycle d'écoulement d'air, supposé comme gaz parfait avec écoulement 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 à la 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 acquise 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 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'expressions 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.

Les auteurs 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 égal à 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 en considérant que l'écoulement est 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 du fluide dans la cheminée solaire.

Les mêmes auteurs ont simulé un écoulement d'air dans une cheminée en prenant en compte les différents régimes d'écoulements, les aspects thermo- hydrodynamiques d'écoulement ont également été analysés. L'approche adoptée dans cette étude est principalement liée à l'analyse d'une centrale de cheminée solaire pour produire une puissance de quelques mégawatts.

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], les auteurs 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'installation. 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 d'échelle de longueur adimensionnelle du système. 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 [10].

Chiemeka [45] a étudié la faisabilité d'installation d'une centrale à cheminée solaire (CCS) au nord de Chypre. Les résultats issus des simulations et relatifs à la production d'électricité ont été comparés avec les enregistrements expérimentaux du prototype de Manzanares. L'énergie annuelle produite par la centrale cheminée solaire de 30 MW est de 94.5 GWh. Cette énergie peut couvrir les besoins annuels en électricité de plus de 22.128 résidences.

Kröger et Buys [46] ont élaboré des relations analytiques pour la détermination de la différence de pressions 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 dans 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.

II.3. Etudes relatives au stockage thermique :

La première étude traitant le stockage thermique dans le système de centrale à cheminée solaire qui mérite d'être mentionnée était celle Kreetz en 1997. L'auteur [50] 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.

Hedderwick [51] et Pretorius [52] ont étudié et discuté la distribution de la température dans le sol sous le collecteur. Ils ont constaté que le sol joue un rôle très important dans la consommation d'énergie.

Pretorius et al [53] ont réalisé des simulations sur les effets du stockage thermique en considérant le granite comme milieu de stockage. Pretorius and Kröger [54] ont analysé les effets de différents types de sol (grès, granit, calcaire, sable, terre humide et l'eau) et de vitrage du toit du collecteur sur l'efficacité d'une centrale à cheminée solaire de grande échelle. Ils ont constaté que les CCS employant l'eau comme milieu de stockage développe la puissance de sortie la plus minime comparé autres type de sol, tandis que celle employant le sable développe la puissance de sortie maximale. Ils ont également conclut que la capacité d'absorption du sol influe positivement sur la puissance de sortie annuelle de la CCS.

Hammadi [7] a étudié l'effet du système de stockage thermique sur la production d'énergie de la CCS. Les résultats obtenu par l'auteur ont montré que l'utilisation de sac d'eau comme milieux 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.

L'étude expérimentale conduite par Miqdam and Hussein [54] a permis de mettre en évidence l'effet du matériau constituant la base de la cheminée sur la température de l'air du collecteur. Trois types de matériaux ont été utilisés : béton, béton noir et caillou noir. Les résultats ont montré que la plus grande différence de température a été obtenue pour les cailloux noirs.

Ming et al [55] ont effectué des simulations numériques pour analyser les caractéristiques du transfert de chaleur et du débit d'air dans la CCS avec une couche de stockage thermique. Les auteurs ont établi un modèle mathématique relatif aux différentes parties du système. Ils ont étudié l'effet du rayonnement solaire sur les caractéristiques de la couche de stockage thermique. Les simulations numériques ont montré que l'utilisation du sol comme milieu de stockage est très avantageux, ce qui pourrait effectivement moduler la différence de température et la puissance de sortie de la CCS entre le jour et la nuit. Les mêmes auteurs ont employé un système de stockage énergétique hybride entre le sol et l'eau dans le but réduire les fluctuations de la génération d'énergie de la cheminée solaire.

Xu et al [56] ont effectué une simulation numérique d'une cheminée solaire avec une couche de stockage thermique similaire au prototype espagnol. L'étude de Bernardes et al. [8] 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 tandis 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.

Dans le but d'étudier les performances d'une CCS avec stockage thermique, Zheng et al. [57] (2010) ont réalisé une étude numérique sur la réponse des matériaux de stockage thermique pour différents rayonnements solaires et leur effet sur la puissance de sortie. Cette étude a montré que le gravier ($\rho = 2555 \frac{kg}{m^3}$, $Cp = 814.8 j/kg.K$ et $K = 2.00 W/m.K$) et le

sol ($\rho = 1700 \text{ kg/m}^3$, $C_p = 2016 \text{ J/Kg.K}$ et $K = 0.78 \text{ W/m.K}$) pourraient être utilisés comme matériau de stockage thermique pour le système de cheminée solaire [10].

Bernardes [58] 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 $\text{Ws}^{1/2}/\text{K m}^2$. Sangi et al. [56] 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.

Fanlong et al [60] se sont intéressés, dans leur recherche, au système de stockage thermique hybride en utilisant l'eau et le sol comme milieux de stockage thermique pour réduire les fluctuations de production d'énergie dans les CCS. Les auteurs ont établi des modèles mathématiques décrivant l'écoulement du fluide (air), le transfert de chaleur et les caractéristiques de puissance de sortie comprenant une couche de stockage d'énergie. En outre les auteurs ont analysé l'influence du matériau et la profondeur de la couche de stockage sur la puissance de sortie. Les résultats de la simulation ont montré que le système de stockage thermique hybride combinant l'eau et le sol peut effectivement réduire la fluctuation de puissance de sortie.

Zhou et al. [61] ont choisi la paraffine comme matériau de stockage énergétique dans le collecteur. Ils ont trouvé 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 augmentent.

Xu et al. [62](2011) ont réalisé une simulation numérique d'une cheminée solaire avec une couche de stockage thermique semblable au prototype espagnol. Une étude expérimentale de l'effet des variations de température au sol sur le système de cheminée solaire ont été réalisées par Buğutekin [63].

Brandon et Plumb [64] ont mise au point un modèle numérique pour prédire les performances d'une CCS utilisant un lit de galet comme milieu de stockage. Les résultats de la simulation ont montré que la vitesse d'écoulement nocturne peut atteindre 40% de la vitesse maximale de la journée. Cependant l'énergie délivrée par cette CCS est largement inférieure à celle délivrée par une CCS conventionnelle.

Yongcai Li et Shuli Liu [65] ont expérimenté les performances d'une CCS en utilisant les PCM comme milieux de stockage thermique. Les résultats expérimentaux ont montré que la période de fonctionnement de la centrale pouvait être prolongée d'une manière significative.

III.4 Etude expérimentale sur les centrales a cheminée solaire :

Depuis la construction du premier prototype de CCS à Manzanares (Espagne), plusieurs modèles expérimentaux ont été successivement conçus, construits et testés. Les structures diffèrent d'une installation à une autre

Le premier prototype de centrale à cheminée solaire est celui de Manzanares. Il était doté d'une cheminée métallique de 194,6 m de hauteur et de 0,00125 m d'épaisseur et d'un collecteur de rayon de 122 m couvert d'une toiture en PVC. Sa puissance maximale était de 50 kW [10].

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 [10].

En 1983, Krisst [66] 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.

En 1997, un dispositif de centrale à cheminée solaire a été mis en place par Pasurmarthi et Sherif [67] 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 constatée 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.

En 1985, Kulunk [68] a réussi à produire 0.14W d'électricité à partir d'un système à échelle réduit, une tour de 2 m et un collecteur de 9 m², à Izmit en Turquie.

En 2002, une installation pilote d'une CCS composée d'un collecteur d'air de 10 m de diamètre et d'une tour de 8 m de hauteur a été construite à Wuhan en Chine [69], puis elle a été modifiée à plusieurs reprises. La toute dernière structure est composée d'un collecteur de verre de 4.8 millimètres d'épaisseur et d'une tour en PVC.

Le ministère de la science et la technologie de Botswana a conçu et réalisé une installation, pour la recherche, une centrale CCS [70]. La tour, de 22 m de hauteur et 2 m de diamètre, était fabriquée de polyester renforcé par le verre, soutenu par une structure en acier, le toit du collecteur, de 160 m² de diamètre et de 5 mm d'épaisseur, a été fabriqué par du verre clair.

Une CCS d'une tour de 11 m de hauteur et d'un collecteur d'un mètre de diamètre a été construite dans le campus universitaire de l'Universida de Federal de Minas Gerais, à Belo Horizonte, Brazil. Sa tour est un ensemble de 05 modules en bois de forme cylindrique de 2.2 m de hauteur chacun, couverts intérieurement et extérieurement de fibres de verre. Son collecteur de 25 m de diamètre et de 0.5 m fabriqué en utilisant un film de plastique soutenue par une structure tubulaire en acier [71].

Une autre installation pilote d'une CCS de 15 m de hauteur et d'un collecteur de 16 m de diamètre a été également montée dans le campus de l'université de Suleyman Demirel, à Isparta en Turquie [72].

Un petit prototype faisant la combinaison d'un bassin solaire d'approximativement 4.2 m de diamètre et de 1.85 m de profondeur et d'une CCS d'une tour de 8 m de hauteur et de 0.35 m de diamètre a été construit par Golder [73] dans le campus de l'université de RMIT, à Bundoora en Australie en 2002.

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 plusieurs chercheurs [25]. Bernardes [60] a présenté une étude économique de CCS de différentes capacités de production d'énergie, avec un collecteur fait du plastique des CCS. Il a estimé le coût d'une CCS de 100 MW.

Weibing Li et al. [74] 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 d'électricité dans chaque phase en divisant toute la période de service en quatre phases. Les résultats obtenus par les auteurs 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 est plus 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.

Siva et al. [75] 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 et construite en Chine. En se basant sur ce modèle et certaines hypothèses pour les valeurs des différents paramètres, les auteurs ont présenté un travail où ils ont calculé la valeur totale net (VPTN) et le prix minimum d'électricité en divisant la période totale de fonctionnement en quatre périodes. Les résultats obtenus ont montré que le prix minimum d'électricité dans la première période est plus élevé que le prix actuel, mais que dans les trois autres périodes est beaucoup moins cher que le prix actuel d'électricité.

Xinping Zhou et al. [76] ont présenté une analyse économique durant une période totale de service d'une centrale de 100 MW. Ils ont relevé que le coût est influencé par plusieurs facteurs y compris les investissements, le coût d'opération et de maintenance, la durée de vie de la centrale, le délai de récupération, le taux d'inflation, le taux minimum du revenue, le prix de vente d'électricité etc...

Papageorgious [77] a estimé le coût des différentes composantes d'une CCS de 100 MW de puissance en excluant certaines dépenses additionnels alors que Zhou and Yang [78] ont estimé le coût d'électricité d'une CCS supposée être installée au désert des hautes montagnes du nord-ouest de la Chine en excluant certaines dépenses.

Chapitre IV
Modélisation mathématique des
transferts thermiques dans les
cheminées solaires

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

IV.1. Introduction :

Le présent chapitre est relatif à la modélisation mathématique des phénomènes de transferts ayant lieu dans les centrales à cheminée solaire. Trois modèles mathématiques seront décrits et utilisés par la suite pour le calcul des performances énergétiques d'une centrale à cheminée solaire implanté dans la région d'Adrar. Le premier ne prend pas en considération le stockage thermique dans le calcul des performances énergétiques, tandis que les deux autres prennent en considération le stockage thermique. 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 communes à l'ensemble des modèles mathématiques. Ces hypothèses sont :

- Le régime d'écoulement 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 un 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 négligeables.

IV.2. Equations de bilans énergétiques relatives aux centrales à cheminées solaires sans stockage thermique : (Modèle de Schlaich [6])

Nous nous sommes 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 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 thermo-physiques 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 :

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

Où :

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

η_C : est le 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} : est le 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 ($\frac{W}{m^2}$) 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 :

$$\dot{m} = \rho_{coll} * V_C * A_C \quad (4.4)$$

et

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

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

A_C : Section de passage.

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

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

▪ **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 :

$$P_{tot} = \Delta p_{tot} * V_{C,max} * A_C \quad (4.10)$$

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 diminuée 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 :

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

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 :

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

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

$$V_c = \sqrt{\frac{2}{\rho_c} \left(- \int_0^{H_c} dp - \int_0^{H_c} (\rho_c - \rho_e) * g * dz \right)} \quad (4.13)$$

Avec :

- g : Accélération due à la gravité ;
 H_c : Hauteur de la cheminée ;
 ρ_e : Masse volumique de l'air dans l'environnement extérieur ;
 ρ_c : 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 :

$$V_{C,max} = \sqrt{-\frac{2}{\rho_c} \left(\int_0^{H_c} (\rho_c - \rho_e) * g * dz \right)} \quad (4.14)$$

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 :

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

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 :

$$\eta_c = \frac{g * H_c}{C_p * T_0} \quad (4.16)$$

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 :

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

▪ **Puissance théorique :**

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

$$P_{Wt} = V_C * A_C * \Delta P_s \quad (4.18)$$

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

$$W = I * E \equiv Q_V = A_C * V_C$$

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 :

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

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 :

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

et

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

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 maximal:

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

IV.3. Equations de bilans énergétiques relatives aux centrales cheminées solaires avec stockage thermique : (Modèle de Hammadi [7])

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 :

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

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

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

Avec :

$$T_a = \frac{(T_{a,o} + T_{a,i})}{2} \quad (4.30)$$

La figure 4.1 montre le modèle physique d'une CCS avec stockage thermique.

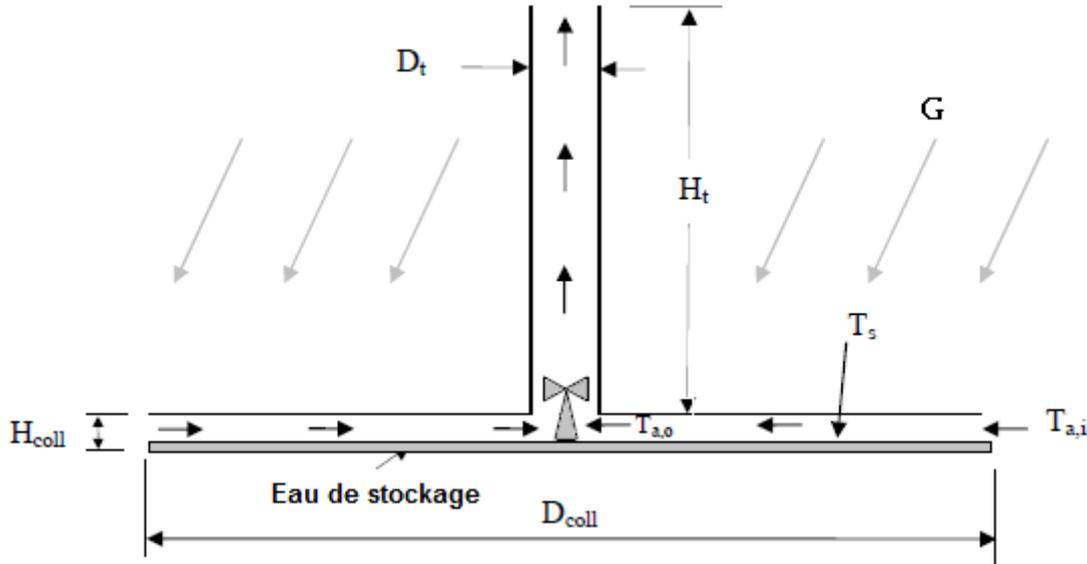


Figure 4.1: Modèle physique d'une CCS avec stockage thermique.

Le coefficient de transfert thermique à l'intérieur du collecteur est donné par une corrélation fournie par Gnielinski [79] 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 :

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

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 comment 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 :

$$h_\infty = 5.7 + 3.8 u_{wind} \quad (4.37)$$

La vitesse de l'air chaud à la sortie du collecteur (entrée de la tour) est estimé 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 donné 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 :

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

IV.3.1. 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 (4.30) et (4.28) dans (4.27):

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

2. On injecte l'équation (4.30) dans (4.29) pour obtenir :

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

3. De la relation (4.43), on déduit l'expression de $T_{a,o}$:

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

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

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

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 :

Variables

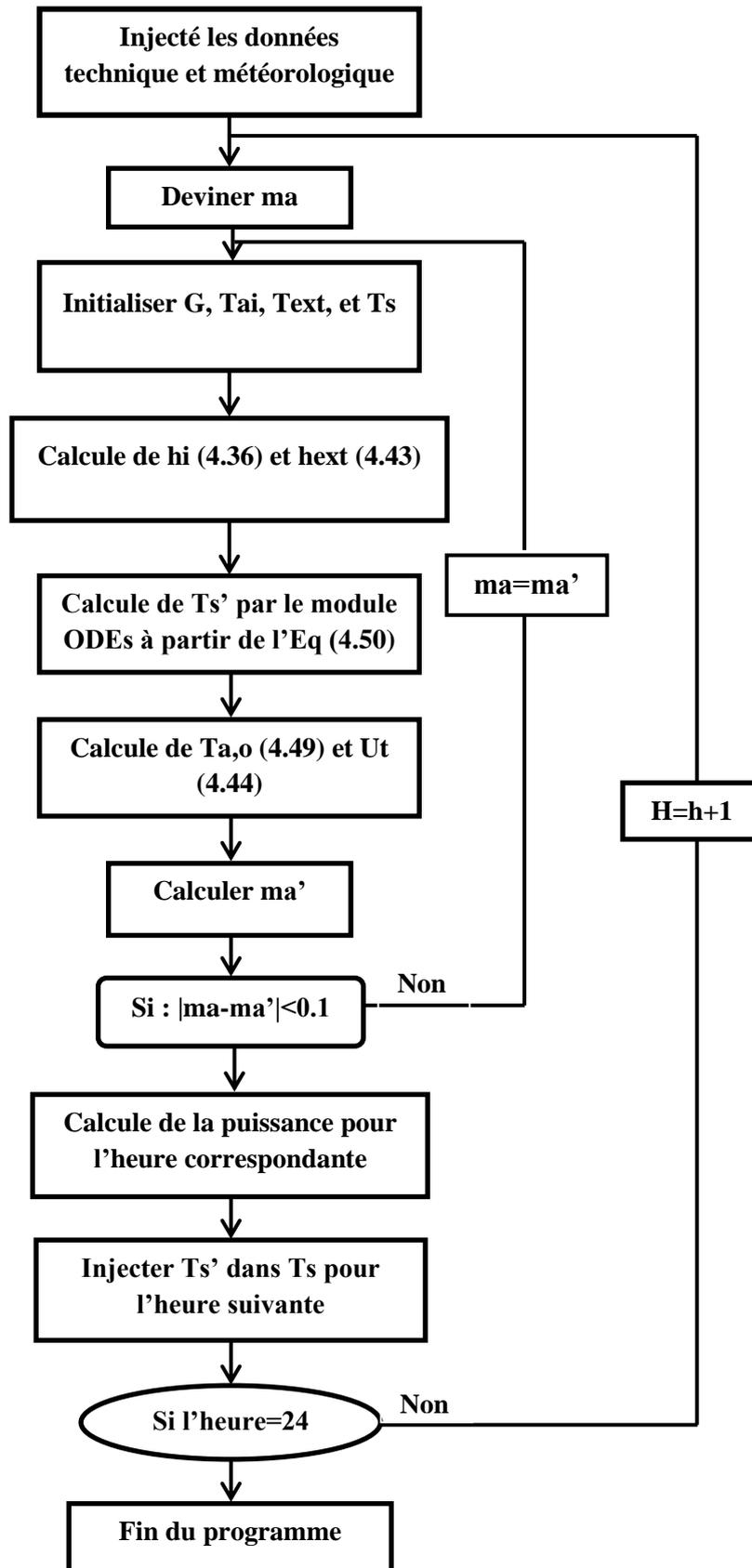
- 1- j entier
- 2- Ma, Ts', hint, hext, Tao, Ut, Ma', Pe réels

Début

- 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<i<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 (4.36)
- 11- Affecter à hext : l'équation (4.43)
- 12- Affecter à Ts' : ODEs [l'équation (4.50)]
- 13- Affecter à Tao : l'équation (4.49)
- 14- Affecter à Ut : l'équation (4.44)
- 15- Affecter à Ma' : l'équation (4.40)
- 16- Tant que (Ma - Ma')>0.1 %fin do...while
- 17- Affecter à Pe : l'équation (4.47)
- 18- Affecter à Ts : Ts' %pour l'heure suivant
- 19- Affecter à i: i+1 %passage à l'heure suivant
- 20- dessiner le graphique

Fin du programme

L'organigramme de la procédure de résolution est :



IV.4. Modèle mathématique relatives aux centrales cheminées solaires avec stockage thermique (Modèle de Bernardes [8]) :

IV.4.1. Le collecteur :

Application de l'équation de mouvement à travers une section du collecteur :

$$\frac{\partial(mu)}{\partial t} = -\dot{m}u_2 + \dot{m}u_1 + p_1A_1 - p_2A_2 - 2\pi r r_c \tau \quad (4.46)$$

τ : est la contrainte de cisaillement agissant sur l'air en contact avec la surface du collecteur.

Deux types de configurations du collecteur peuvent être utilisés :

- Type (1) : un toit avec une seule couche de verre et un flux unique entre le verre en haut et le sol en bas ;
- Type (2) : un toit avec une double couche de verre et un flux unique.

Le bilan thermique :

Les deux types peuvent être fournis avec stockage thermique en utilisant l'eau comme milieu de stockage lorsque le flux d'air circule sur le sol.

Pour le type II, les équations sont obtenues à partir du réseau thermique

$$T_1: S_1 + h_{r21}(T_2 - T_1) + h_1(T_{f1} - T_1) = h_w(T_1 - T_\infty) + h_{rs}(T_1 - T_s) \quad (4.47)$$

$$T_{f1}: h_1(T_1 - T_{f1}) = h_2(T_{f1} - T_2) \quad (4.48)$$

$$T_2: S_2 + h_2(T_{f1} - T_2) = h_3(T_2 - T_{f2}) + h_{r32}(T_2 - T_3) + h_{r21}(T_2 - T_1) \quad (4.49)$$

$$T_{f2}: h_3(T_2 - T_{f2}) = h_4(T_{f2} - T_3) + q \quad (4.50)$$

$$T_3: S_3 = h_4(T_3 - T_{f2}) + h_{r32}(T_3 - T_2) + h_5(T_3 - T_{f3}) + h_{r43}(T_4 - T_3) \quad (4.51)$$

$$T_{f3}: h_5(T_3 - T_{f3}) = h_6(T_{f3} - T_4) \quad (4.52)$$

$$T_4: S_4 = h_6(T_4 - T_{f3}) + h_{r43}(T_4 - T_3) + h_7(T_4 - T_{f4}) + U_w(T_4 - T_{4.o}) \quad (4.53)$$

$$T_{f4}: h_7(T_4 - T_{f4}) = h_8(T_{f4} - T_5) \quad (4.54)$$

$$T_5: h_8(T_{f4} - T_5) = U_b(T_5 - T_{5.o}) \quad (4.55)$$

Avec :

$$T_f = \frac{(T_{f,i} - T_{f,o})}{2} \quad (4.56)$$

$$q = \Gamma(T_f - T_{f,i}) \quad (4.57)$$

$$\Gamma = \dot{m}c_p / \pi r L \quad (4.58)$$

h_1 : Le coefficient de transfert de chaleur par convection du 2^{ème} couvercle.

h_2 : Le coefficient de transfert de chaleur par convection du 1^{ère} couvercle.

h_3 : Le coefficient de transfert de chaleur par convection du 1^{ère} couvercle au courant d'air.

h_4 : Le coefficient de transfert de chaleur par convection du film plastique transparent à l'air.

h_5 : Le coefficient de transfert de chaleur par convection du film plastique transparent à l'eau

h_6 : Le coefficient de transfert de chaleur par convection de l'absorbeur à l'eau.

h_7 : Le coefficient de transfert de chaleur par convection de l'absorbeur à l'air.

h_8 : Le coefficient de transfert de chaleur par convection de la surface du sol à l'air.

h_{r21} : Le coefficient de transfert de chaleur par rayonnement entre le 2^{ème} couvercle et le 1^{er} couvercle.

h_{r32} : Le coefficient de transfert de chaleur par rayonnement entre le 1^{er} couvercle et le film plastique transparent.

h_{r32} : Le coefficient de transfert de chaleur par rayonnement entre le film plastique transparent et l'absorbeur.

T_1 : Températures à la seconde couverture

T_2 : Températures première couverture

T_3 : Température du film en plastique transparent,

T_4 : Température de l'absorbeur,

T_5 : Température à la surface du sol,

T_b : Température du sol.

T_{f1} : Températures de l'air entre le second couvercle et le premier couvercle

T_{f2} : Températures moyenne de l'air

T_{f3} : Température de l'eau de stockage

T_{f4} : Température entre l'absorbeur et la surface du sol.

La figure 4.2 montre le bilan énergétique du système stockage thermique.

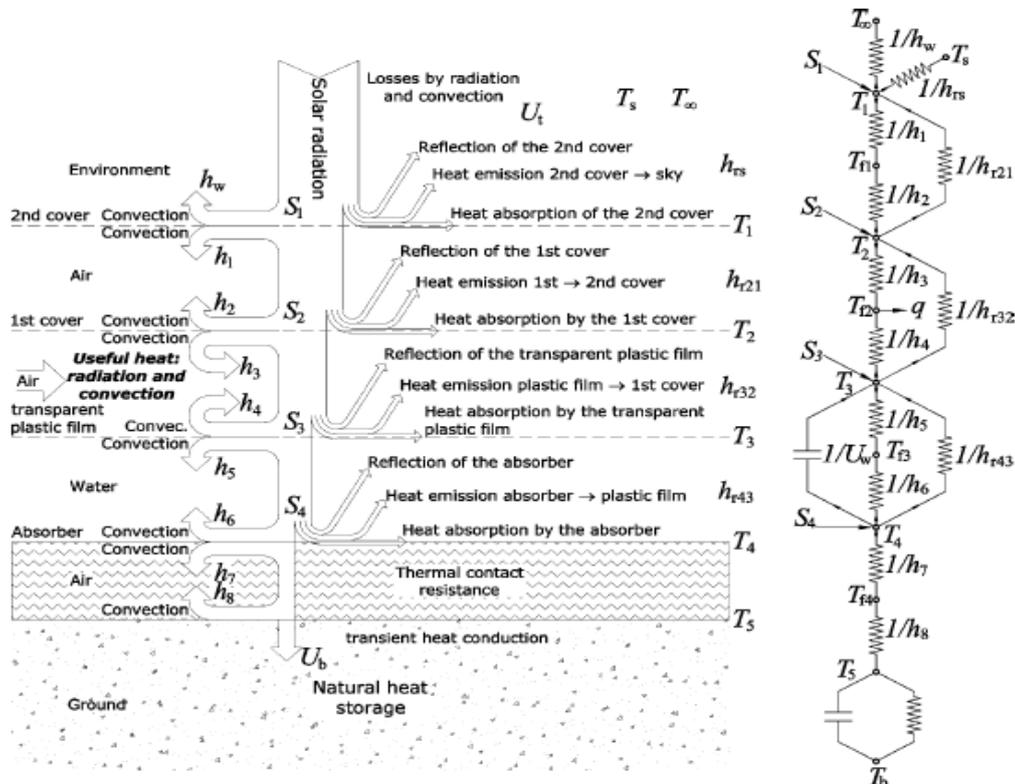


Figure 4.2 : Bilan énergétique du système stockage thermique [8].

En substituant l'équation (4.56) dans (4.53) et on réarrangeant on obtient :

- La matrice 9x9 donnée par l'équation (4.59) pour la 2^{ème} configuration de collecteur avec stockage thermique par eau ;
- La matrice 7x7 donnée par l'équation (4.60) pour la 2^{ème} configuration de collecteur sans stockage thermique ;
- La matrice 7x7 donnée par l'équation (4.61) pour la 1^{ère} configuration de collecteur avec stockage thermique par eau ;
- La matrice 5x5 donnée par l'équation (4.67) pour la 1^{ère} configuration de collecteur sans stockage thermique.

$$\begin{pmatrix}
 \begin{pmatrix} h_1 \\ +h_{r21} \\ +U_t \end{pmatrix} & -h_1 & -h_{r21} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 h_1 & -\begin{pmatrix} h_1 \\ +h_2 \end{pmatrix} & h_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 -h_{r21} & -h_2 & \begin{pmatrix} h_2 \\ +h_3 \\ +h_{r21} \\ +h_{r32} \end{pmatrix} & -h_3 & -h_{r32} & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & h_3 & \begin{pmatrix} h_3 \\ h_4 \\ \Gamma \end{pmatrix} & h_4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & -hr_{32} & -h_4 & \begin{pmatrix} h_4 \\ h_{r32} \\ h_{r43} \\ h_5 \end{pmatrix} & -h_5 & -h_{r43} & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & h_5 & -\begin{pmatrix} h_5 \\ h_6 \end{pmatrix} & h_6 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & -h_{r43} & -h_6 & \begin{pmatrix} h_6 \\ +h_{r43} \\ +h_7 \\ +U_w \end{pmatrix} & h_7 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & h_7 & -\begin{pmatrix} h_7 \\ +h_8 \end{pmatrix} & h_8 \\
 & & & & & & 0 & -h_8 & \begin{pmatrix} h_8 \\ +U_b \end{pmatrix}
 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} T_1 \\ T_{f1} \\ T_2 \\ T_{f2} \\ T_3 \\ T_{f3} \\ T_4 \\ T_{f4} \\ T_5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s_1 + h_w T_\infty + h_{rs} T_s \\ 0 \\ S_2 \\ -\Gamma T_{f2,i} \\ S_3 \\ 0 \\ S_4 + U_w T_{4,o} \\ 0 \\ U_b T_{5,o} \end{pmatrix} \quad (4.59)$$

$$\begin{pmatrix}
 \begin{pmatrix} h_3 \\ h_{r21} \\ U_t \end{pmatrix} & -h_3 & -h_{r32} & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 h_3 & -\begin{pmatrix} h_3 \\ h_4 \\ \Gamma \end{pmatrix} & h_4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 -h_{r32} & -h_4 & \begin{pmatrix} +h_4 \\ +h_{r32} \\ +h_{r43} \\ +h_5 \end{pmatrix} & -h_5 & -h_{r43} & 0 & 0 \\
 0 & 0 & h_5 & -\begin{pmatrix} h_5 \\ h_6 \end{pmatrix} & h_6 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & -h_{r43} & -h_6 & \begin{pmatrix} h_6 \\ h_{r43} \\ h_7 \\ U_w \end{pmatrix} & -h_7 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & h_7 & -\begin{pmatrix} h_7 \\ h_8 \end{pmatrix} & h_8 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & +h_8 & -\begin{pmatrix} h_8 \\ U_b \end{pmatrix}
 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} T_2 \\ T_{f2} \\ T_3 \\ T_{f3} \\ T_4 \\ T_{f4} \\ T_5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_2 + h_w T_\infty + h_{rs} T_s \\ -\Gamma T_{f2,i} \\ S_3 \\ 0 \\ S_4 + U_w T_{4,o} \\ 0 \\ U_b T_{5,o} \end{pmatrix} \quad (4.60)$$

$$\left(\begin{array}{cccccccc} \left(\begin{array}{c} h_1 \\ h_{r,21} \\ U_t \end{array} \right) & -h_1 & -h_{r,21} & & & & & \\ h_1 & \left(\begin{array}{c} h_1 \\ h_2 \end{array} \right) & h_2 & & & & & \\ -h_{r,21} & -h_2 & \left(\begin{array}{c} h_2 \\ h_3 \\ h_{r,21} \\ h_{r,23} \end{array} \right) & -h_3 & -h_{r,32} & 0 & 0 & \\ & h_3 & -\left(\begin{array}{c} h_3 \\ h_4 \\ \Gamma \end{array} \right) & h_4 & 0 & 0 & & \\ & -h_{r,32} & -h_4 & \left(\begin{array}{c} h_4 \\ h_{r,32} \\ h_7 \end{array} \right) & -h_7 & 0 & & \\ & & & h_7 & -\left(\begin{array}{c} h_7 \\ h_8 \end{array} \right) & h_8 & & \\ & & & & -h_8 & \left(\begin{array}{c} h_8 \\ U_b \end{array} \right) & & \end{array} \right) \cdot \begin{pmatrix} T_1 \\ T_{f1} \\ T_2 \\ T_{f2} \\ T_4 \\ T_{f4} \\ T_5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_1 + h_w T_\infty + h_{rs} T_s \\ 0 \\ S_2 \\ -\Gamma T_{f2,i} \\ S_3 \\ 0 \\ U_b T_{5,o} \end{pmatrix} \quad (4.61)$$

$$\left(\begin{array}{cccccccc} (h_3 + h_{r,32} + U_t) & -h_3 & -h_{r,32} & 0 & 0 & & & \\ h_3 & -(h_3 + h_4 + \Gamma) & h_4 & 0 & 0 & & & \\ -h_{r,32} & -h_4 & (h_4 + h_{r,32} + h_7) & -h_7 & 0 & & & \\ 0 & 0 & h_7 & -(h_7 + h_8) & h_8 & & & \\ 0 & 0 & 0 & -h_8 & (h_8 + U_b) & & & \end{array} \right) \cdot \begin{pmatrix} T_2 \\ T_{f2} \\ T_4 \\ T_{f4} \\ T_5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_2 + h_w T_\infty + h_{rs} T_s \\ -\Gamma T_{f2,i} \\ S_3 \\ 0 \\ U_b T_{5,o} \end{pmatrix} \quad (4.62)$$

➤ **Coefficients de transfert de chaleur :**

Les coefficients de transferts intervenant dans les matrices et relatifs aux relations (4.59), (4.60), (4.61) et (4.62) sont donnés par les expressions :

$$U_t = (h_w + h_{rs}) \quad (4.63)$$

Avec :

$$h_w = \frac{k}{L} Nu \quad (4.64)$$

$$\text{et } h_{rs} = \frac{\sigma \varepsilon (T_1 + T_s)(T_1^2 + T_s^2)(T_1 + T_s)}{(T_1 - T_\infty)} \quad (4.65)$$

La température du ciel, T_s , est obtenue par la corrélation de Berdahl et Martin [80] :

$$T_s = T_\infty \left[0.711 + 0.0056(T_{dp} - 273.15) + 0.000073(T_{dp} - 273.15)^2 + 0.013 \cos(15t) \right]^{1/4} \quad (4.66)$$

Où : t, est le temps en heures.

Le coefficient de transfert de chaleur du sol est donné par la relation suivante :

$$U_b = \frac{2b}{\sqrt{\pi t}} \quad (4.67)$$

$$\text{Avec : } b = \sqrt{k \rho c_p} \quad (4.68)$$

Les coefficients de transfert de chaleur par rayonnement entre deux de plaques parallèles 1-2, 2-3 et 3-4 sont donnés par les relations suivantes :

$$h_{r21} = \frac{\sigma(T_1^2 + T_3^2)(T_2 + T_3)}{\left(\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1\right)} \quad (4.69)$$

$$h_{r32} = \frac{\sigma(T_2^2 + T_3^2)(T_2 + T_3)}{\left(\frac{1}{\varepsilon_2} + \frac{1}{\varepsilon_3} - 1\right)} \quad (4.70)$$

$$h_{r43} = \frac{\sigma(T_3^2 + T_4^2)(T_3 + T_4)}{\left(\frac{1}{\varepsilon_3} + \frac{1}{\varepsilon_4} - 1\right)} \quad (4.73)$$

Les flux du rayonnement solaire absorbés par les différentes couches du collecteur sont:

$$S_1 = \alpha H \quad (4.74)$$

$$S_2 = \tau_1 \alpha_3 H \quad (4.75)$$

$$S_3 = \tau_2 \alpha_3 H \quad (4.76)$$

$$S_4 = \tau_3 \alpha_3 H \quad (4.77)$$

Où :

S_1, S_2, S_3, S_4 , sont les radiations solaires absorbées par le second couvert, le 1^{er} couvercle, par le film plastique transparent, et l'absorbeur respectivement

Les coefficients de transmittivité et d'absorptivité sont donnés par les relations suivantes :

$$\tau \cong \tau_a \cdot \tau_r \quad (4.78)$$

$$\alpha \cong 1 - \tau_a \quad (4.79)$$

Les équations (4.78) et (4.79) peuvent être utilisées pour un système à double couvercle si les couvercles sont identiques (Duffie et Beckman, [81])

Afin de résoudre le problème de transfert de chaleur non stationnaire dans le système de stockage d'eau, nous considérons le cas d'une dalle plane infiniment large avec une température limite prescrite. La répartition de la température et de la densité de flux de chaleur sont déterminées analytiquement. Le coefficient de transfert de chaleur système de stockage d'eau peut être calculé par la relation suivante :

$$U_w = \frac{q_{01}}{\Delta\vartheta} = \frac{1}{t} \sum_{k=0}^{\infty} \left[\frac{2L_w \cdot \sin(\delta_k)^2}{\alpha \cdot \delta_k [\delta_k + \sin(\delta_k) \cos(\delta_k)]} e^{(-\delta_k^2 \alpha t \frac{1}{L_w^2})} \right] \quad (4.80)$$

Avec : $\delta_1 = \frac{\pi}{2}, \delta_2 = \frac{3\pi}{2}, \delta_3 = \frac{5\pi}{2}, \delta_k = (k - \frac{1}{2})\pi$

Le tableau 1 présente les corrélations utilisées sous la forme de nombres de Nusselt pour le calcul des coefficients d'échanges convectifs : convection forcée pour (h_1-h_8) et naturelle pour (h_w). Les indices m.lam, m.turb et x représente la moyenne laminaire, la moyenne turbulente, et le local. Le tableau 2 donne les corrélations pour le calcul du coefficient de frottement dans le collecteur.

Tableau 1. Corrélations donnant le nombre de Nusselt pour le cas d'une plaque plane [8].

Equations	Flow regime/source
<i>Forced convection</i>	
$Nu_m = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \sqrt{Re_x} \frac{Pr}{(1 + 1.7 Pr^{1/4} + 21.36 Pr)^{1/6}}$ (36)	Laminar, $Re < 5 \times 10^5$, Baehr and Stephan (1996)
$Nu_{m,lam} = 2Nu_x$	
$Nu_m = \frac{0.037Re^{0.8} Pr}{1 + 2.443Re^{-0.1}(Pr^{2/3} - 1)}$ (37)	$5 \times 10^5 < Re < 10^7$ $0.6 < Pr < 2000$ Petukhov and Popov (1963)
$Nu_m = \sqrt{Nu_{m,lam}^2 + Nu_{m,tur}^2}$ (38)	Schlichting et al. (1999)
<i>Free convection</i>	
$Nu_m = 0.54Ra^{1/4}$ (39)	$10^4 \leq Ra < 10^7$, upper or lower heated horizontal surface, Churchill and Chu (1975)
$Nu_m = 0.14Ra^{1/3}$ (40)	$10^7 \leq Ra \leq 10^{11}$, upper or lower heated horizontal surface, Churchill and Chu (1975)

Tableau 2. Corrélations donnant le coefficient de frottement dans le collecteur [8].

Equations	Flow regime/Source
$\frac{c_w}{2} = \frac{0.664}{\sqrt{Re_L}}$	Laminar, smooth Baehr and Stephan (1996)
$\frac{c_w}{2} = \frac{0.0592}{Re_L^{1/5}}$	Turbulent, smooth, $10^5 \leq Re_L \leq 10^7$, Baehr and Stephan (1996)
$c_w = \frac{0.072}{Re_L^{1/5}} - \frac{1700}{Re_L}$	Transition, smooth, Schlichting et al. (1999)
$c_w = \left[1.89 - 1.62 \log \left(\frac{k_r}{L} \right) \right]^{-2.5}$	Turbulent, rough, $10^{-6} < k_r/L < 10^{-2}$, Schlichting et al. (1999)

IV.4.2. La cheminée :

Le bilan de quantité de mouvement dans la cheminée est donné par l'expression :

$$\frac{d\rho w^2}{dz} = \frac{d\rho}{dz} - (\rho - \rho_0)g \quad (4.81)$$

Ainsi, la vitesse d'écoulement dans la cheminée peut être exprimée par :

$$w = \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot \left[\int_0^H k (\rho_0 - \rho) g dz - \Delta p_{frottement} \right]} \quad (4.82)$$

La pression, la température et la variation de densité de l'air, à l'extérieur de la cheminée, sont calculées en considérant les conditions atmosphériques standards :

$$T_\infty(Z) = T_\infty(0) \left(1 - \frac{k-1}{k} \cdot \frac{Z}{H_0} \right) \quad (4.83)$$

$$P_\infty(Z) = P_\infty(0) \left(1 - \frac{k-1}{k} \cdot \frac{Z}{H_0} \right)^{\frac{k}{k-1}} \quad (4.84)$$

$$\rho_\infty(Z) = \rho_\infty(0) \left(1 - \frac{k-1}{k} \cdot \frac{Z}{H_0} \right)^{\frac{1}{k-1}} \quad (4.85)$$

Avec :

$$H_0 = \frac{R_1 T_{\infty}(0)}{g} \quad (4.86)$$

et $k = 1.235$ (Atmosphère standard)

La pression, la température et la variation de densité de l'air, à l'intérieure de la cheminée, sont calculée en considérant un processus d'expansion adiabatique, Ainsi :

$$T_t(Z) = T_{t,int}(0) \left(1 - \frac{k-1}{k} \cdot \frac{Z}{H_0}\right) \quad (4.87)$$

$$P_t(Z) = P_t(0) \left(1 - \frac{k-1}{k} \cdot \frac{Z}{H_0}\right)^{\frac{k}{k-1}} \quad (4.88)$$

$$\rho_t(Z) = \rho_t(0) \left(1 - \frac{k-1}{k} \cdot \frac{Z}{H_0}\right)^{\frac{1}{k-1}} \quad (4.89)$$

Avec :

$$H_0 = \frac{R_1 T_{t,int}}{g} \quad (4.90)$$

et $k = 1.4005$

➤ **Les pertes par frottement dans la cheminée :**

Le tableau 3 montre les corrélations utilisées pour le calcul du coefficient de pertes de charge dans la cheminée.

Tableau 3. Corrélations donnant les coefficients de pertes de charge dans la cheminée [8].

Equations	Flow regime/source
$f = \frac{16}{Re}$	Laminar, fully developed $Re \leq 2100$ Baehr and Stephan (1996)
$\frac{1}{\sqrt{f}} = 1.5635 \ln\left(\frac{Re}{7}\right)$	Turbulent, fully developed $4000 < Re < 10^7$ Colebrook (1939)
$\frac{2}{f} = \left\{ \frac{1}{[(8/Re)^{10} + (Re/36500)^{20}]^{1/2}} + \left[2.21 \ln\left(\frac{Re}{7}\right)\right]^{10} \right\}^{1/5}$	Turbulent, rough $10^{-6} < k_r/L < 10^{-2}$ Schlichting et al. (1999)

IV.4.3. Turbine et générateur :

La chute de pression peut être exprimée en fonction de la différence de pression totale :

$$\Delta p_{turb} = \Delta p_{tot} - \frac{1}{2} \rho w^2 \quad (4.91)$$

Avec :

$$\Delta p_{tot} = \int_0^{H_k} (\rho_0 - \rho) g \cdot dz \quad (4.92)$$

$$w = w_{tot} \sqrt{1 - x} \quad (4.93)$$

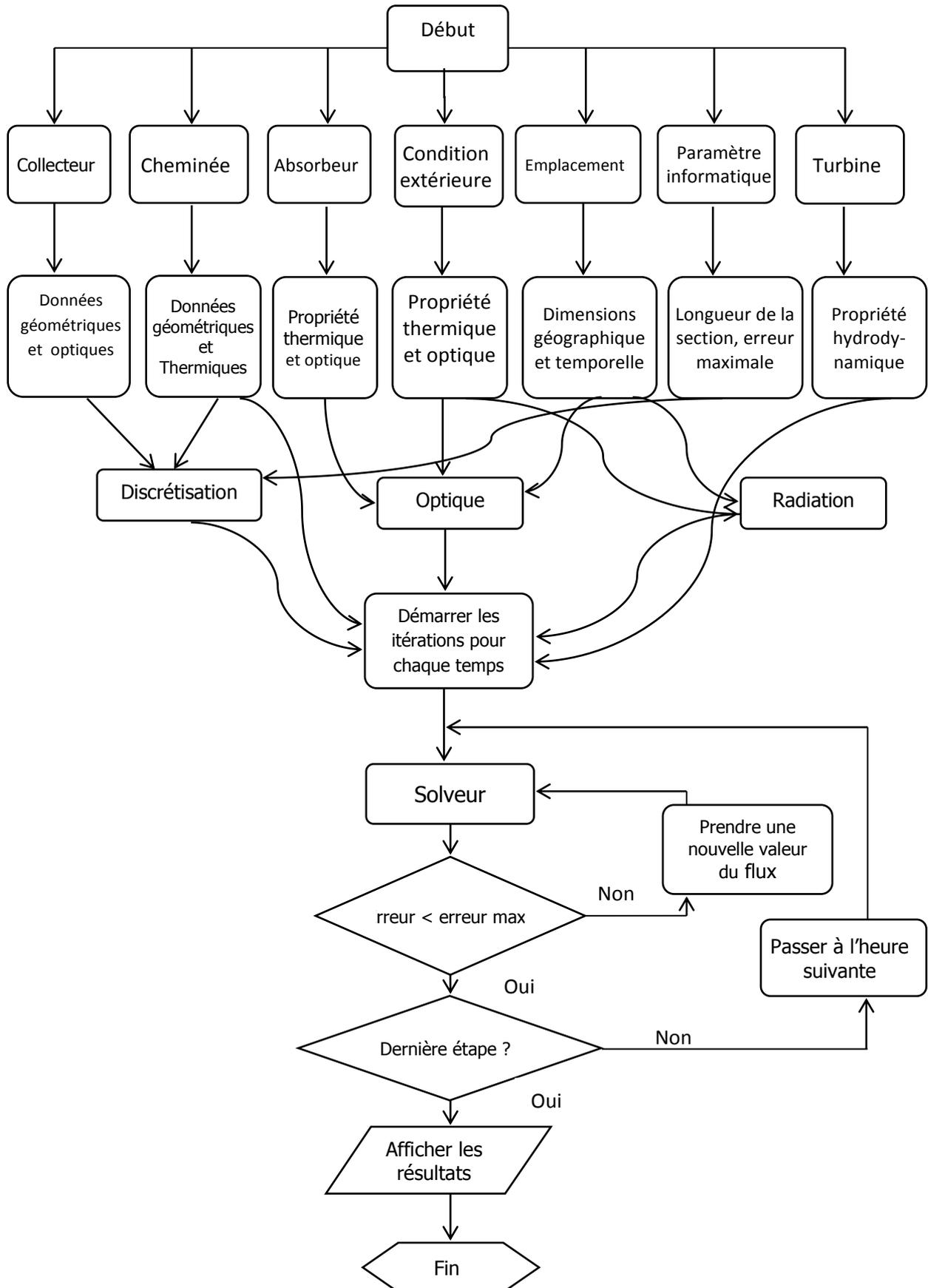
Où : x : est le facteur de chute de pression à travers la turbine ; w_{tot} : la vitesse d'écoulement en négligeant les pertes par frottement ;

La puissance théorique développée par la turbine est donnée par la relation suivante :

$$P = \Delta p_{tot} A w_{tot} \eta_t x \sqrt{1 - x} \quad (4.94)$$

IV.4.4 Développement du modèle mathématique :

➤ L'algorithme de la procédure :



Chapitre V
Résultats et discussions

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 travaux issus de la littérature.

La wilaya d'Adrar est située dans le sud-ouest de l'Algérie. Elle est en superficie la deuxième plus grande wilaya d'Algérie avec 427 368 km². Majoritairement occupée par le Sahara, la wilaya est peu peuplée avec seulement 432 193 habitants (estimation 1er janvier 2011) [3]. La Wilaya a pour principale économie l'agriculture avec notamment son système d'irrigation la « foggara ». Elle dispose notamment d'un important potentiel en énergies renouvelables grâce à une bonne durée d'ensoleillement (9,2 h par jour) et aux caractéristiques physiques du vent (permanence, force 2 à 6 m/s, unidirectionnel...). La wilaya est composée de 11 Daïras, 28 Communes et 299 Ksars (villages) [3].

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 Décembre sont données par les figures V.1 à V.12. 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.

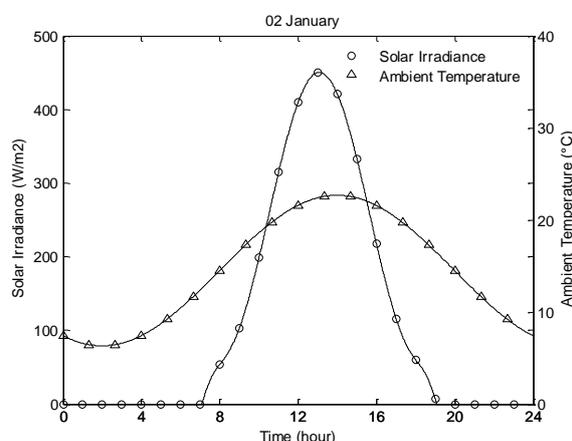


Figure V-1. Données météorologique du site d'Adrar pour le mois de janvier.

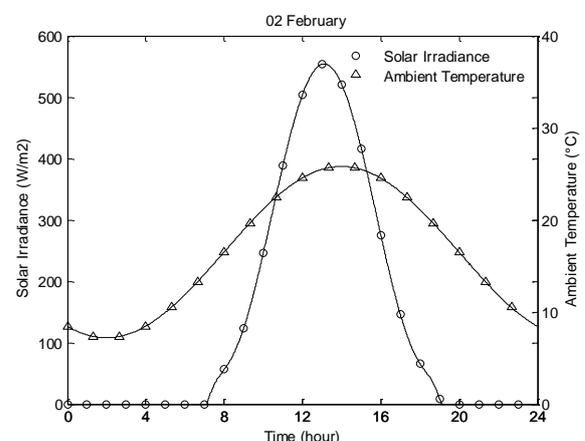


Figure V-2. Données météorologique du site d'Adrar pour le mois de Février.

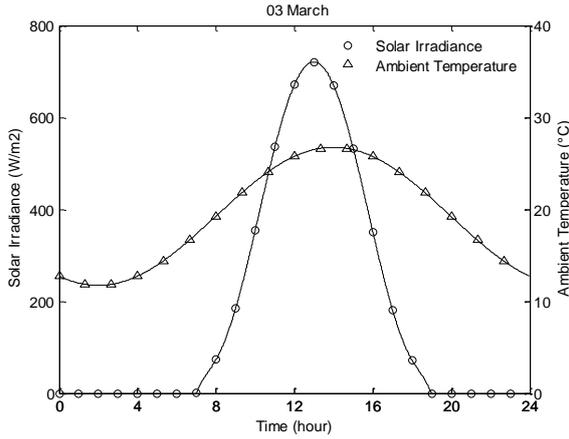


Figure V-3. Données météorologique du site d'Adrar pour le mois de Mars.

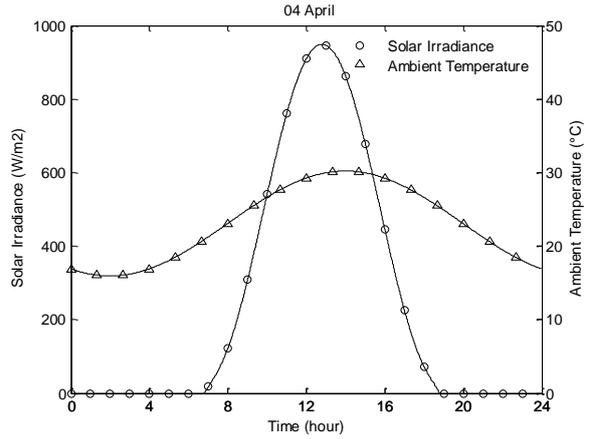


Figure V-4. Données météorologique du site d'Adrar pour le mois d'Avril.

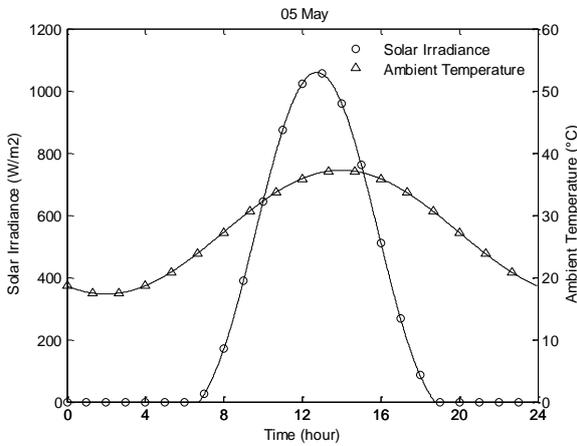


Figure V-5. Données météorologique du site d'Adrar pour le mois de Mai.

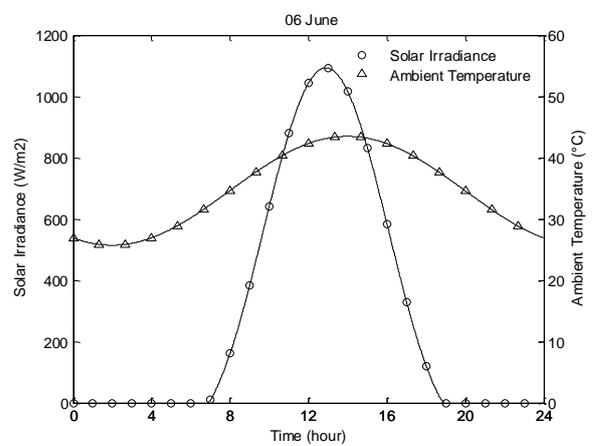


Figure V-6. Données météorologique du site d'Adrar pour le mois de Juin.

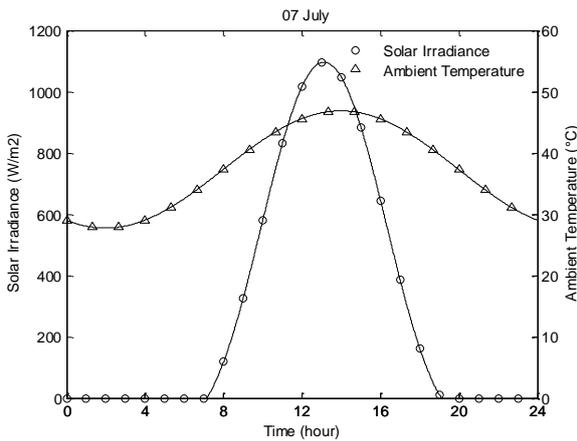


Figure V-7. Données météorologique du site d'Adrar pour le mois de Juillet.

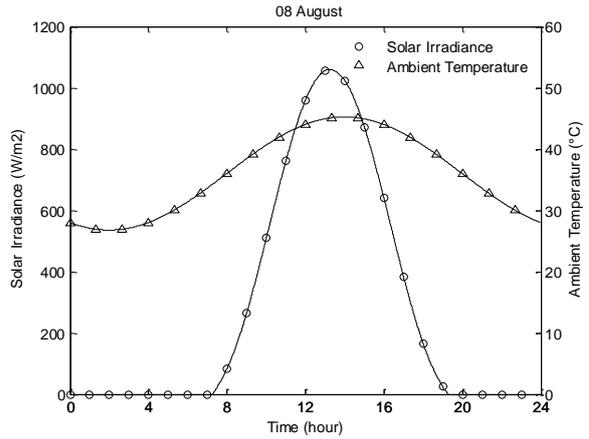


Figure V-8. Données météorologique du site d'Adrar pour le mois d'Aout.

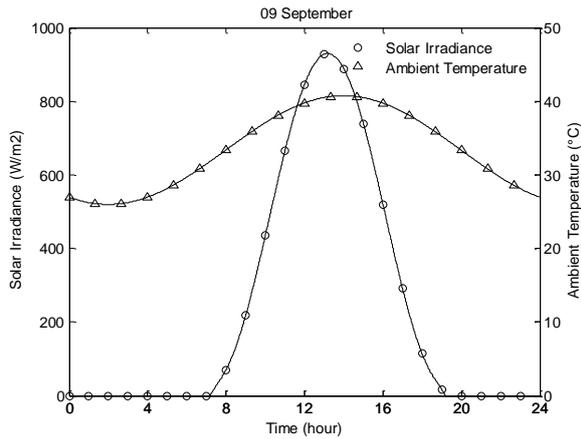


Figure V-9. Données météorologique du site d'Adrar pour le mois de Septembre.

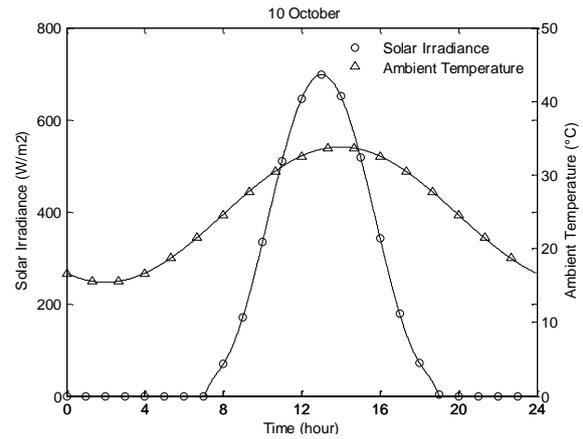


Figure V-10. Données météorologique du site d'Adrar pour le mois D'octobre

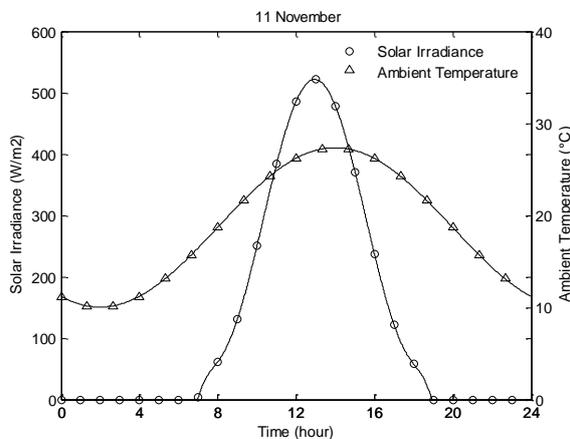


Figure V-11. Données météorologique du site d'Adrar pour le mois de Novembre.

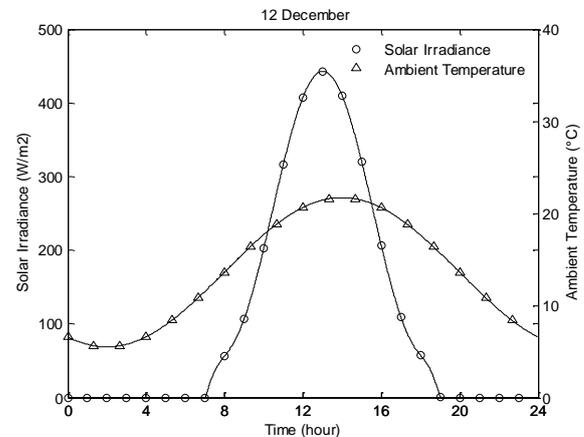


Figure V-12. Données météorologique du site d'Adrar pour le mois de Décembre.

V-3. Analyse des performances énergétique des CCS sans stockage thermique

V-3.1. Application du prototype de Manzanares sur le site d'Adrar :

Cette analyse est basée sur le modèle mathématique de Schlaich [6] 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 de Manzanares:

- Hauteur de la cheminée : 194.6 m ;
- 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 : 6000m ;
- Rendement du collecteur $\eta_{coll} = 0,6$;

- Rendement de la turbine $\eta_t = 0,8$.

Les figures V-13 à V-18 illustrent l'évolution de la puissance de sortie en fonction du temps pour une journée de chaque mois de l'année. On remarque qu'il n'y a pas de production de puissance pendant les heures correspondant au coucher du soleil. Cela est dû au fait que le modèle de Schlich [6] ne prend pas en considération l'effet du stockage thermique par sol.

La puissance de sortie évolue pendant le jour jusqu'à atteindre un pic de production entre 12 et 14 heures. La puissance minimale a été enregistré pendant les mois d'hiver (décembre, janvier, février) où elle ne dépasse pas les 52 kW car c'est les mois où le rayonnement solaire est le plus faible. La puissance de sortie augmente au fur et à mesure que les mois passent jusqu'à atteindre une puissance maximale pendant les mois d'été en particulier le mois de juillet où la puissance électrique atteint son maximum (de l'ordre 97 kW) car c'est le mois où le rayonnement solaire est maximal. Après avoir atteint le pic de la production, la puissance de sortie commence à diminuer jusqu'à atteindre une puissance minimale lors du mois de décembre (de l'ordre de 40 kW).

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.

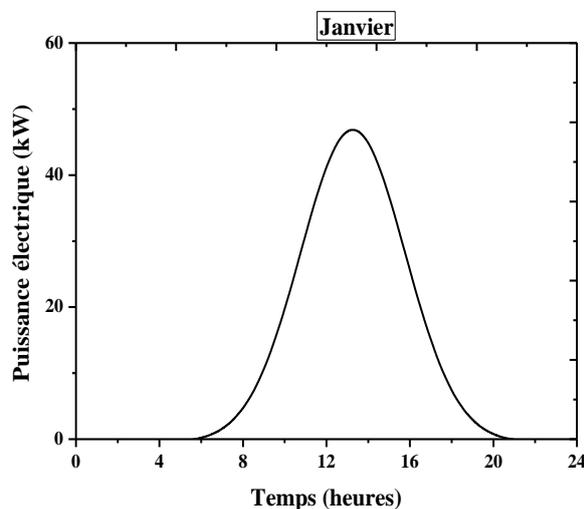


Figure V-13 Variation de la puissance en fonction du temps pour le mois de Janvier

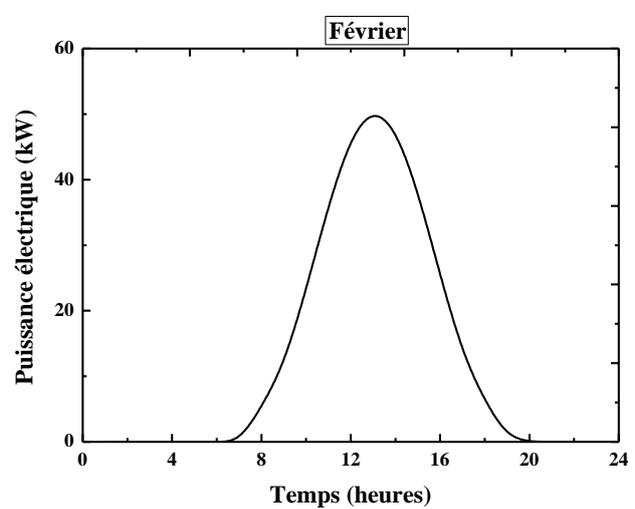


Figure V-14 Variation de la puissance en fonction du temps pour le mois de Février

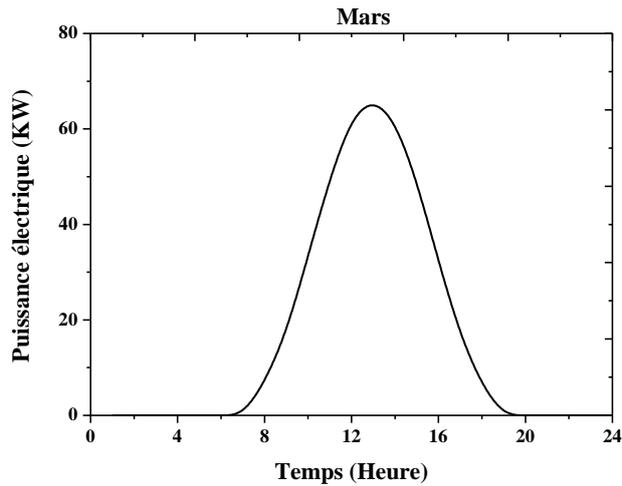


Figure V-14 Variation de la puissance en fonction du temps pour le mois de Mars

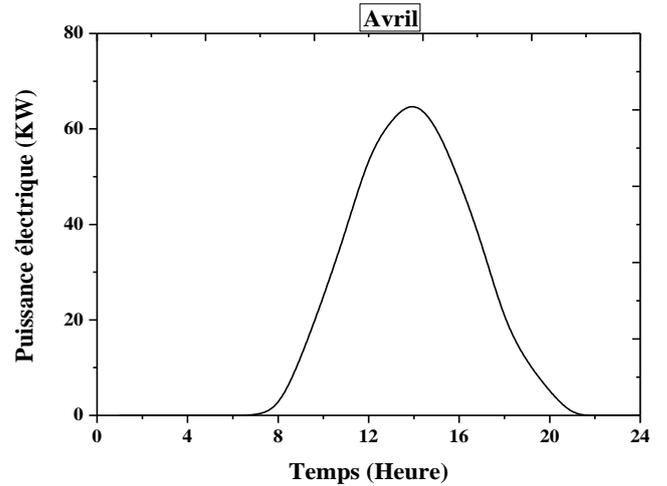


Figure V-15 Variation de la puissance en fonction du temps pour le mois d'Avril

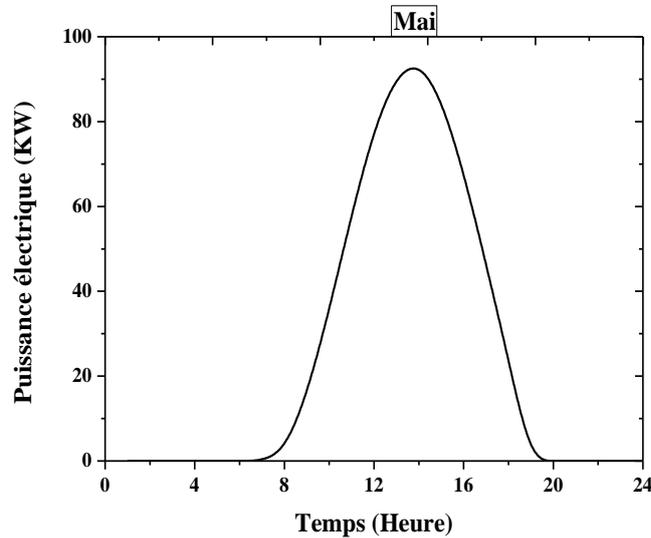


Figure V-16 Variation de la puissance en fonction du temps pour le mois de Mai

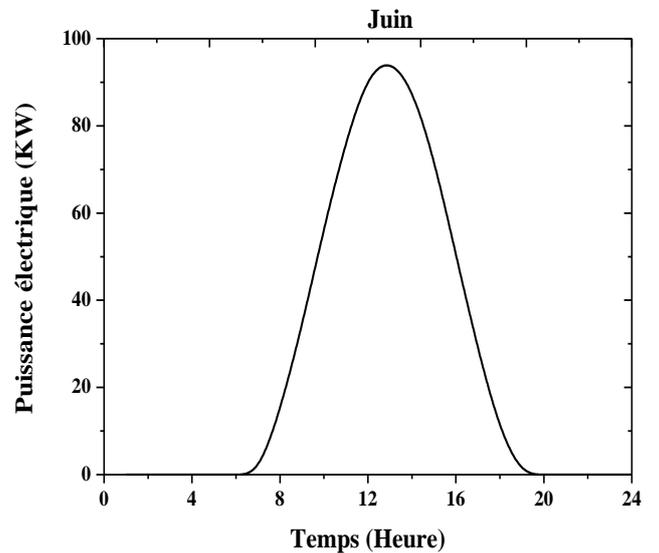


Figure V-17 Variation de la puissance en fonction du temps pour le mois de Juin

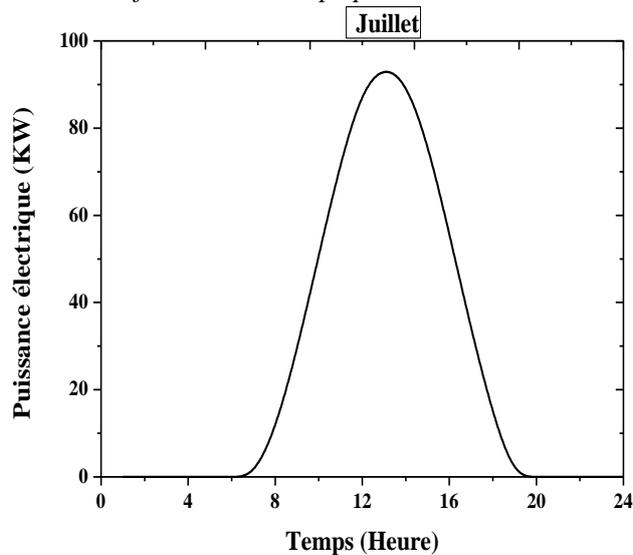


Figure V-18 Variation de la puissance en fonction du temps pour le mois de Juillet

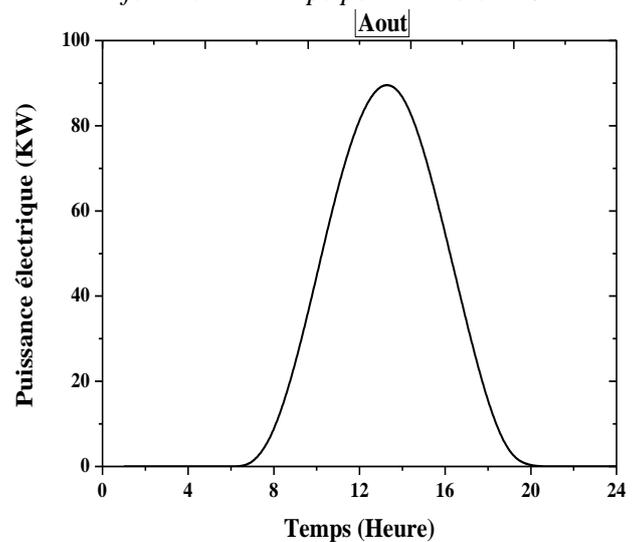


Figure V-19 Variation de la puissance en fonction du temps pour le mois d'Aout

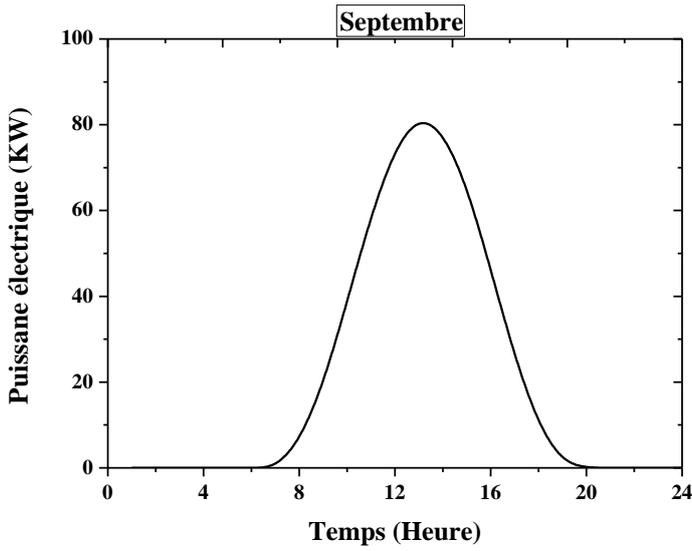


Figure V-20 Variation de la puissance en fonction du temps pour le mois de septembre

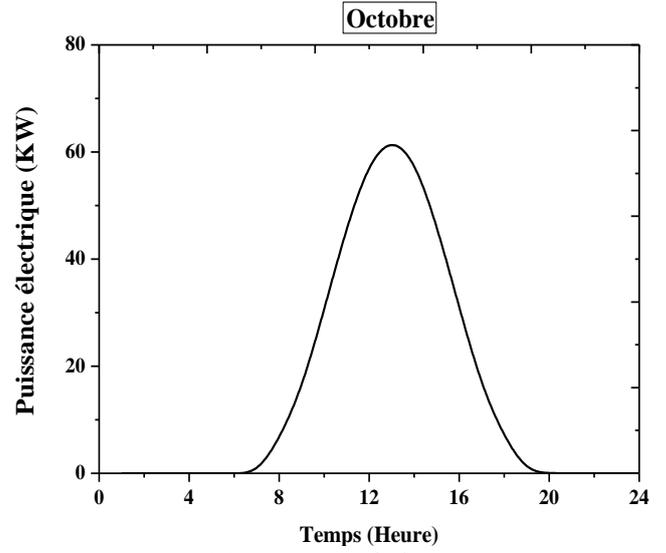


Figure V-21 Variation de la puissance en fonction du temps pour le mois d'octobre

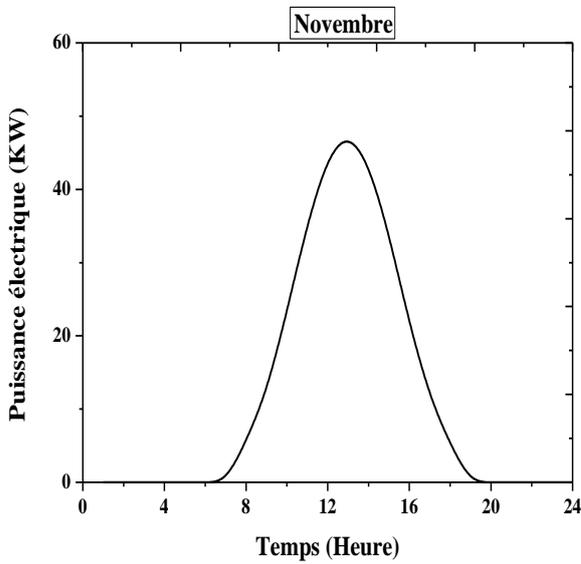


Figure V-22 Variation de la puissance en fonction du temps pour le mois de Novembre

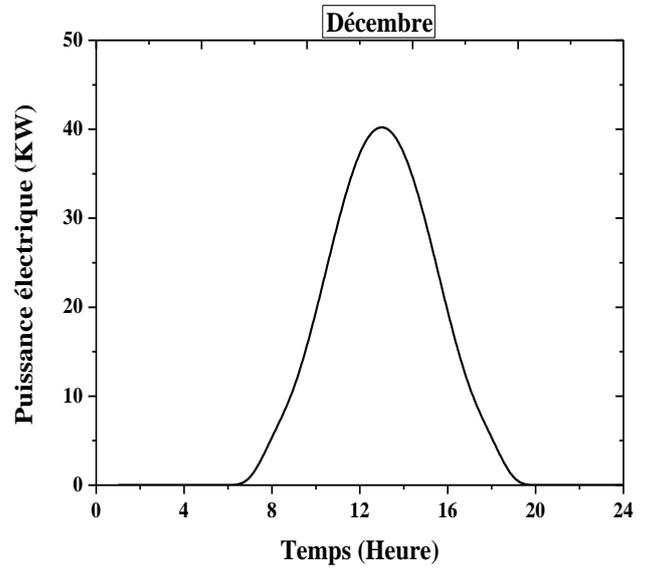


Figure V-23 Variation de la puissance en fonction du temps pour le mois de Décembre

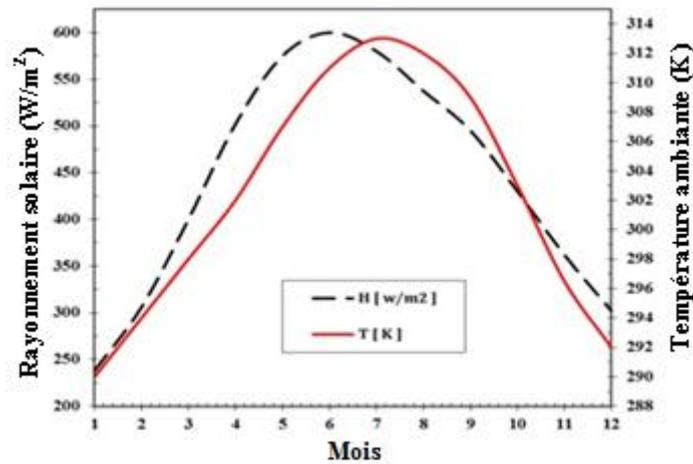


Figure V-24. Variation de l'irradiation solaire et de la température ambiante au cours du temps. Moyennes mensuelles du site d'Adrar.

La figure (V-24) montre les variations moyennes mensuelles de la température ambiante et de l'irradiation solaire du site d'Adrar. Le tableau V-1 comporte la distribution annuelle de la production d'électricité selon le modèle de Schlaich [6].

Tableau V-1. Distribution annuelle de la production d'électricité selon [6].

Les mois	T ₀ (K)	G (W/m ²)	P électrique (kW)
Janvier	290	240	23,1171833
Février	294	305	28,9783852
Mars	297,8	395	37,0505001
Avril	302	500	46,2471244
Mai	307	575	52,318001
Juin	311	600	53,8905398
Juillet	313,3	580	51,7117543
Aout	312	535	47,8983839
Septembre	309	493	44,5666626
Octobre	303	425	39,1803196
Novembre	296,7	365	34,3634683
Décembre	292	300	28,698558

La figure V-25 montre que la puissance électrique produite est proportionnelle au rayonnement solaire. Pour un rayonnement maximal de 600 W/m², la puissance électrique produite maximale est égale à 54 kW.

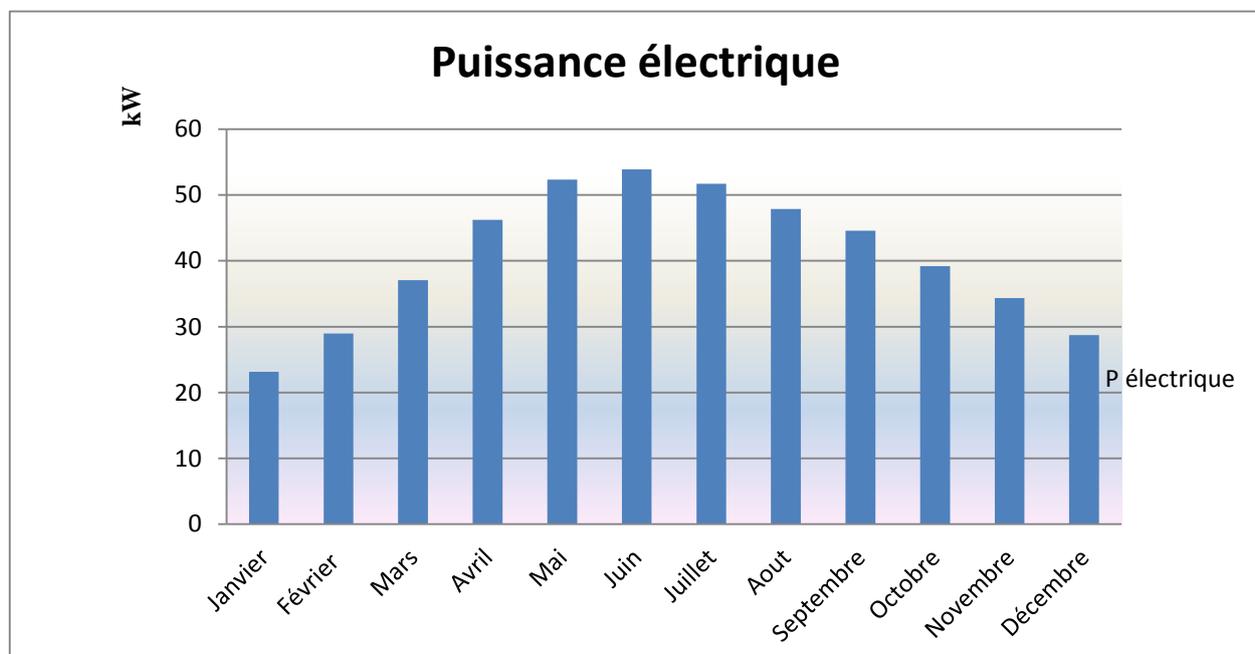


Figure V-25. Variation mensuelle de la puissance électrique pour une année dans la région d'Adrar.

La puissance électrique produite est minimale au mois de janvier (23 kW) car elle correspond à un rayonnement solaire minimal égal à 240 W/m².

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

V-4.1 Validation des modèles mathématique :

Dans le but de valider les modèles mathématiques décrits dans le chapitre IV, les résultats théoriques obtenus par le programme de calcul développé dans le cadre de cette étude Matlab (Température de l'air à la sortie du collecteur) ont été comparés, en premier lieu aux résultats expérimentaux du prototype de Manzanares [26].

En plus des données géométriques de la CCS, les données météorologiques (rayonnement solaire et température ambiante) ont été injectées dans notre programme afin de pouvoir déterminer les performances énergétiques par calcul. Les données techniques injectées dans le programme MATLAB et déterminées suivant une température de fonctionnement moyenne de 300K sont:

- le coefficient d'absorptivité de l'eau de stockage : $\alpha = 0.9$;
- la masse volumique de l'eau : $\rho_{eau} = 1000 \text{ kg/m}^3$;
- la masse volumique de l'air : $\rho_{air} = 1.14 \text{ kg/m}^3$;
- la chaleur spécifique de l'eau : $Cp_{eau} = 4178 \text{ J/kg.K}$;
- la conductivité thermique de l'eau de stockage : $K_{air} = 0.0263 \text{ W/m.K}$;
- la chaleur spécifique de l'air : $Cp_{air} = 1006 \text{ J/kg.K}$.

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

Comme il a déjà été mentionné, les données météorologiques du site de Manzanares du 2 septembre 1982 (Figure V-26) et fournies par Haaf [26] 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.

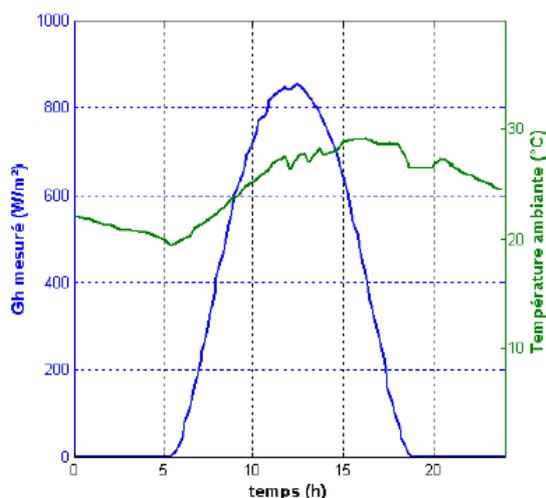


Figure V-26. Données météorologiques du 2 septembre 1982 du site de Manzanares.

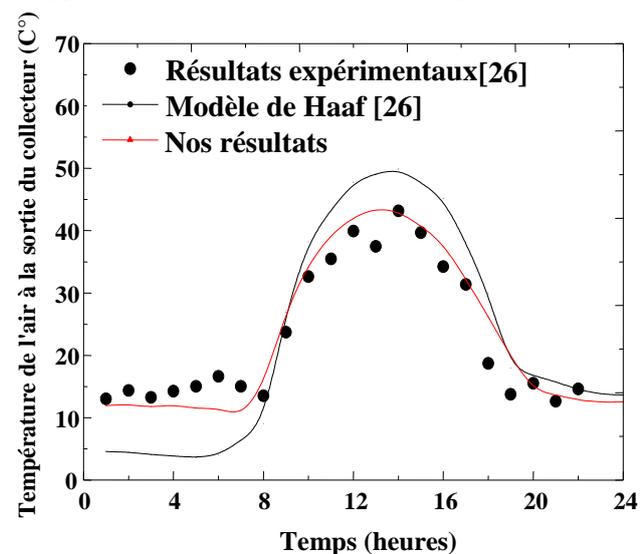


Figure V-27. Température de l'air à la sortie du collecteur en fonction du temps.

La figure (V-27) montre la comparaison numérique des équations relatives au modèle de Hamadi [55], les résultats théoriques de Haaf [26] et les données expérimentales à la sortie du collecteur. 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 [26] présentent un large écart par rapport aux résultats expérimentaux.

V-4.1.2 Validation par la puissance de sortie :

En injectant les données météorologiques du 8 juin 1987, fournies par Schlaich [25] (Figure V.28) dans notre programme MATLAB, en prenant en considération tous les paramètres et en considérant le stockage thermique, nous obtiendrons les résultats relatifs au calcul de performances des CCS avec stockage thermique.

Les résultats obtenus ont été comparés à ceux obtenus expérimentalement sur le prototype de Manzanares pour la journée du 8 juin 1987 ainsi qu'aux résultats obtenus avec le modèle de Schlaich [6].

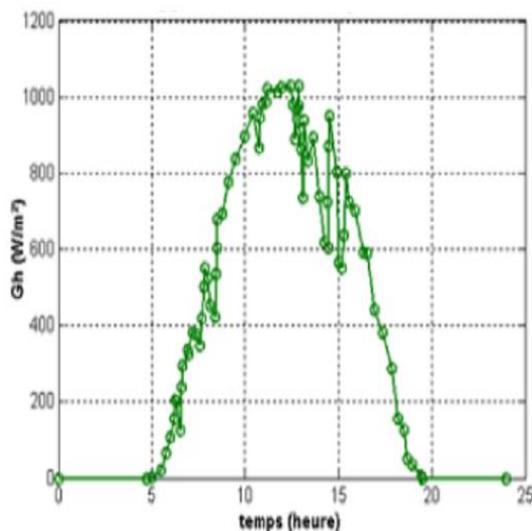


Figure V-28. Rayonnement solaire horizontal pour la journée du 08/06/1987 à Manzanares.

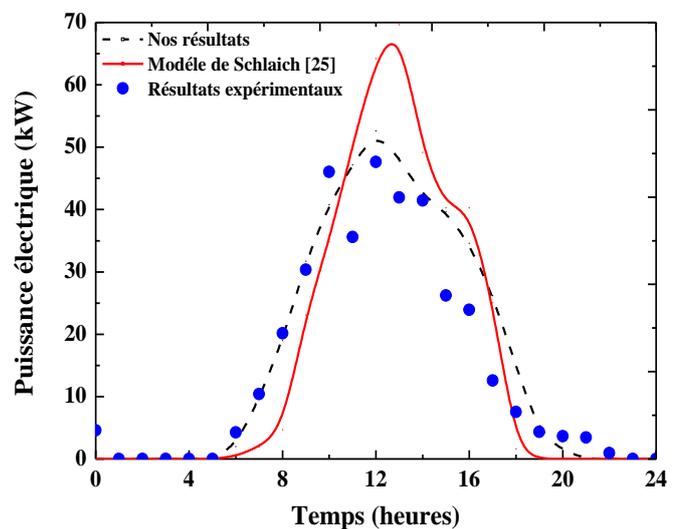


Figure V-29. Puissance électrique produite pour la journée du 08/06/1987 à Manzanares. Comparaison de résultats.

La figure V-29 montre que la production d'électricité est nulle entre 23h et 5h du matin cela est dû essentiellement à l'absence du rayonnement solaire. La puissance électrique croît jusqu'à atteindre une puissance de 49 kW entre 11h et 13h en suivant parfaitement le profil du rayonnement solaire journalier. Entre 19h et 23h on a une production d'électricité très faible alors que le rayonnement solaire est absent représentant ainsi une preuve de l'effet du stockage thermique du sol.

Il est à souligner que notre modèle présente un accord satisfaisant avec les résultats expérimentaux pendant la majeure partie des heures de la journée, exception faite d'une légère déviation en début de soirée et vers la nuit. Ce qui nous permet de valider nos résultats.

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 assez simplifié et ne prend en considération ni le stockage ni les pertes thermiques.

V.4.1.3 Comparaisons de nos résultats avec les résultats théoriques de Bernardes [8] :

Les résultats théoriques obtenus par notre programme de calcul sous environnement Matlab, ont été comparés aux résultats théoriques de Bernardes [8] et aux résultats expérimentaux sur le prototype de Manzanares pour la journée du 6 Aout 1987 (Figure V-30).

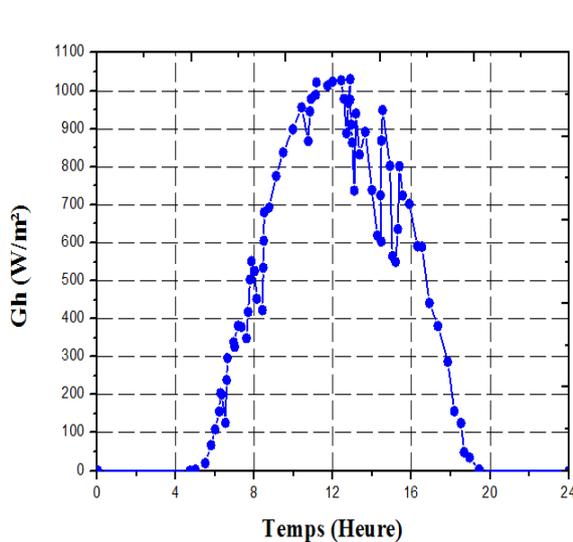


Figure V-30. Données météorologique du 06/08/1987 du site de Manzanares.

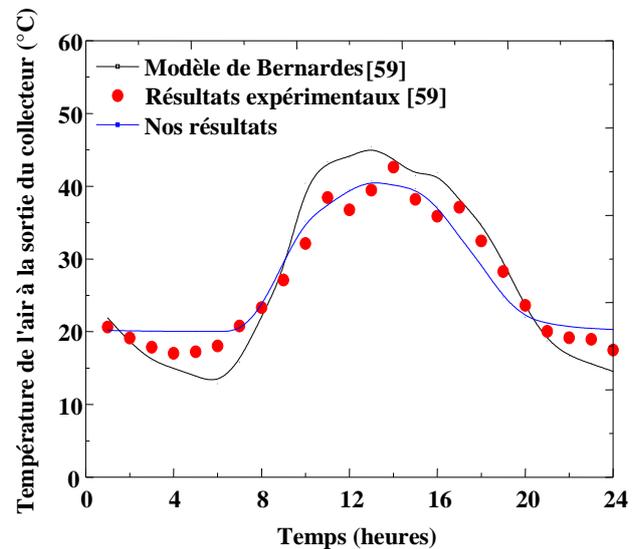


Fig. V-31. Comparaison entre nos résultats, avec les résultats expérimentaux de Manzanares, et ceux de Bernardes [8].

La figure V-31 montre la comparaison entre les différents résultats. Il est à noter que les résultats obtenus avec notre programme de calcul par utilisation du modèle de Hamadi [55] présentent une bonne concordance avec les données expérimentales sur site. Les résultats théoriques de Bernardes [8] présentent un large écart en début de journée de 1 heure jusqu'à 8h et en fin de journée de 20 heures jusqu'à minuit.

V-4.2 Effet de la variation des paramètres géométriques et techniques sur la puissance de sortie de la CCS :

Dans cette section on va essayer de comprendre l'effet de la variation de quelques paramètres techniques sur la puissance de sortie de la CCS de Manzanares équipée d'un système de stockage thermique à eau et implanté dans la région d'Adrar.

L'analyse a été faite en prenant en considération les points suivants :

L'analyse se fera pour les deux mois les plus extrêmes de l'année à savoir ;

- le mois le moins ensoleillé qu'est Décembre ;
- Le mois le plus ensoleillé qu'est Juillet.

Quatre paramètres techniques ont fait l'objet de variations :

- L'épaisseur de stockage ;
- le diamètre de la cheminée ;
- la hauteur de la cheminée ;

- le diamètre de la cheminée ;
- la vitesse du vent.

Les Données météorologique de la région d’Adrar pour le mois de juillet et de décembre sont présentées en figure V.32.

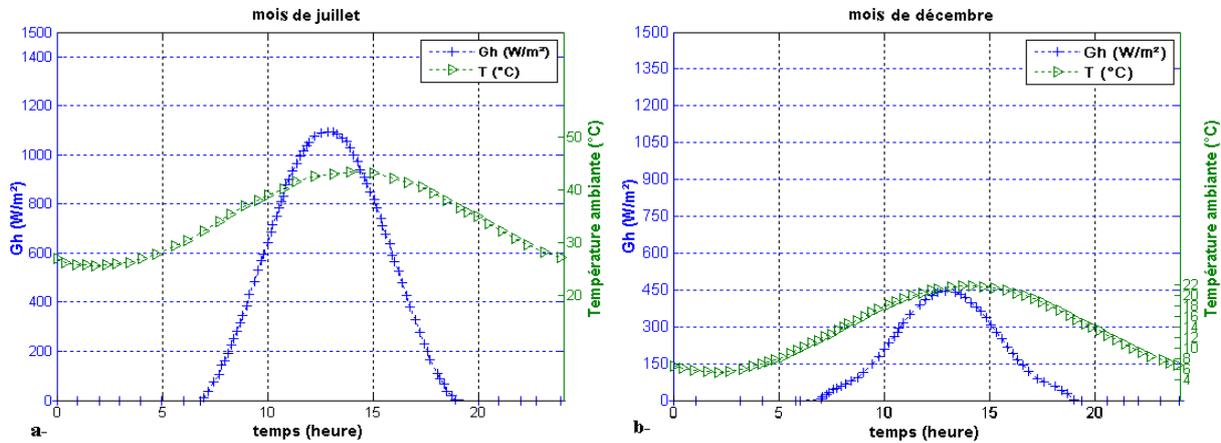


Figure V- 32. Données météorologique de la région d’Adrar pour le mois de juillet et de décembre.

V-4.2.1 Effet de l’épaisseur du système de stockage thermique, H_s :

Le modèle de Hammadi [55] considère le milieu de stockage comme une couche située en dessous du collecteur, d’une hauteur H_s et d’une surface égale à celle du collecteur. Les figures V.33 et V.34 donnent les puissances de sortie de la CCS de Manzanaras dans la région d’Adrar pour différentes valeurs de H_s . Trois hauteur de stockage ont été econsidérées : 5cm, 10cm et 15cm.

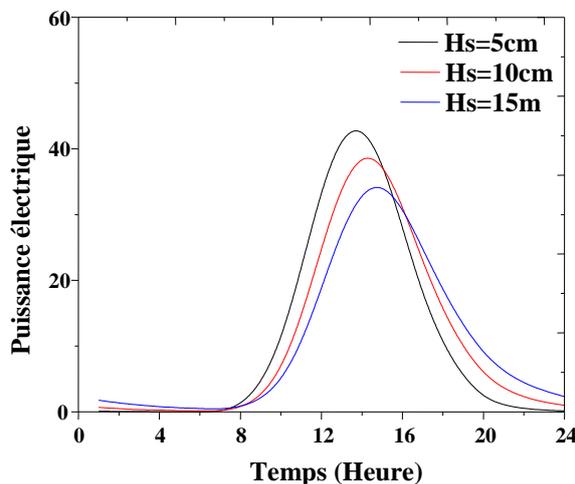


Figure V-33. Puissance électrique produite pour différentes épaisseurs de stockage pour le mois de Décembre.

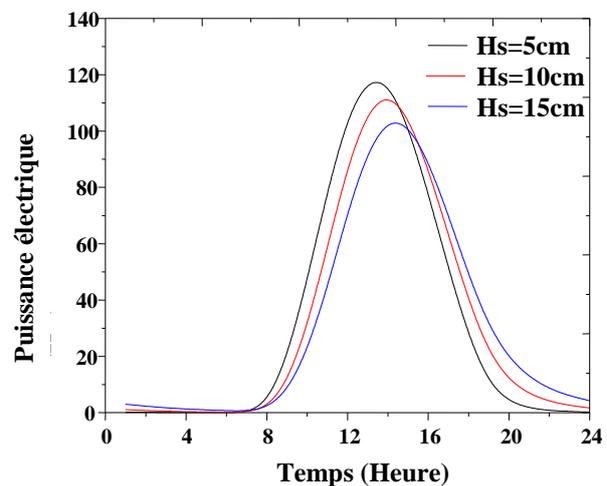


Figure V-34. Puissance électrique produite pour différentes épaisseurs de stockage pour le mois de Juillet.

es

figures illustrent clairement l’effet de la variation de l’épaisseur de stockage thermique, H_s , sur la puissance électrique produite par la CCS. Elles montrent que plus le rayonnement solaire est important plus la production d’énergie électrique est grande. Pendant le mois de Juillet, la production d’électricité est maximale car le rayonnement solaire est maximal à

l'inverse du mois de Décembre où la production d'électricité est minimale dû au fait que le rayonnement solaire est minimal pendant ce mois.

Il est à souligner que le système de stockage assure un écoulement continu de fluide dans la CCS même après le coucher du soleil : plus l'épaisseur de stockage est importante plus la production d'énergie après le coucher du soleil est importante aussi. On noté également que plus l'épaisseur de stockage est importante plus le pic de la courbe de production s'éloigne du midi solaire ou on devrait avoir une production d'électricité maximale car le rayonnement solaire est maximale. Cela est due au fait que le système de stockage thermique met du temps à restituer l'énergie stockée auparavant lorsque l'épaisseur de stockage est importante.

V-4.2.2 Effet du diamètre de la cheminée :

Le diamètre de la cheminée est un paramètre essentiel dans l'étude de la faisabilité d'une CCS. Dans ce qui suit, l'effet du diamètre de la cheminée sur la puissance de sortie de la CCS de Manzanares a été analysé. Trois diamètres de cheminées ont été considérés : 10 m, 20 m et 30 m, afin de bien comprendre l'effet de ce paramètre sur la puissance électrique de sortie. Le diamètre de la tour critique pour lequel la puissance électrique n'augmentera a été déterminé en considérant d'autres diamètres de cheminées.

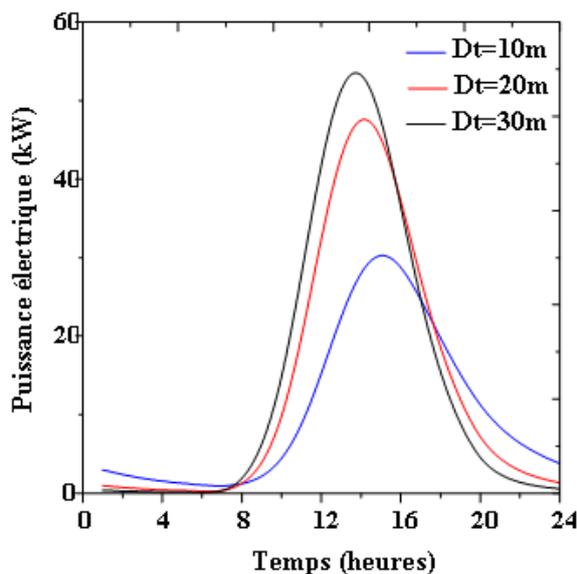


Figure V-35. Puissance électrique produite pour différents diamètres de cheminées et relatif au mois de décembre.

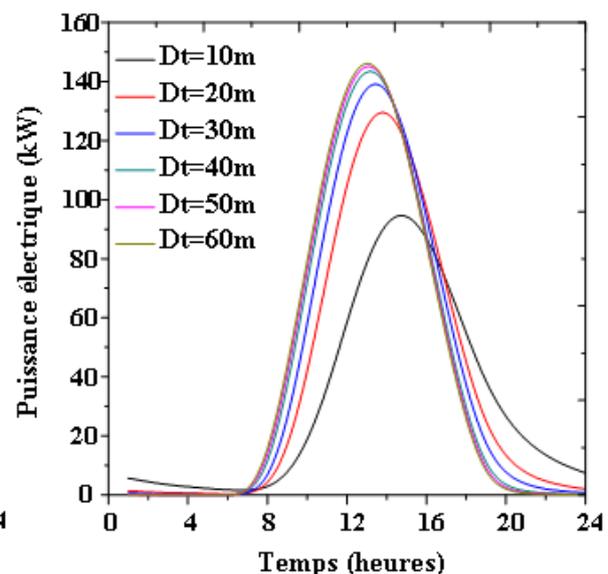


Figure V-36. Puissance électrique produite pour différents diamètres de cheminées et relatif au mois de juillet.

Les figures V-35 et V-36 montrent l'influence du diamètre de la cheminée sur la puissance électrique produite pour une journée des mois de Juillet et Décembre en utilisant l'eau comme système de stockage thermique, d'épaisseur fixe : $H_s=15\text{cm}$. Les résultats montrent que la puissance de sortie est directement liée au diamètre de la cheminée. En augmentant le diamètre de la cheminée, le débit d'air qui s'écoule à l'intérieur de la cheminée augmente ainsi que sa vitesse ce qui augmente son énergie cinétique qui sera transformée en énergie électrique.

On note également qu'il y a peu de différence de temps entre les pics des courbes de production de puissance de sortie. L'effet du système de stockage est moins important que dans le cas précédent : après 21 heures le système ne garantit pas une production d'électricité continue dans la centrale pour les diamètres $Dt=20m$ et $Dt=30m$ contrairement pour $Dt=10m$ où la production est assurée même après 21 heures. Sur la base de ces considérations, on peut déduire que plus le diamètre de la cheminée est grand plus on doit augmenter l'épaisseur de stockage pour garantir une production continue de puissance.

On remarque aussi que l'augmentation de la puissance produite diminue lorsque le diamètre de la cheminée devient important. On peut ainsi déduire que pour une hauteur de cheminée fixe, arrivée à un certain diamètre, la puissance de sortie n'augmentera plus, donc le diamètre de la cheminée est un paramètre à optimiser. Pour notre CCS le diamètre de la cheminée critique est égale à $Dt=60m$.

V-4.2.3 Effet de la hauteur de la cheminée :

La hauteur de la cheminée est aussi un paramètre essentiel qui a son influence sur la puissance électrique produite par la CCS, sa faisabilité, sa construction, ainsi que son coût de construction, car une cheminée de hauteur assez élevée nécessitera un investissement colossal, une optimisation de cet paramètre est à faire. Nous allons essayer, dans ce paragraphe, 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 et V-38 montrent l'évolution de la puissance électrique produite par la CCS de Manzanares en considérant que celle-ci serait implantée dans la région d'Adrar. Différentes hauteurs de cheminées sont considérées: (200 m, 250 m et 300 m). L'épaisseur de stockage thermique est considérée fixe : $H_s=15cm$.

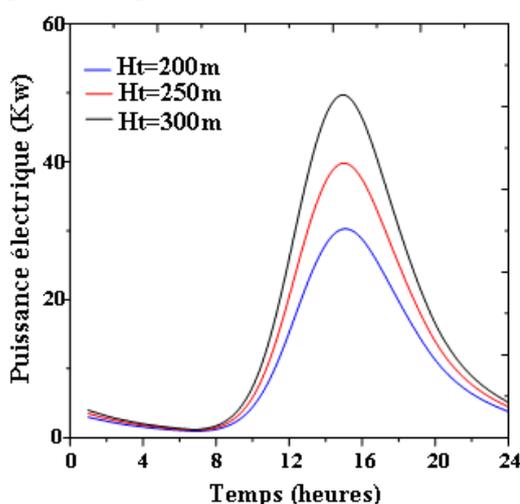


Figure V-37. Puissance électrique produite pour différentes Hauteurs de cheminées et pour le mois de Décembre

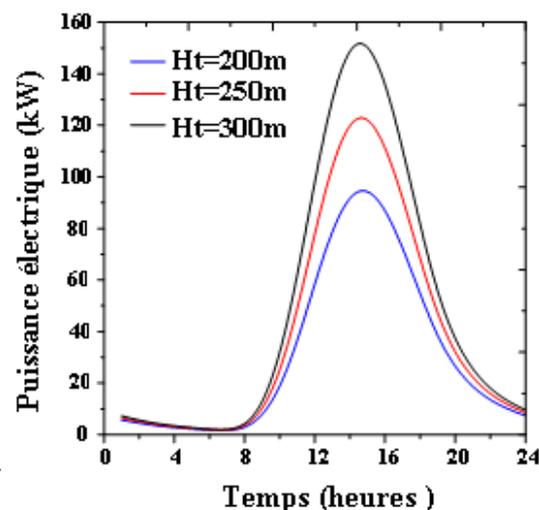


Figure V-38. Puissance électrique produite pour différentes Hauteurs de cheminées pour le mois de Juillet.

es figures montrent que la production journalière d'électricité est aussi liée à la hauteur de la cheminée, puisque plus la cheminée est grande plus la puissance maximale correspondant au maximum d'intensité de rayonnement solaire est grande. Cela s'explique par la différence de

pressions entre l'air chaud à la base de la cheminée est l'air froid 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 pressions augmente, plus l'effet de flottabilité augmente, plus la vitesse de l'air ascendant augmente, et plus son énergie cinétique augmente et donc plus l'énergie électrique produite augmente.

On remarque aussi qu'aucune différence de temps entre les pics et les extrémités des courbes n'est observée. On peut ainsi déduire que le système de stockage n'est pas affecté par la hauteur de la cheminée.

Il est ainsi évident que plus la hauteur de la cheminée est grande plus la puissance électrique produite est grande. Cependant il est nécessaire de chercher un critère d'optimalité afin de produire plus de puissance pour une hauteur optimale. Ce critère n'est pas facile à trouver, seul l'aspect construction et coût décidera de sa valeur.

V-4.2.4 Effet de la variation du diamètre du collecteur :

Le diamètre du collecteur représente un paramètre fondamental vu le coût nécessaire pour sa construction et pour la superficie des terres allouées pour son installation vu que le coût du m² des parcelles de terrains varie d'une région à une autre, une optimisation de ce paramètre est donc nécessaire pour réduire les dépenses. Les figures V-39 et V-40 montrent la variation de la puissance électrique produite par la CCS de Manzanares si celle-ci serait implantée dans la région d'Adrar, pour différents diamètres de collecteurs : 240m, 480m et 20m. L'épaisseur de stockage thermique est considérée fixe : $H_s=15$ cm.

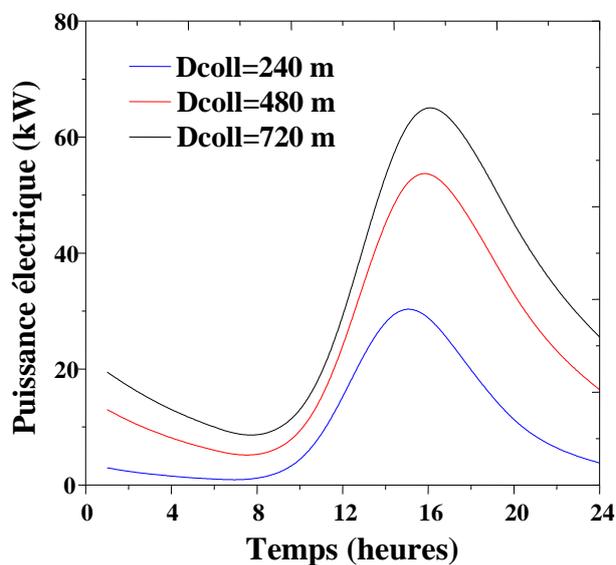


Figure V-39. Puissance électrique produite pour des différents diamètres de collecteurs et pour le mois de décembre.

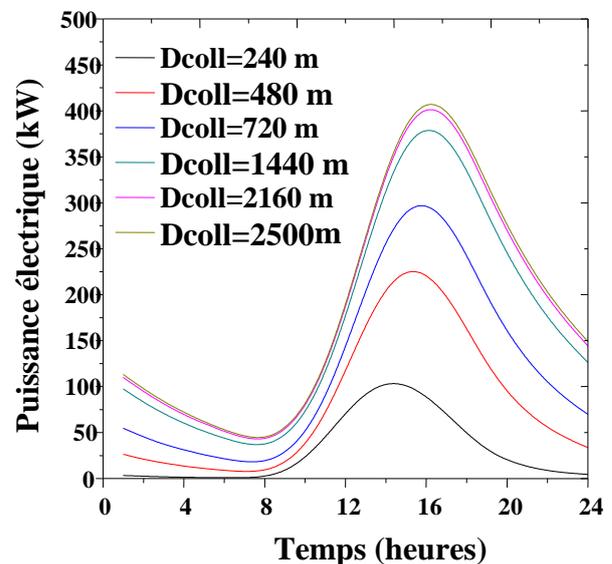


Figure V-40. Puissance électrique produite pour différents diamètres de collecteurs et pour le mois de Juillet.

Les figures V-39 et V-40 illustrent que le diamètre du collecteur influence directement sur la production d'électricité journalière. Plus le diamètre est grand plus la puissance électrique journalière produite augmente aussi.

Cette augmentation de la puissance s'explique par 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 pressions à l'intérieur de la cheminée entre l'air ambiant et celui chauffée est plus grande, ce qui conduit comme il a déjà été expliqué à une puissance électrique produite plus grande.

De plus, la figures V-40 montre clairement que l'écart entre les courbes diminue jusqu'à ce qu'il devient nul lorsque le diamètre du collecteur devient important. Sur la base de ces considérations, on peut déduire que pour une hauteur de cheminée fixe, arrivée à un certain diamètre, la puissance de sortie n'augmentera plus, et, le diamètre du collecteur est un paramètre à optimiser. A titre d'exemple, pour une hauteur de cheminée, $H_t=196.4$ m, le diamètre du collecteur critique est : $D_{coll}=2500$ m.

V-4.2.5 Effet de la vitesse du vent U_{wind} :

L'étude de l'implantation d'une CCS dans un site quelconque doit prendre en considération plusieurs paramètres 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

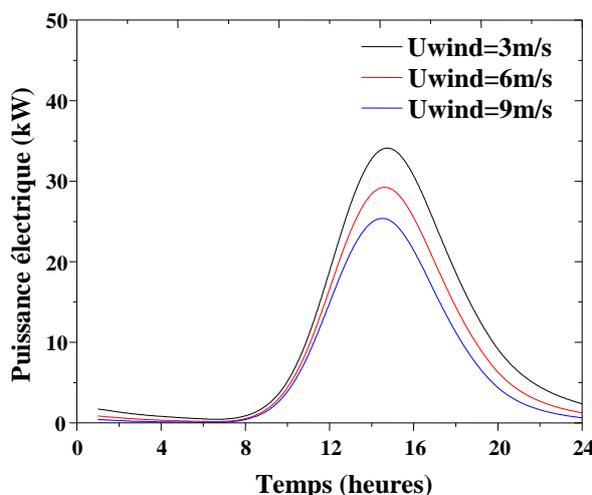


Figure V-41. Puissance électrique produite pour des vitesses de vent différentes et pour le mois de décembre.

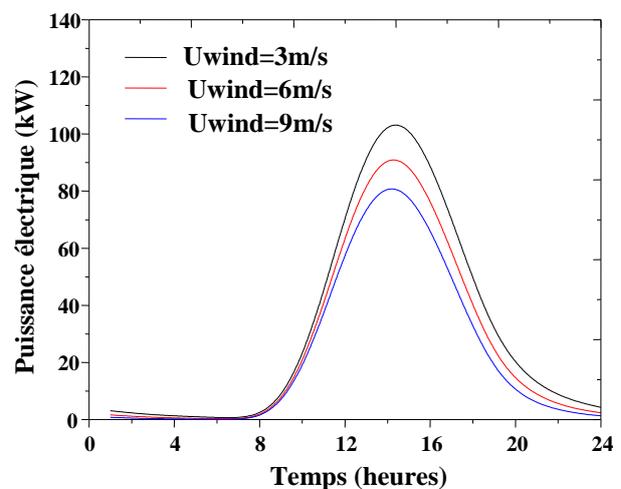


Figure V-42. Puissance électrique produite pour des vitesses de vent différentes et pour le mois de Juillet.

Les figures V-41 V-42 montrent que la vitesse du vent influe sur la production d'électricité journalière. Cette influence est notable au niveau du pic de rayonnement solaire. Plus la vitesse du vent est élevée plus la puissance électrique journalière produite diminue considérablement particulièrement au niveau du pic de rayonnement solaire. De ces figures 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.

La vitesse du vent U_{wind} influence les performances de la CCS de trois manières :

- premièrement, par les pertes de chaleur par convection à partir du toit du collecteur vers l'extérieur ;
- deuxièmement, en soufflant l'air chauffé à l'intérieur et à travers le collecteur vers l'extérieur du collecteur plutôt que vers la cheminée ;
- enfin en générant un effet d'aspiration à travers la sortie de la cheminée pour augmenter le courant ascendant.

Les deux premiers processus conduiront à une réduction de l'efficacité du collecteur car ils engendreront une diminution de l'énergie thermique qui sera transférée vers le fluide caloporteur en l'occurrence l'air. Ainsi, la température de l'air à la sortie du collecteur sera moins élevée que pour les périodes non ventée.

V-5 Etude d'une CCS à grande échelle :

Le prototype de Manzanares a bien remplis son rôle de fournisseur d'informations scientifiques et technologiques. Pour le reste, les modèles mathématiques validés, permettent de prédire assez correctement le comportement d'une CCS à grande échelle.

Nous avons utilisé les dimensions du prototype de Manzanares dans cette étude afin de pouvoir valider les résultats obtenus. Sur le fondement de cette étude, on peut donner les dimensions d'une CCS de 200 MW pouvant alimenter en électricité une ville de 200 000 habitants. Le tableau ci- dessous donne les dimensions correspondantes de la centrale.

Puissance nominale	200 MW
Hauteur de la cheminée	1000m
Diamètre de la cheminée	150m
Diamètre du collecteur	5000m
Hauteur du toit du collecteur	5m

La figures V-43 montre l'évolution de la puissance électrique produite pour une journée du mois de juillet pour une centrale de puissance nominale de 200 MW, et une épaisseur de stockage $H_s=15$ cm. On voit que la puissance électrique évolue pendant la journée jusqu'à atteindre un pic vers 14 heures. On constate aussi que le système de stockage assure un écoulement continu du fluide dans la CCS même après le coucher du soleil.

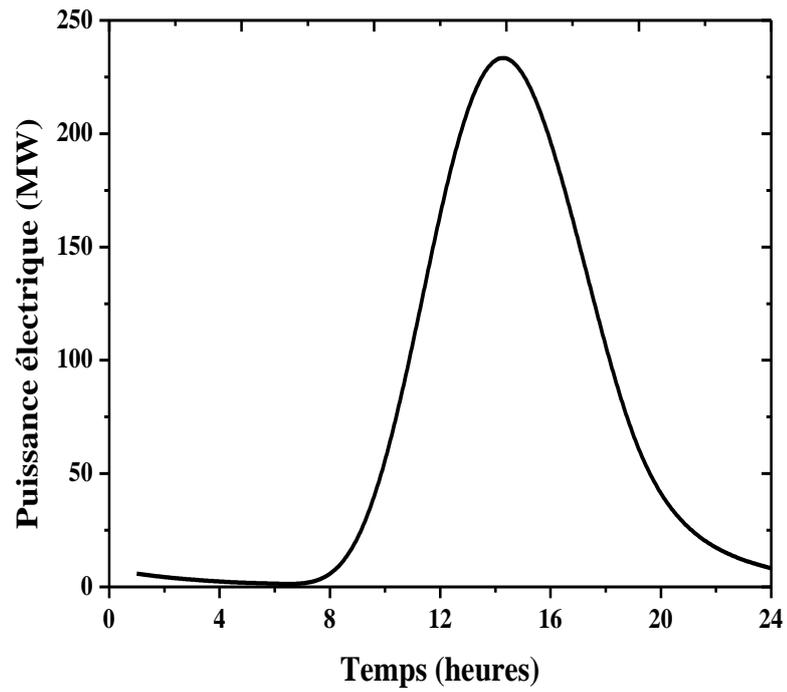


Figure V-43. Variation de la puissance électrique en fonction du temps pendant une journée du mois de juillet pour une centrale de 200 MW.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Pour fonctionner avec de bonnes performances, une cheminée solaire doit être construite dans une région très ensoleillée et disposant de nombreux espaces inhabités. Les endroits les plus favorables se trouvent en Afrique du Nord et principalement au Sahara, au sud de l'Inde, dans le centre de l'Australie et aux Etats-Unis.

Le désert algérien fait partie des sites les plus favorables au monde à l'installation de centrales solaires où l'ensoleillement global annuel est maximal et où les surfaces inoccupées ne manquent pas. La cheminée solaire est un système très simple qui ne nécessite pas une grande technologie pour sa construction, tous les éléments constituant sont très simples et ne coûtent pas très cher. Les centrales à cheminée solaire sont des moyens modernes pour produire de l'énergie électrique sans causer de dégât à l'environnement et sans que le procédé soit lié à une énergie fossile ou non renouvelable. Plusieurs études ont été faites pour développer le fonctionnement des cheminées solaires surtout en ce qui concerne les techniques de stockage de l'énergie pendant la nuit qui présente le principal handicap pour les centrales à cheminée solaire (CCS).

L'objectif principal de notre étude est l'analyse des performances des centrales à cheminée solaire avec et sans stockage thermique. Le site d'Adrar a été choisi compte tenu de son important gisement solaire et surtout de la disponibilité de données météorologiques relatives à la température et au rayonnement solaire.

Les premiers résultats concernant le prototype de Manzanares ont permis de démontrer la fonctionnalité du modèle mathématique développé par le Professeur Schlaich [6]. Ils ont montré que les performances énergétiques des centrales à cheminée solaire dépendent des paramètres dimensionnels et des caractéristiques du site d'implantation (données météorologiques, type du sol, etc...).

Le modèle mathématique de Schlaich [6] ne prenant pas en considération le stockage thermique, a permis de confirmer 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 constitue la meilleure solution afin de garantir une production permanente d'électricité. Ce dernier a fait l'objet d'une analyse spécifique dans le cadre de cette étude. Les résultats obtenus ont montré que le système de stockage thermique permet d'augmenter la puissance électrique produite par la CCS durant les périodes à faible taux d'ensoleillement et même durant les périodes où le soleil est absent. 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 d'énergie.

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.

Les résultats obtenus ont été validés sur la base de résultats expérimentaux obtenus sur le prototype de Manzanares et sur la base de résultats théoriques issus de la littérature. Il est à souligner que le modèle mathématique de Hammadi [7], analysé dans le cadre de cette étude et résolu numériquement sous MATLAB donne des résultats bien meilleurs que ceux de Bernardès [8] et Haff [26].

Le stockage thermique dans les centrale à cheminé solaire a fait l'objet d'une étude approfondie. L'effet de l'épaisseur de stockage a bien été montré : en effet la conclusion à laquelle on a abouti, dans le cadre de ce travail, est que plus l'épaisseur de stockage est importante plus la continuité de production d'énergie est assuré. 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.

Les résultats obtenus montrent qu'on peut augmenter la puissance en augmentant la hauteur et le diamètre de la cheminée, ainsi que le diamètre du collecteur. L'efficacité du système de stockage est légèrement affectée par le diamètre de la tour. De plus, afin de garantir une production de puissance continue, un système de stockage thermique adéquat représente la meilleure solution dans le souci de produire une électricité propre et renouvelable sans avoir recours à des solutions pouvant avoir un impact nocif sur l'environnement. Les performances énergétiques des centrales à cheminée solaire peuvent être améliorées par amélioration des systèmes de stockage de chaleur en développant des systèmes de stockage avec matériaux à changement de phase (PCM) qui permettent le jumelage du stockage par chaleur sensible et latente, ce qui n'est pas le cas actuellement en raisons de la complexité des transferts de chaleur dans les PCM.

Références Bibliographiques

- [1] Laghzaoui A., Peerhossaini D., Stockage de chaleur : Energie solaire et autre application. Rapport interne, Ecole des mines de Douai, France, 2010.
- [2] <http://danslredutemps.blogspot.com/2012/02/solaire-lalternative-energetique.html>
- [3] Djassem C., Réalisation et expérimentation d'une cheminée solaire. Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah, Ouargla, 2014.
- [4] GEEF M., Cota E., Solar energy, renewable energy and the environment. CRC Press, New York, USA, 2010.
- [5] Bonnelle D., Tour solaire, tour à vaporisation d'eau, et modes de conversion d'énergie renouvelable apparentés : présentation, critiques et suggestion. Thèse de doctorat, Université Claude Bernard - Lyon 1, France, 2002.
- [6] Schlaich J., The Solar Chimney. Axel Menges Editions, Stuttgart, Germany, 1995.
- [7] Hammadi S., Solar updraft tower power plant with thermal storage. Basrah Journal for Engineering Research, Vol. 98, pp.49–57, 2008.
- [8] Bernardes M., Voß A., Weinrebe G., Thermal and technical analyses of solar chimneys. Solar Energy, Vol. 75, pp. 1511-1524, 2003.
- [9] Antoine M., Contribution à la conception et à l'optimisation thermodynamique d'une Microcentrale solaire Thermo électrique. Thèse de doctorat en mécanique énergétique, Université de lorraine, 2012.
- [10] Meliani K., Taghourt A., Analyse des Performances énergétiques d'une Centrale à Cheminée Solaire par une prise en charge du stockage thermique. Mémoire de fin d'étude, Ecole nationale polytechnique, Juin 2015.
- [11] Meziani F., 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, Tizi Ouzou, 2011.
- [12] Ricaud A., Gisement solaire et transfert énergétique. Master Energies Renouvelables, Université de CERGY PONTOISE, 2011.
- [13] <http://www.energy.gov.dz/francais/uploads/2016/Energie/energie-renouvelable.pdf>.
- [14] <http://www.recuperation-chaleur.fr/stockage-chaleur-sensible>
- [15] Khaoussou B., Etude d'un système de stockage et de déstockage de chaleur à chaleur latente de fusion application à la cuisinière solaire. Projet de fin d'étude, Ecole supérieure polytechnique, Dakar, 2005.

- [16] Farid., Vineet V., Contribution au stockage d'énergie thermique en bâtiment développement d'un système actif a matériaux a changement de phase. Thèse de doctorat École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 2011.
- [17] Tayebi T., Processus de convection naturel laminaire dans une cheminée Solaire. Mémoire de Magister, faculté de physique, Université Mentouri, 2010.
- [18] Gonzalez P., Les tours solaires, deux approches pour utiliser l'énergie du soleil, Énergies renouvelables. ENSTA, Paris, 2011
- [19] <http://www.ecolopop.info/2006/07/500-mw-solaires-pour-un-brevet-adevelopper/442> 28 février 2014.
- [20] extrait de l'interview de Kamel Mostefa Kara Le DG de l'Agence National des changements climatique pour Maghreb info.
- [21] Hasnain A., Ph.D Dissertation, Dept of Fuel and Energy, University of Leeds, UK, 1990.
- [22] De John A., and Hoogendoorn C., Thermal Storage of Solar Energy. D. Reidel Publishing Company, Amsterdam, The Netherlands, 1980.
- [23] Hale D., Hoover M, and O'Neill. M : Phase change material. NASA Report, NASA-CR-61363, 1971.
- [24] Schlaich J., Schiel W ., Solar chimney. Encyclopedia of Physical Science and Technology. pp.199-109, 2004.
- [25] Schlaich J., Bergermann R., W Schiel ., 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, 2003.
- [26] Haaf W., Friedrich K., Mayr G., 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., and 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., and 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., and 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., Padki M., Thermo fluid analysis of solar Chimneys. Industrial Applications of Fluid Mechanics, FED, ASME, 1991.
- [32] Bernardes M., valle R., 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., and 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., and Xu G., Analytical and numerical investigation of the 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] Pretorius J., Optimization and control of a large scale solar chimney power plant. Ph.D, Thesis, University of Stellenbosch, South Africa, 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., 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., 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., and 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.,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., and 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., and Buys J : radial flow boundary layer development analysis. South african institution of mechanical engineering, R&D Journal, Vol. 15, pp.195-102, 1999.

- [47] Kirstein C., and 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., Kornaltdt O., and 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., and Pastohr H., Computational studies on the effect of geometric parameters on the performance of a solar chimney power plant. *Int.J.Energy Res* pp.67–83, 2013.
- [50] Kreetz H., Theoretische untersuchungen und auslegung eines temporaren wasserspeichers fur das auf wind kraft werk.. *Diploma Energiever fahrens technik und Umw and lungs techniken regenerativer Energien EVUR*, Technical University Berlin; 1997.
- [51] Hedderwick R., Performance evaluation of a solar chimney power plant. Stellenbosch, South Africa, Department of Mechanical Engineering, University of Stellenbosch, 2001.
- [52] Pretorius J., Solar tower power plant performance characteristics. Stellenbosch, South Africa, Department of Mechanical Engineering, University of Stellenbosch, 2004.
- [53] Pretorius J., and Kröger D., Critical evaluation of solar chimney power plant performance. *Sol Energy*, pp.1235-41, 2004.
- [54] Miqdam T., and 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.
- [55] Ming T., Meng F., Liu W., Pan Y., and Kiesgen R., Analysis of output power smoothing method of the solar chimney power generating system. *International Journal of Energy Research*, vol 37, pp1657-1668, 2012.
- [56] Xu G., Ming T., Pan Y., Meng F., and Zhou C., Numerical analysis on the performance of solar chimney power plant system. *Energy Conversion and Managemen*, pp.1876-883, 2010.
- [57] Zheng Y., Ming T., Zhou Z., Yu X., Wang H., Pan Y., 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] Bernardes M., Ökonomische und Ökologische Analyse von Auf wind kraft werken. IER, Universitat Stuttgart, Stuttgart, Germany, 2004.
- [59] Sangi R., Amidpour M., and Hosseinizadeh B : Modeling and numerical simulation of solar chimney power plants. *Sol Energy*, pp. 1829-38, 2011.

- [60] Fanlong M., Tingzhen M., and Yuan P., A Method of Decreasing Power Output Fluctuation of Solar Chimney Power Generating Systems. In proc. Third International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation (ICMTMA), vol. 1, pp. 114-118, 2011.
- [61] Y. Zhou, X. H. Liu, and Q. L. Li., Unsteady Conjugate Numerical Simulation of the Solar Chimney Power Plant System with Vertical Heat Collector. Materials Science Forum, vol. 704-705, pp.535-540, 2011.
- [62] Xu G., Ming T., Pan Y., Meng F., Zhou C., Numerical analysis on the performance of solar chimney power plant system. Energy Conversion and Management, vol. 52, no 2, pp. 876-883, 2011.
- [63] Bernardes M., Zhou X., On the heat storage in solar updraft tower collectors water bags. Sol Energy, pp.91:22–31, 2013.
- [64] schult B., and plumb O., Experimental study on thermal performance of a solar chimney combined with PCM. Proceedings of the ASME 2012 International Mechanical Engineering Congress & Exposition, IMECE2012-88356.
- [65] Yongcai L., and Shuli L., Heating performance of a solar chimney combined PCM: A numerical case study. Energy and Buildings 99 pp.117–130, 2015.
- [66] Krisst R., Energy transfer system. Alternat Sources Energy, vol. 63, pp. 18-11, 1983.
- [67] Pasumarthi N., and 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.
- [68] 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.
- [69] Zhou X., and 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, pp.400-407, 2009.
- [70] Ketlogetswe C., Fiszdon JK., and Seabe O., Solar Chimney Power Generation Project The Case for Botswana. International Journal of Renewable and Sustainable Energy Review, Vol. 12, N°7, pp. 2005 – 2012, 2008.
- [71] Maia C B., Ferreira A G., Valle R M., and Cortez M F B., Theoretical Evaluation of the Influence of Geometric Parameters and Materials on the Behavior of the Airflow in a Solar Chimney. Computers and Fluids, Vol. 38, N°3, pp. 625 – 636, 2009.
- [72] Koyun A., Üçgül I., Acar M., Şenol R., Güneş R., Bacası Sisteminin Termal Özet Dizaynı Tesisat Mülhendisliği Dergisi. Vol. 98, pp. 45 – 50, 2007. Available at: <http://www.mmoistanbul.org/yayin/tesisat/98/6>.

- [73] Akbarzadeh A., Johnson P., and Singh R., Examining Potential Benefits of Combining a Chimney with a Salinity Gradient Solar Pond for Production of Power in Salt Affected Areas. *Solar Energy*, Vol. 83, N°8, pp. 1345 – 1359, 2009.
- [74] Lid W., Wei P., and 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.
- [75] Siva R, Kaushik S., Ranjan K., Tyagi S., State of the art of solar thermal power plants A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 27, pp.1258-273, 2013.
- [76] Xinping Z., Jiakuan Y., Fen W., and Bo X., Economic analysis of power generation from floating solar chimney power plant. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, pp. 1736-749, 2009.
- [77] Papageorgiou C., Optimum design for solar power stations with floating solar chimneys. *Proceedings of the 32nd National Heat Transfer Conference* pp.763-72, 2004.
- [78] Zhou X., and 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, pp.400-407, 2009.
- [79] Bergman L., Lavine T., Incropera S A., P F., and Dewitt D., *Fundamentals on heat and mass transfer*, United States: John Wiley and Sons, 2012.
- [80] Berdahl P., Martin M., Emissivity of clear skies. *Solar Energy* 32 (5), pp.663–664. 1984.
- [81] Duffie JA., Beckman WA., *Solar Engineering of Thermal Processes*, second ed. Wiley Interscience, New York, 1991.