

République Algérienne Démocratique et Populaire

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

Ecole Nationale



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

Polytechnique

Département de Génie Mécanique

Mémoire de Master en Génie Mécanique

Thème

**Le stockage thermique
dans les centrales à cheminée solaire**

**Etudié par :
Abdeldjalil TAGHOURT**

**Proposé et dirigé par :
S. LARBI, Prof., ENP**

Promotion 2015

الملخص :

العمل المقدم في هذه المذكرة يركز أساسا على دراسة و تحليل أداء محطة توليد الطاقة الكهربائية ذات البرج الشمسي مزودة بنظام التخزين الحراري. تم من اجل ذلك الاستناد الى نموذج نظري رياضي (نموذج حمادي).. تم التأكد من صحة هذه النماذج عن طريق مقارنة نتائجها النظرية بنتائج تجريبية مأخوذة من المراجع المتوفرة. مكنتنا النتائج المتحصل عليها من فهم وبطريقة واضحة تأثير بعض العوامل كالأبعاد الهندسية، المعطيات الجوية، ونوعية مادة نظام التخزين الحراري على كفاءة المحطة. استنتجنا ان حساسية الأداء لهذه العوامل تختلف من عامل لآخر. تعتبر خلاصة هذا العمل نتائج ابتدائية يمكن استغلالها لتنصيب محطة توليد الطاقة الكهربائية ذات البرج الشمسي في منطقة ادرار.

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

Résumé :

Le travail présenté dans ce mémoire est relatif à l'analyse des performances énergétiques des centrales à cheminées solaires avec stockage thermique. La prédiction des performances a été établie théoriquement en se basant sur le modèle mathématique de Mr. Hammadi. Le modèle mathématique a été validé par la comparaison de ses résultats théoriques avec des résultats expérimentaux issus de la littérature. Les résultats obtenus ont permis de mieux comprendre l'influence de la variation de quelques paramètres techniques, la variation des conditions météorologiques et la variation des paramètres du système du stockage sur le fonctionnement des centrales à cheminée solaire. Ce travail peut être considéré comme une étude énergétique et technique préliminaire pour un projet d'implantation de centrales à cheminée solaire dans la région d'Adrar.

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

Abstract:

The present work is dedicated to the performance analysis of solar updraft tower power plants with thermal storage system implementation. The performances prediction is carried out according to Hammadi's mathematical model. Good agreement is observed between the results of this study and those obtained experimentally and theoretically from the literature review. Obtained results enable us to understand the influence of meteorological conditions, the thermal storage implementation parameters variation on solar tower power plants operating system. This work is considered as a technical and energetic preliminary study for solar updraft tower power plants setting up project in the region of Adrar.

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

Remerciements

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

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

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

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

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail

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

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

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

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

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

Merci à tous.

A. Taghourt

Tables des matières

Remerciements	3
Dédicaces	4
Tables des matières	5
Nomenclature	6
Introduction générale	8
I. Chapitre I : Etat de l'Art sur les Centrales à Cheminée Solaire	11
III.1. Etudes théoriques sur les CCS :	12
III.3. Etudes expérimentales :	15
III.4. Etudes économiques :	17
III.2. Etudes théoriques sur les CCS avec stockage :	18
II. Chapitre II : Modélisation Mathématique des Transferts Thermiques dans les Centrales à cheminée solaire	22
IV.1. Introduction	23
IV.2. hypothèses liées à ce modèle	24
IV.3. Equations de bilans énergétiques relatifs aux centrales cheminées solaires avec stockage thermique : (Modèle de Hammadi)	24
IV.4. Développement du modèle mathématique :	27
III. Chapitre III : Résultats et discussions	30
III.1. Introduction	31
III.2. Données météorologiques du site, objet de l'étude :	31
III.3. Analyse des performances énergétiques des CCS avec stockage thermique	33
III.3.1. Validation du modèle mathématique :	33
III.4. Effets de la variation des paramètres techniques sur la puissance produite :	34
III.4.1. Effet de la variation de la hauteur de la cheminée(Hs) :	37
III.4.2. Effet de la variation du diamètre du collecteur (Dcoll)	39
III.4.3. Effet de la variation de la hauteur de la cheminée (Ht) :	40
III.4.4. Effet de la variation du diamètre de la tour(Dt) :	42
III.4.5. Effet de la variation de la vitesse du vent (Uw) :	44
III.4.6. Effet du type du sol	46
III.4.7. Effet de la variation du matériau du stockage	48
Conclusion générale	50
Bibliographie	52

Nomenclature

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

V	Vitesse	m/s
r, z	Coordonnées	m

Indices

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

Lettres grec

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

Introduction générale

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

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

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

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

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

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

Il est à souligner que le 1^{ier} 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. [3] et d'autre part de bien comprendre la physique des phénomènes ayant lieu dans ces centrales. L'aspect relatif aux techniques de construction n'est pas à négliger pour la maîtrise de la construction d'autres types de centrales à grande échelle.

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

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

Afin de pouvoir mener à bien cette étude et analyser l'effet de quelques paramètres technique sur le stockage thermique et donc sur les performances énergétiques des centrales à cheminée solaire, nous avons structuré notre mémoire en trois chapitres principaux :

Le premier chapitre est dédié à une revue bibliographique décrivant les différents travaux de recherches sur les performances énergétiques des centrales à cheminée solaire en mettant l'accent sur le cas du stockage thermique.

Le deuxième chapitre concerne l'aspect modélisation mathématique des processus de transfert dans les centrales à cheminée solaire équipées d'un système de stockage. Y est décrit le modèle de Hammadi issu de la littérature.

Le troisième chapitre est relatif aux résultats et discussions. Dans ce chapitre est traité l'aspect performances des CCS avec stockage thermique. L'influence des conditions météorologiques et géométriques des CCS et du système de stockage sur la production d'électricité est analysée afin de pouvoir bien comprendre le fonctionnement de 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

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

Etat de l'Art sur les Centrales à Cheminée Solaire

III.1. Etudes théoriques sur les CCS :

Le travail pionnier de J. Schlaich [1] sur le concept de la CS pour l'exploitation de l'énergie solaire en vue de la production d'électricité, a été suivi par de nombreux travaux à caractères théoriques et / ou expérimentales pour la modélisation des CCS à grande échelle.

En effet, Schlaich et al. [2] et [3] ont étudié l'extrapolation des données expérimentales du prototype de Manzanares aux grandes centrales (5, 30 et 100 MW). En se basant sur un modèle mathématique, Schlaich a démontré qu'il n'existe pas de dimension optimale pour une cheminée solaire. Cependant si le coût de réalisation est pris en considération, la centrale peut être optimisée thermodynamiquement [2].

Une étude théorique simplifiée de la CCS a été décrite et des résultats de conception, de réalisation et de fonctionnement du prototype de Manzanares ont été présentés. Des considérations techniques et des données économiques de base pour de futures installations de CCS commerciales comme celle d'Australie ont été discutées. Les auteurs ont également proposé des solutions aux contraintes que peuvent rencontrer les CCS, tout en justifiant les avantages de tels systèmes.

Une étude fondamentale sur le prototype de la CCS espagnol a été réalisée par Haaf et al. [4] Dans leur article, les auteurs ont analysé brièvement le bilan énergétique, les critères de conceptions et l'analyse des coûts.

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

Mullet [5] a présenté une analyse pour déterminer l'efficacité globale de la cheminée solaire. Padki et Sherif [6] Et [7] ont mené des investigations sur la viabilité des CCS destinées à la production de l'énergie électrique à moyenne et grande puissance et la production d'énergie en lieu rural.

Padki et Sherif ont discuté les effets des paramètres géométriques sur les performances énergétiques de la CCS. Ils ont proposé un modèle analytique simple pour la prédiction des performances d'une CCS basé sur un modèle mathématique construit à partir des équations de continuité, de conservation de la quantité de mouvement et d'énergie, régissant l'écoulement unidimensionnel de l'air chaud dans la tour de la cheminée solaire.

Pasumarthi et Sherif [8] ont fait une étude pour démontrer la viabilité de la centrale à cheminée solaire comme technologie alternative, appropriée et adaptables à des zones climatiques chaudes telles que celles de la Floride. Un modèle mathématique a été élaboré pour estimer la température et la puissance développée par les cheminées solaires ainsi que l'étude de l'effet des conditions ambiantes et des dimensions structurelles sur la puissance de sortie. Des essais ont été effectués sur un modèle expérimental, conçu à cet effet et deux types de collecteurs ont été testés : l'élargissement de la base du collecteur et l'introduction d'un absorbeur intermédiaire.

Les températures expérimentales obtenues ont été trouvées plus élevées que les températures prédites théoriquement. Les auteurs ont justifié que l'une des raisons de ce comportement est dû au fait que les températures expérimentales rapportées sont les températures maximales atteintes à l'intérieur de la cheminée, tandis que le modèle théorique prédit la température moyenne de l'air.

Les mêmes auteurs [8] ont entrepris une étude en deux parties : la première, en vue de prédire les performances d'une CCS à grande échelle à Gainesville en Floride. Les auteurs ont présenté une étude théorique d'une cheminée solaire typique basée sur un modèle d'écoulement unidimensionnel pour évaluer l'effet des différents paramètres de fonctionnement et de construction sur la température de l'air, sa vitesse et la puissance produite par la cheminée solaire. Ces derniers, ont adopté le modèle simplifié de Betz pour la turbine dans la cheminée, ce qui est incorrecte, car le fonctionnement d'un aérogénérateur dans une cheminée solaire diffère de celle installée à l'extérieur.

Dans la deuxième partie, les auteurs ont présenté les résultats expérimentaux effectués sur un prototype de CS de démonstration à échelle réduite. Ils ont affirmé que la puissance produite par une cheminée solaire est directement proportionnelle au produit du gradient de température et du débit d'air.

L'augmentation de la puissance produite pourra être obtenue par augmentation de la surface de collecte ou par augmentation de la hauteur de la tour. Dans le cas où l'augmentation de la hauteur de la tour s'avère coûteuse, ou elle n'apporte pas une augmentation significative de débit, on a recours à d'autres artifices, tels que l'adjonction d'obstacles dans la conduite de passage d'air pour augmenter le débit d'écoulement. Le modèle mathématique proposé par ces auteurs est capable de prédire les performances de la centrale de Manzanares en Espagne avec une marge d'erreur de 20 % sur la vitesse d'écoulement et de 5 à 9% sur la puissance produite.

Yan et al. [9] 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. [10] ont présenté une analyse théorique d'une cheminée solaire fonctionnant en régime stationnaire et en convection naturelle laminaire. Afin de prédire le comportement thermo-hydrodynamique de l'air, des conditions aux limites thermiques ont été imposées à l'entrée, de manière à garantir un écoulement laminaire et stationnaire le long du dispositif. Le modèle mathématique établi a été résolu par la méthode des volumes finis en coordonnées généralisées.

Après avoir effectué une recherche bibliographique assez riche, les auteurs Bernardes et al. ont élaboré une analyse portant sur les cheminées solaires et visant le développement d'un modèle analytique et numérique permettant de décrire les performances des cheminées solaires. Ce modèle a été élaboré pour estimer la puissance de sortie des cheminées solaires ainsi que d'examiner l'effet de diverses conditions ambiantes et des dimensions structurelles caractéristiques sur la puissance développée.

Les résultats du modèle mathématique ont été comparés avec les résultats expérimentaux collectés sur la centrale de Manzanares, pour être ensuite utilisé pour prédire les performances caractéristiques des CCS à grande échelle à caractère commerciale. Ces résultats montrent que la hauteur de la cheminée, le facteur de chute de pression à la turbine, le diamètre et les propriétés optiques du collecteur sont des paramètres importants pour la conception des

cheminées solaires. Les auteurs ont déduit que la puissance maximale peut être atteinte lorsque le facteur de chute de pression à la turbine est égal à environ 0,97.

III.3. Etudes expérimentales :

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

Le premier prototype de centrale à cheminée solaire de 50 kW fut construit à Manzanares. Il était doté d'une cheminée métallique de 194,6 m de hauteur et de 0,00125 m d'épaisseur et un collecteur de rayon de 122 m couvert d'une toiture en PVC [11].

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 [11].

En 1983, Krisst [12] 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 [13].

En 1997, un dispositif de centrale à cheminée solaire a été mis en place par Pasurmarthi et Sherif [14] en Floride. Le collecteur de 9.15 m de diamètre avait une toiture en Lexan, la tour cheminée a 7,92 m de haut, son diamètre diminuait graduellement de 2,44 m à l'entrée à 0,61 m au sommet.

Un absorbeur en plaque d'aluminium a été prévu pour revêtir le terrain du collecteur (Configuration de type I). Deux améliorations ont été testées sur le collecteur de configuration type I, pour augmenter la puissance de sortie. Le collecteur de configuration de base de type I a été étendu pour former le collecteur de configuration Type II de 18,3 m de diamètre.

Du polyane noir clair avec une transparence d'environ 60% était utilisé comme absorbeur et toiture pour la partie d'extension du collecteur de configuration « Type II ». Un absorbeur en

toile intermédiaire a été introduit entre le toit et l'absorbeur en plaque d'aluminium à l'intérieur du collecteur de configuration de type II, pour améliorer le rendement de conversion du collecteur et former le collecteur de configuration de type III.

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

Une installation pilote de cheminée solaire constituée d'un collecteur d'air de 10 m de diamètre et une cheminée de 8 m de hauteur a été construite à Wuhan, en Chine [15] en 2002 et reconstruite à plusieurs reprises. Pour une structure mise à jour, le toit du collecteur et la cheminée étaient respectivement en verre de 4.8 mm d'épaisseur et en PVC. La différence de température entre la sortie du collecteur et la température ambiante pouvait atteindre en général 24,1 °C.

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

Basé sur le besoin d'un plan énergétique stratégique à long terme, Le Ministère des Sciences et de la Technologie du Botswana a conçu et construit une installation pilote de centrale à CS pour la recherche [16]. La CS a été fabriqué à partir de matériaux en polyester renforcé en fibre de verre, dont le diamètre intérieur était de 2 m et une hauteur de 22 m. Le toit du collecteur soutenu par un cadre en acier, est d'un verre clair de 5 mm d'épaisseur. L'aire du collecteur a atteint les 160m².

Le plancher de l'absorbeur, sous la toiture, était formé de deux couches de terre compactées d'environ 10 mm d'épaisseur, et une couche de pierres concassées. La couche de pierres concassées a été étalée sur la surface supérieure de la couche de sol compacté.

Au cours de la période allant entre 6 :00 h et 8:00 h, et, avec une augmentation de l'irradiation de 100 à 500 W/m², la vitesse de l'air augmente progressivement pour atteindre une valeur élevée et rester alors presque constante jusqu'à environ 14:00 h, malgré l'augmentation de l'insolation vers 12:00 h, à un pic maximum de 950 W/m². Environ 47% de l'énergie solaire incidente est absorbée et stockée par le sol et libéré plus tard lorsque la température locale diminue. La différence de température a augmenté de 2°C à 6H 00 à 7,5 °C à midi, et la vitesse de l'air a varié de 1 à 2,5 m / s avec l'installation du diffuseur et de 2 à 4 m / s avec diffuseur désinstallé.

Une installation électrique à CS a été construite avec une cheminée de 11 m de hauteur et 1 m de diamètre, sur le campus de l'Université Fédérale de Minas Gerais, à Belo Horizonte, Brésil [17].

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

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

III.4. Etudes économiques :

Les coûts des CCS de différentes capacités de production d'énergie et avec un collecteur fait du plastique ont été estimés par quelques chercheurs [3]. Bernardes, avec des différentes capacités de production d'énergie et avec un collecteur fait du plastique des CCS, a estimé le coût d'une CCS de 100 MW avec un toit du collecteur en plastique.

Weibing Li et al. [18] ont développé un modèle différent des modèles existants pour analyser le coût des CCS. Le modèle permet de calculer la valeur nette totale (VNT) et le prix

minimum de l'électricité dans chaque phase en divisant toute la période de service en quatre phases.

Les résultats ont montré que le prix minimum d'électricité dans la première phase est plus élevé que le prix du marché courant de l'électricité, mais le prix minimum dans les autres phases sont trop bas que le prix du marché courant. L'analyse indique que des avantages énormes des centrales cheminées solaire peuvent être incorporés en phases 2 - 4. En outre, l'étude de sensibilité menée par les auteurs a permis de montrer que la VNT est très sensible aux changements dans le prix de l'électricité et le taux d'inflation solaires.

Siva et al. [19] ont mis au point un modèle mathématique pour analyser le coût et le profit d'une centrale à cheminée solaire à base renforcé par le béton construite en Chine. En se basant sur ce modèle et des hypothèses pour les valeurs des différents paramètres, ils ont présenté un travail où ils ont calculé la valeur présente totale net (VPTN) et le prix minimum d'électricité en divisant la période totale de fonctionnement en quatre périodes.

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

Xinping Zhou et al. [20] ont présenté une analyse économique en analysant durant une période totale de service une centrale de 100 MW. Ils ont relevé que le coût est influé par plusieurs facteurs y compris les investissements, le coût d'opération et de la maintenance, la durée de vie de la centrale, le délai de récupération, le taux d'inflation, le taux minimum du revenu, le prix de vente d'électricité etc...

Papageorgious [21] a estimé le coût des composants d'une CCS de 100 MW en excluant certaines dépenses additionnels alors que Zhou and Yang [22] ont estimé le coût d'électricité d'une CCS supposée être installée au désert sur les hauts montagnes du nord-ouest de la chine en excluant également certaines dépenses.

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

Les études concernant l'effet du stockage au niveau des collecteurs des cheminées solaires qui mérite d'être mentionner étaient initialement introduites par Pasumarthi and Sherif [23] où

la performance du collecteur a été étudiée par l'extension de la base du collecteur et par l'introduction d'un absorbeur intermédiaire.

Zhou et al. [24] ont développé un modèle mathématique afin de comprendre le comportement du rendement de la centrale suivant différentes valeurs d'intensité de radiation solaire, de surface du collecteur et de hauteur de la cheminée. Ninic [25] a analysé différents types de collecteur en utilisant de l'air sec et humide.

Bonnelle [26] a suggéré l'implémentation d'un collecteur sous forme d'une structure de nervures. Cependant, une telle configuration doit montrer des avantages économiques et techniques afin d'être adopté.

Hedderwick [27] et Pretorius [28] ont étudié et discuté la distribution de la température dans le sol sous le collecteur.

Hammadi [29] a étudié l'effet du système de stockage thermique sur la production d'énergie de la centrale en montrant que la présence de la couche d'eau de stockage a engendré un déplacement de la position du pic de la courbe de production de la centrale loin de midi donnant une courbe de production plus lisse.

Une étude expérimentale conduite par Miqdam and Hussein [30] à Baghdâd a souligné l'effet du matériau de la base de la cheminée sur la température de l'air du collecteur. Trois types de bases ont été utilisés : béton, béton noir et caillou noir. Les résultats de comparaison ont montré que la plus haute différence en température a été obtenue pour les bases en cailloux noirs.

Zheng et al. [31] ont analysé les performances d'une cheminée solaire avec une couche de stockage énergétique en utilisant le gravier ($\rho=2555 \text{ kg/m}^3$, $C_p=814.8 \text{ J/Kg K}$ et $K=2.00 \text{ W/m.K}$) et le sol ($\rho=1700 \text{ kg/m}^3$, $C_p=2016 \text{ J/Kg K}$ et $K=0.78 \text{ W/m.K}$) et leurs effets sur la production d'énergie de la centrale.

Ming et al. [32] ont employé leur système de stockage énergétique hybride entre le sol et l'eau pour réduire les fluctuations de la génération d'énergie de la cheminée solaire.

Zhou et al. [33] ont choisi la paraffine comme matériau de stockage énergétique dans le collecteur. Ils ont pu réaliser que pour un fonctionnement continu de la centrale et dans les mêmes conditions de rayonnement solaire, la vitesse du courant d'air et la valeur maximum de production de la centrale ont marqué une augmentation.

Xu et al. . [34] ont effectué une simulation numérique d'une cheminée solaire avec une couche de stockage énergétique similaire au prototype espagnol. L'étude de Bernardes et al. [35] a fourni une analyse thermique et technique d'une centrale à cheminée solaire avec l'eau comme milieu de stockage. Leurs résultats ont montré que la hauteur de la cheminée, le diamètre et les propriétés optiques du collecteur sont des paramètres importants pour la conception d'une cheminée solaire pendant que les propriétés du sol et la présence de l'eau comme milieu de stockage ne présente aucune variation significative sur l'énergie produite mais sur l'énergie produite suivant le temps.

Bernardes [36] 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 $W s^{1/2}/K m^2$.

Pretorius et al. [28] ont réalisé des simulations sur les effets du stockage thermique en considérant le granite comme milieu de stockage. Pretorius and Kröger [37] ont analysé les effets de différents types de sol et de vitrage du toit du collecteur sur l'efficacité d'une centrale à cheminée solaire de grande échelle.

Ming et al. [32] ont effectué des simulations numériques pour analyser les caractéristiques du transfert thermique et l'écoulement d'air dans une centrale à cheminée solaire avec stockage d'énergie.

Sangi et al. [38] ont analysé les effets des dimensions du collecteur et ont étudié une centrale à cheminée solaire avec système de stockage d'énergie seulement sous des conditions stables.

Kreetz [39] a présenté un modèle numérique incluant le cas de l'utilisation de l'eau comme moyen de stockage d'énergie solaire dans le collecteur. Les calculs ont montré la possibilité d'un fonctionnement continu jour et nuit, de la CCS.

Deux méthodes de contrôle et d'amélioration de la puissance de sortie de la CCS ont été proposées : l'instauration d'un toit secondaire sous le premier toit du collecteur [40] et l'installation de système de stockage thermique. L'intégration de système de stockage thermique à eau a également révélé d'être un bon mécanisme pour le contrôle et l'amélioration de la puissance de sortie. Ces CCS ont donné un profil de sortie journalier beaucoup plus uniforme par rapport à une CCS sans un tel système de stockage.

Chapitre II

Modélisation mathématique des transferts thermiques dans les CCS

Modélisation Mathématique des Transferts Thermiques dans les Centrales à Cheminée Solaire avec système de Stockage Thermique

IV.1. Introduction :

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

Les hypothèses communes à l'ensemble des modèles mathématiques sont :

- Le régime est stationnaire ;
- Les éléments du collecteur sont considérés à une température moyenne ;
- La couverture du collecteur est opaque aux radiations infrarouges ;
- Les propriétés physiques des composants du système (collecteur, cheminée et aéro-turbine) sont indépendantes de la température ;
- L'effet de la poussière, des impuretés et de l'ombre sur l'absorbeur sont négligeables ;
- Le collecteur est considéré comme étant la superposition de deux surfaces planes ;
- L'écoulement dans le collecteur est considéré comme un écoulement entre deux plans parallèles ;
- L'effet d'évaporation dans le collecteur est négligeable ;
- L'écoulement est axisymétrique ;
- Le gradient transversal de la température dans le collecteur est négligeable ;
- L'air est considéré comme étant un gaz parfait ;
- Les transferts thermiques conductifs dans le sens de l'écoulement sont négligeables ;
- Le ciel est considéré comme corps noir ;
- L'unique gain de chaleur dans le système est le gain net acquis dans le collecteur ;
- Les pertes par frottement dans le collecteur et la cheminée sont considérées négligeables.

IV.2. hypothèses liées à ce modèle

Plus les hypothèses communes à l'ensemble des modèles, ce modèle considère les points suivants :

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

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

Où :

$$\beta = -\frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_\rho \quad (4.2)$$

IV.3. Equations de bilans énergétiques relatives aux centrales cheminées solaires avec stockage thermique : (Modèle de Hammadi [29])

Le bilan énergétique sur le collecteur donne :

$$\alpha G A_{\text{coll}} - h_i A_{\text{coll}} (T_s - T_a) = m_s C_p \frac{dT_s}{dt} \quad (4.3)$$

Avec :

$$m_s = r_s A_{\text{coll}} H_s \quad (4.4)$$

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

$$h_i A_{\text{coll}} (T_s - T_a) - h_\infty A_{\text{coll}} (T_a - T_\infty) = m_a C_{p_a} (T_{a,o} - T_{a,i}) \quad (4.5)$$

Avec :

$$T_a = \frac{(T_{a,o} + T_{a,i})}{2} \quad (4.6)$$

La figure II.1 montre le modèle physique d'une CCS avec stockage thermique.

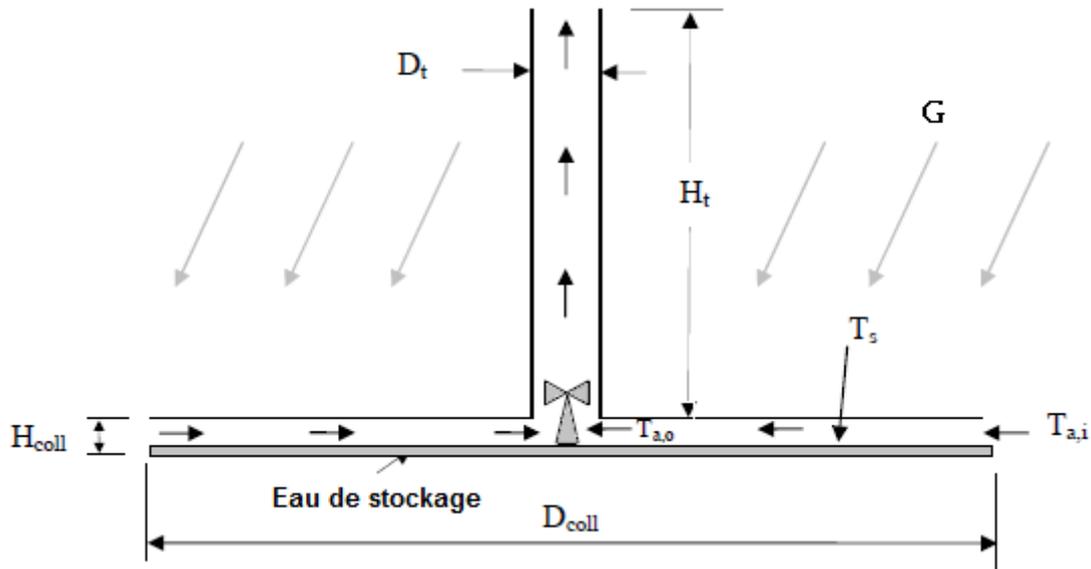


Figure II-1 Modèle physique d'une CCS avec stockage thermique.

Le coefficient de transfert thermique à l'intérieur du collecteur est donné par une corrélation fournie par Gnielinski [41] valide pour les conduites lisses pour un large intervalle de valeurs de nombre de Reynolds, y compris la région de transition. Il est exprimé par :

$$h_i = \frac{(f/8)(Re - 1000)Prk}{1 + 12.7\sqrt{f/8} \left(Pr^{\frac{2}{3}} - 1 \right) D_h} \quad (4.7)$$

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

$$f = [0.79 \ln(Re) - 1.64]^{-2} \quad (4.8)$$

Cette corrélation est valide pour :

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

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

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

$$D_h = 2 \cdot H_{coll} \quad (4.9)$$

De l'équation de continuité, on déduit :

$$\dot{m}_a = \rho_{a,o} \frac{\pi}{4} D_t^2 u_t = \rho_a \pi D_{coll} H_{coll} u_{coll} \quad (4.10)$$

Où :

$$\rho_a = \frac{\rho_{a,i} + \rho_{a,o}}{2} \quad (4.11)$$

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

$$\bar{u}_{coll} = \frac{\dot{m}_a}{2\pi\rho_a(r_{coll} - r_t)} \int_{r_t}^{r_{coll}} \frac{dr}{r} = \frac{\dot{m}_a}{2\pi\rho_a(r_{coll} - r_t)} \ln \frac{r_{coll}}{r_t} \quad (4.12)$$

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

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

$$h_\infty = 5.7 + 3.8u_w \quad (4.13)$$

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

$$u_t = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho_{a,o}}} \quad (4.14)$$

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

$$\Delta p = g \int_0^{H_t} (\rho_{a,o} - \rho_\infty) dH_t = g(\rho_{a,o} - \rho_\infty) H_t \quad (4.15)$$

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

$$u_t = \sqrt{\frac{2g(T_{a,o} - T_\infty)H_t}{T_\infty}} \quad (4.16)$$

La puissance électrique produite est ainsi donnée par :

$$P_e = \frac{1}{3} \eta_{wt} \rho_{a,o} A_t u_t^3 \quad (4.17)$$

IV.4. Développement du modèle mathématique :

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

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

$$\alpha G A_{coll} - h_i A_{coll} \left(T_s - \frac{T_{a,o} - T_{a,i}}{2} \right) = \rho_s H_s A_{coll} C_{ps} \frac{dT_s}{dt} \quad (4.18)$$

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

$$h_i A_{coll} \left(T_s - \frac{T_{a,o} - T_{a,i}}{2} \right) - h_{\infty} A_{coll} \left(\frac{T_{a,o} - T_{a,i}}{2} - T_{\infty} \right) = m_a C_{pa} (T_{a,o} - T_{a,i}) \quad (4.19)$$

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

$$T_{a,o} = \frac{h_i A_{coll} \left(T_s - \frac{T_{a,i}}{2} \right) - h_{\infty} A_{coll} \left(\frac{T_{a,i}}{2} - T_{\infty} \right) + m_a C_{pa} T_{a,i}}{m_a C_{pa} + \frac{h_i A_{coll}}{2} + \frac{h_{\infty} A_{coll}}{2}} \quad (4.20)$$

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

$$\frac{dT_s}{dt} = \frac{\alpha G}{\rho_c * \rho_s * H_s} - \frac{h_i}{\rho_c * \rho_s * H_s} \left[T_s - \frac{\left(\frac{m_a * c_{pa}}{A_{coll}} \right) + \frac{1}{2} (h_i * T_s + h_{\infty} * T_{\infty})}{\left(\frac{m_a * c_{pa}}{A_{coll}} \right) + \frac{1}{2} (h_i + h_{\infty})} \right] \quad (4.21)$$

Remarque :

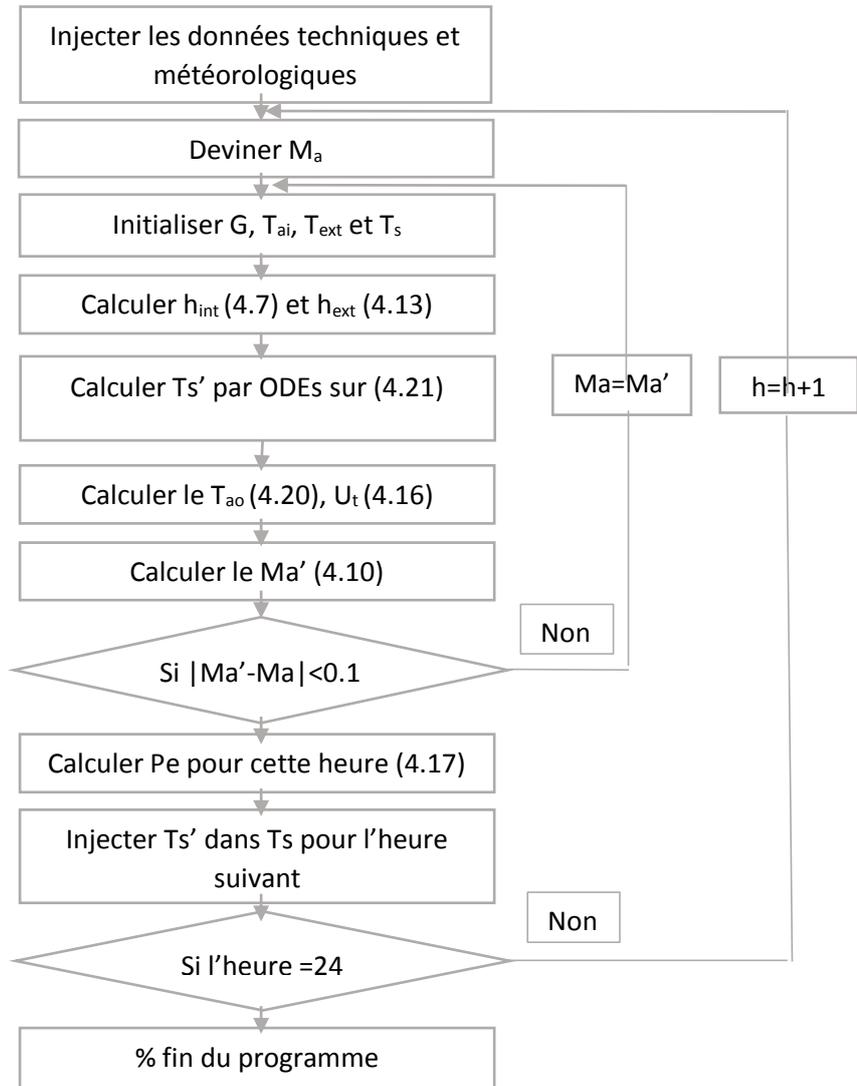
Un module appelé **ODEs** (Ordinary Differential Equation solver) sur le logiciel Matlab va être utilisé pour la résolution de cette équation différentielle.

L'algorithme de la procédure de résolution est :

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

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<j<24 faire %heure de la journée
7-	Affecter à Ma : # %deviner une valeur
8-	répéter %début do...while
9-	Initialiser Tai, Text, G, Ts
10-	Affecter à hint : l'équation (4.7)
11-	Affecter à hext : l'équation (4.13)
12-	Affecter à Ts' : ODEs [l'équation (4.21)]
13-	Affecter à Tao : l'équation (4.20)
14-	Affecter à Ut : l'équation (4.16)
15-	Affecter à Ma' : l'équation (4.10)
16-	Tant que (Ma - Ma')>0.1 %fin do...while
17-	Affecter à Pe : l'équation (4.17)
18-	Affecter à Ts : Ts' %pour l'heure suivant
19-	Affecter à j : j+1 %passage à l'heure suivant
20-	dessiner le graphique
Fin du programme	

L'organigramme de la procédure de résolution :



Chapitre III

Modélisation mathématique des transferts thermiques dans les CCS

Résultats et discussions

III.1. Introduction

Le présent chapitre est relatif à l'analyse des performances énergétiques des centrales à cheminée solaire (CCS). Un type de centrales a été analysé : les centrales avec stockage thermique. Les analyses des performances énergétiques de ces centrales sont basées sur le modèle mathématique vu au chapitre II. 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 Hammadi [29]. Les résultats obtenus ont été validés expérimentalement et théoriquement par d'autres issus de la littérature.

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

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

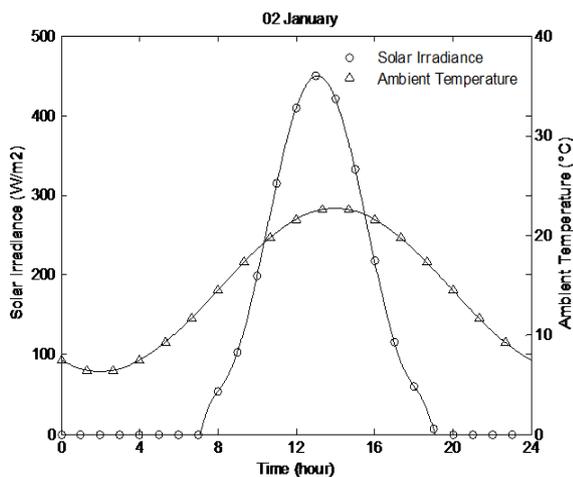


Figure III-1 Variation de l'irradiation solaire et la température ambiante avec le temps.

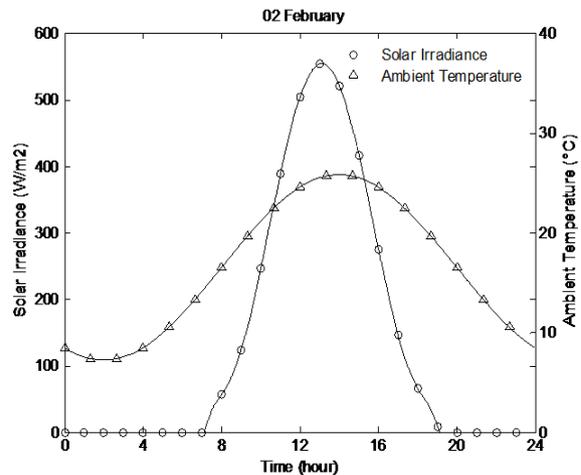


Figure III-2 Variation de l'irradiation solaire et la température ambiante avec le temps

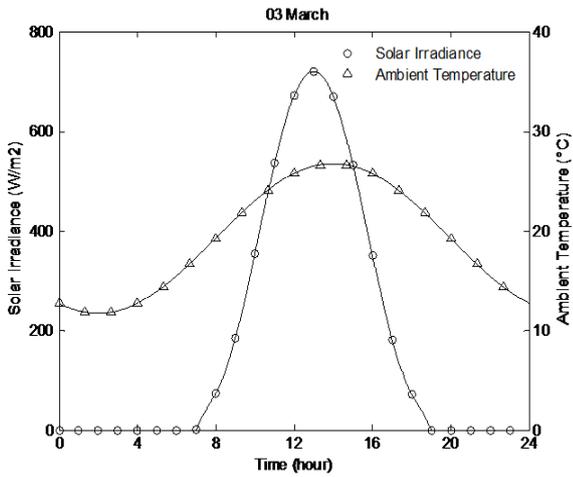


Figure III-3. Variation de l'irradiation solaire et la température ambiante avec le temps.

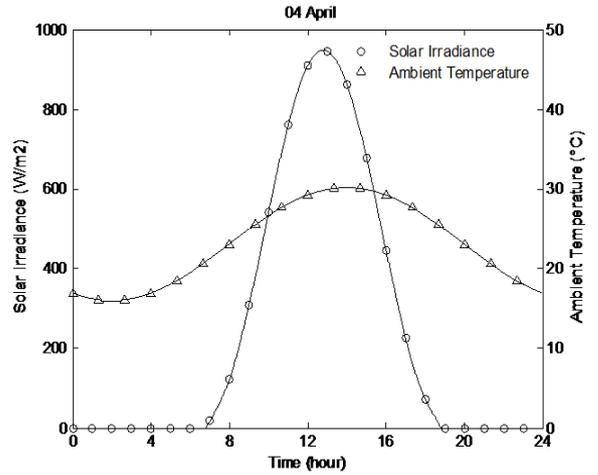


Figure III-4. Variation de l'irradiation solaire et la température ambiante avec le temps.

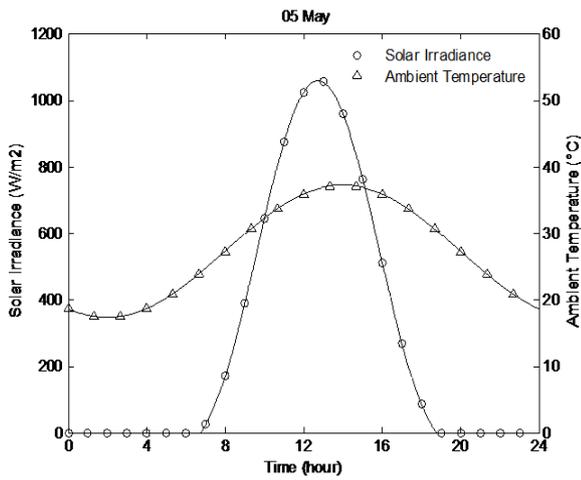


Figure III-5. Variation de l'irradiation solaire et la température ambiante avec le temps.

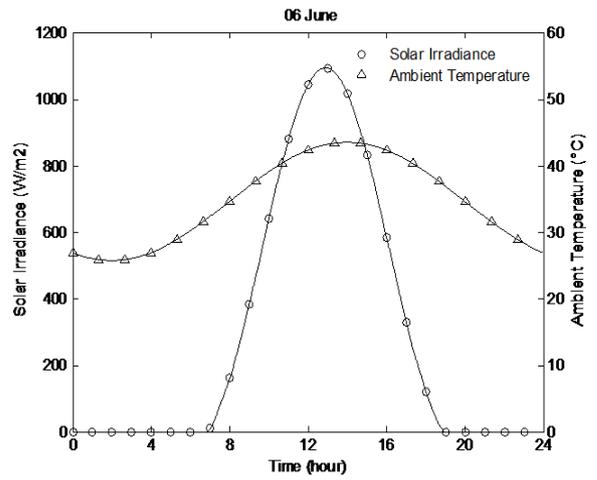


Figure III-6. Variation de l'irradiation solaire et la température ambiante avec le temps.

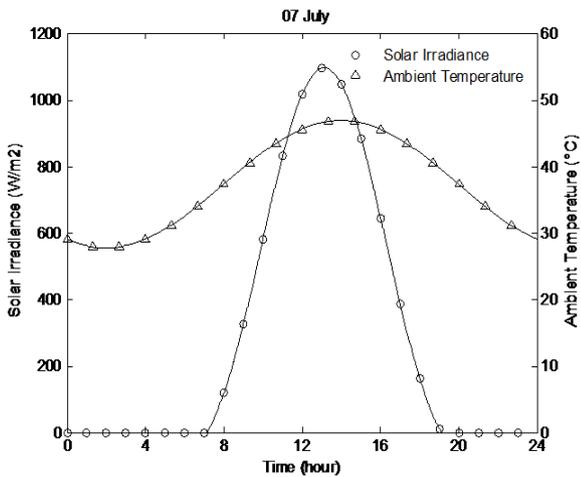


Figure III-7. Variation de l'irradiation solaire et la température ambiante avec le temps.

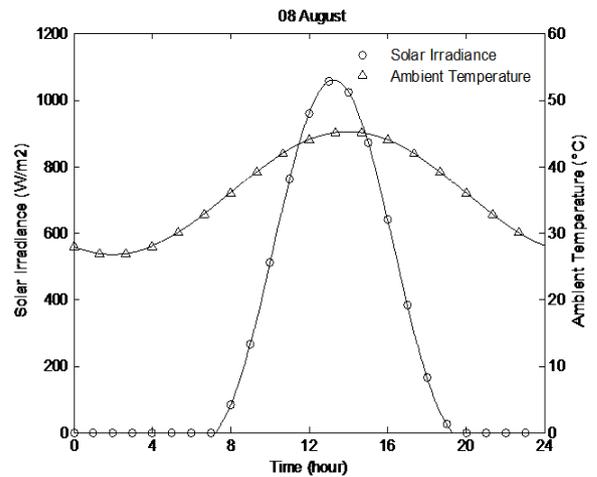


Figure III-8. Variation de l'irradiation solaire et la température ambiante avec le temps.

III.3. Analyse des performances énergétiques des CCS avec stockage thermique

III.3.1. Validation du modèle mathématique:

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

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

Les données techniques injectées dans le programme MATLAB, déterminées suivant une température de fonctionnement moyenne de 300K sont [41]:

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

Le modèle mathématique a été validé suivant deux données expérimentales :

- Suivant la température d'air à la sortie du collecteur fournie par Haaf [42] ;
- Suivant la puissance électrique produite fournie par Schlaich [3].

III.3.1. 1. Validation par la température de l'air à la sortie du collecteur

Comme il est déjà mentionné, les données météorologiques du site de Manzanares du 2 septembre 1982 (voir figure 3.9.a) fournies par Haaf [42] ont été utilisées pour la validation du modèle mathématique. Les résultats générés par le programme MATLAB ont été comparés aux résultats expérimentaux du prototype de Manzanares de la même journée.

La figure (3.9.b) montre la comparaison entre les résultats théoriques et expérimentaux à la sortie du collecteur durant la journée. Il est à noter que le modèle mathématique de Hammadi, 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 pour l'ensemble des résultats expérimentaux de la journée. Les résultats théoriques de Haaf [42] présentent un large écart par rapport aux résultats expérimentaux pendant que nos résultats représentent un écart maximal de 4°C.

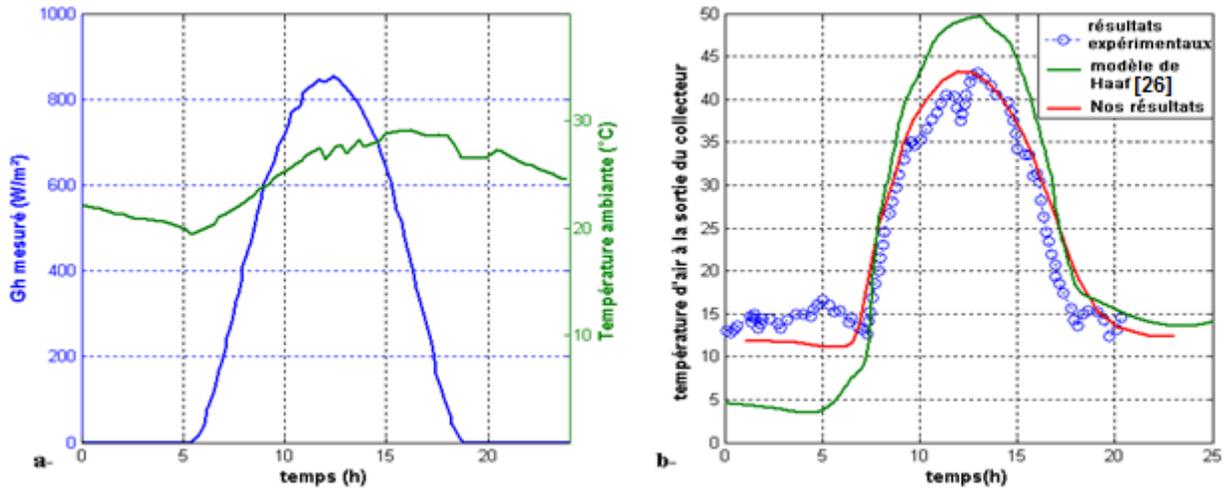


Figure 3. 9. (a). Données météorologiques du 2 septembre 1982 du site de Manzanares
(b) : Evolution au cours du temps de la température de l'air à la sortie du collecteur.

III.4. Effets de la variation des paramètres techniques sur la puissance produite :

Dans cette partie de travail, on s'intéresse à analyser l'effet de la variation des paramètres techniques sur la production électrique des centrales à cheminée solaire équipées d'un système de stockage thermique située dans la région d'Adrar.

Nous allons réaliser cette analyse en considérant les points suivant :

i. Quatre types différents des CCS de grande échelle :

- a- Une centrale de 50 MW (pour 50 000 foyers) ;
- b- Une centrale de 100 MW (pour 100 000 foyers) ;
- c- Une centrale de 150 MW (pour 150 000 foyers) ;
- d- Une centrale de 200 MW (pour 200 000 foyers) ;

ii. Deux mois différents :

- a- Le mois le plus ensoleillé : mois de juillet ;
- b- Le mois le moins ensoleillé : mois de décembre.

iii. Deux données météorologiques du site d'Adrar :

- a- La température ambiante journalière (figure 3.10a et 3.10b);
- b- Le rayonnement solaire journalier (figure 3.10a et 3.10b).

iv. Variation de sept paramètres techniques différents :

- a- La hauteur du stockage ;
- b- Le diamètre de la cheminée ;
- c- La hauteur de la cheminée ;
- d- Le rayon du collecteur ;
- e- La vitesse du vent ;
- f- Le type du sol ;
- g- Le type de matériau de stockage.

La figure 3.10 représente les données météorologiques qui vont être utilisées pour cette étude.

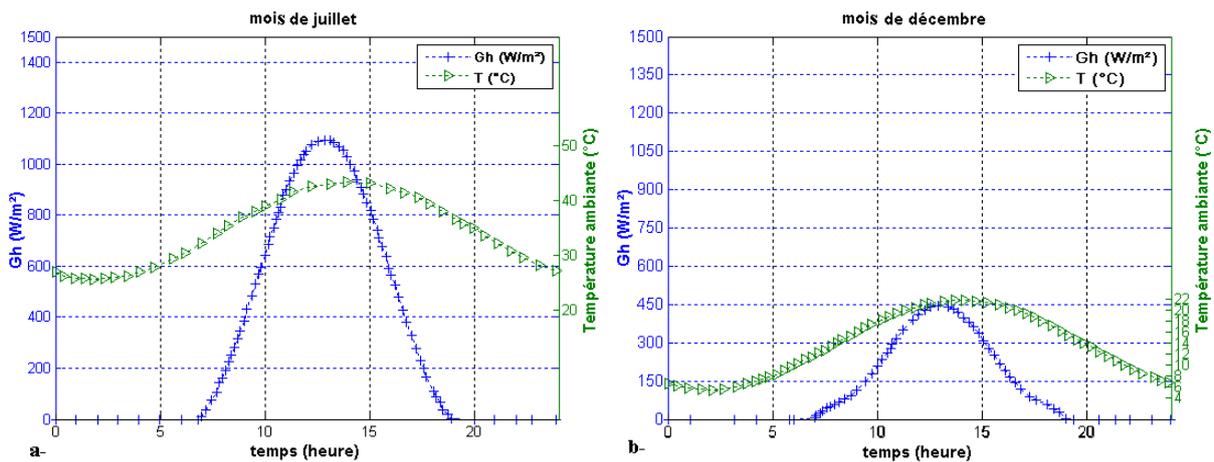


Figure 3.10. Données météorologiques d'Adrar pour les mois de juillet et décembre.

Les dimensions des 4 centrales prises en considération pour cette étude sont données par le tableau 3.1.

Tableau 3.1. Dimensions des 4 CCS analysées avec les puissances correspondantes.

	50MW	100MW	150MW	200MW
Dcoll	3000	4000	5000	5000
Dt	80	100	100	150
Ht	600	700	700	1000

Vu que cette étude correspond aux 4 CCS dont le comportement est le même suivant la variation des paramètres, à l'exception de l'ordre de grandeur de la puissance produite pendant la journée, nous allons présenter les résultats de la manière suivante :

- Les résultats de la centrale de 200MW sont présentés sur des graphiques.
- 4 résultats clés -figure 3.11- sont présentés sur des tableaux pour le reste des centrales, ces résultats clés sont les suivants :
 - i. Production maximale de la journée désignée par 'max' ;
 - ii. Production minimale de la journée désignée par 'min' ;
 - iii. Production à minuit –pour montrer l'effet du stockage- désignée 'à 00h' ;
 - iv. Production journalière moyenne désignée par 'Moy.jr' ;

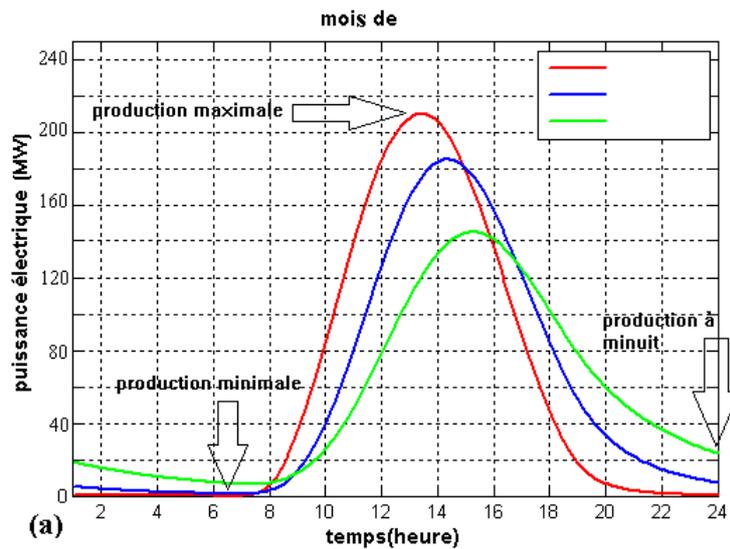


Figure 3.11. Les 3 résultats clés choisis pour cette étude.

III.4.1. Effet de la variation de la hauteur de la cheminée(Hs) :

Notre modèle considère le volume de stockage comme une poche remplie de fluide de stockage, d'une hauteur H_s et d'une surface égale à celle du collecteur, posée directement sur le sol sous le collecteur. Les deux figures (3.12a) et (3.12b) représentent la puissance produite durant les deux mois juillet et décembre d'une CCS de 200MW pour trois épaisseurs de stockage : 5cm, 15cm et 30cm.

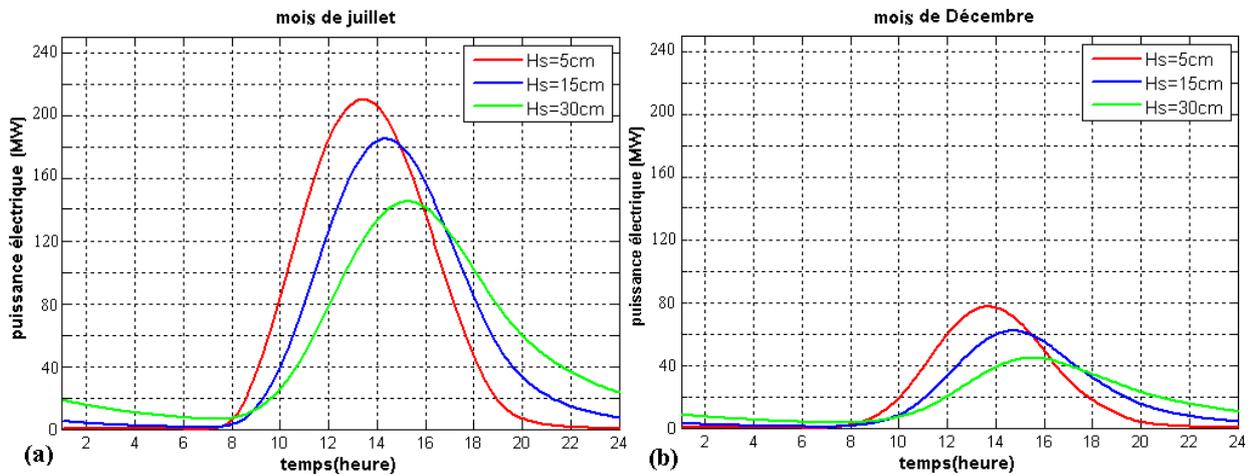


Figure 9.12: Effet de la variation du H_s sur le fonctionnement d'une CCS de 200MW.

La figure 3.12 montre que plus la hauteur du stockage est élevée (donc nécessairement la quantité du matériau du stockage est plus grande) plus la puissance électrique produite aux extrémités des courbes est grande (période de non-enseulement). Il est à noter que l'effet du stockage est plus apparent pour les périodes les mieux ensoleillées (le mois du juillet).

Une sévère atténuation du pic et une augmentation du 'min' accompagnant l'augmentation de la hauteur du stockage sont notées pour toutes les CCS. On déduit que le stockage mène au lissage de la courbe de production. Cela peut être expliqué par le fait que plus la quantité du stockage est grande, plus la fraction d'énergie thermique emmagasinée est grande, moins est l'énergie transférée à l'air chauffé. Ainsi, moins est l'énergie thermique convertie en électricité par unité de temps pendant les périodes ensoleillées.

Le tableau 3.2 résume les résultats de la variation de la hauteur du stockage pour les quatre CCS durant les mois de juillet et décembre. Pour ce tableau, trois épaisseurs de stockage sont prises en considération : 5cm, 10cm et 15cm.

Tableau 3.1: Effet de la variation du Hs pour les 4 CCS (puissance électrique en MW)

	Hs	Juillet			Décembre		
		5cm	10cm	15cm	5cm	10cm	15cm
50MW	max	52	48	43	18	16	14
	Min	0.003	0.096	0.404	0.002	0.061	0.236
	A 00h	0.131	1	2.6	0.081	0.583	1.3
	Moy.jr	14	13.85	13.6	4.6	4.5	4.5
100MW	max	107.16	99.72	89.04	38.4	32.74	28.5
	Min	0.0067	0.21	0.88	0.004	0.13	0.5
	A 00h	0.28	2.26	5.55	0.17	1.24	2.7
	Moy.jr	28.85	28.3	27.82	9.59	9.29	9.06
150MW	Max	150.83	132.05	115.98	51.57	42.14	34.82
	Min	0.016	0.51	2.01	0.01	0.29	1.02
	A 00h	0.64	4.87	11.04	0.36	2.41	4.88
	Moy.jr	40.34	39.17	38.22	12.94	12.37	11.96
200MW	max	264.48	254.84	237.51	97.84	90.04	79.89
	Min	0.007	0.25	1.09	0.005	0.17	0.71
	A 00h	0.37	3.09	8.13	0.25	1.89	4.62
	Moy.jr	71.19	70.47	69.74	24.48	24.05	23.66

Du tableau 3.2, on peut noter par comparaison entre les 4 CCS qu'il n'est pas nécessaire qu'une CCS de grandes dimensions à une efficacité de stockage plus grande : la centrale de 150 MW produit plus de 11MW à minuit pour une Hs de 15cm pendant que celle de 200 MW ne dépasse pas les 8,5MW pour la même heure, le même mois et la même Hs. Cela revient à une autre donnée technique qui est le diamètre du collecteur des CCS et qui va être étudiées en ce qui va suivre.

Du tableau 3.2, on note aussi que la puissance électrique moyenne journalière reste presque constante pour toutes les valeurs de Hs et toutes les CCS. La légère décroissance remarquée suivant la croissance du Hs revient au fait que le matériau de stockage emmagasine encore une fraction de l'énergie. Cette remarque mène à déduire qu'avec le changement de la quantité de matériau du stockage, non pas la quantité d'énergie produite qui change, mais seule la distribution de la production d'électricité qui change et qui se déplace vers les périodes non-enseillées.

III.4.2. Effet de la variation du diamètre du collecteur (Dcoll)

Le diamètre du collecteur représente un paramètre fondamental vu le coût nécessaire pour sa construction et pour la superficie des terres allouée pour son installation vue que le coût du m² des parcelles de terrains varie d'une région à une autre (le m² des terres agricoles est très cher), une optimisation de ce paramètre est donc nécessaire pour réduire les dépenses.

Nous allons ainsi essayer de comprendre l'effet de la variation de ce paramètre sur la production d'électricité des CCS équipée d'un système de stockage thermique.

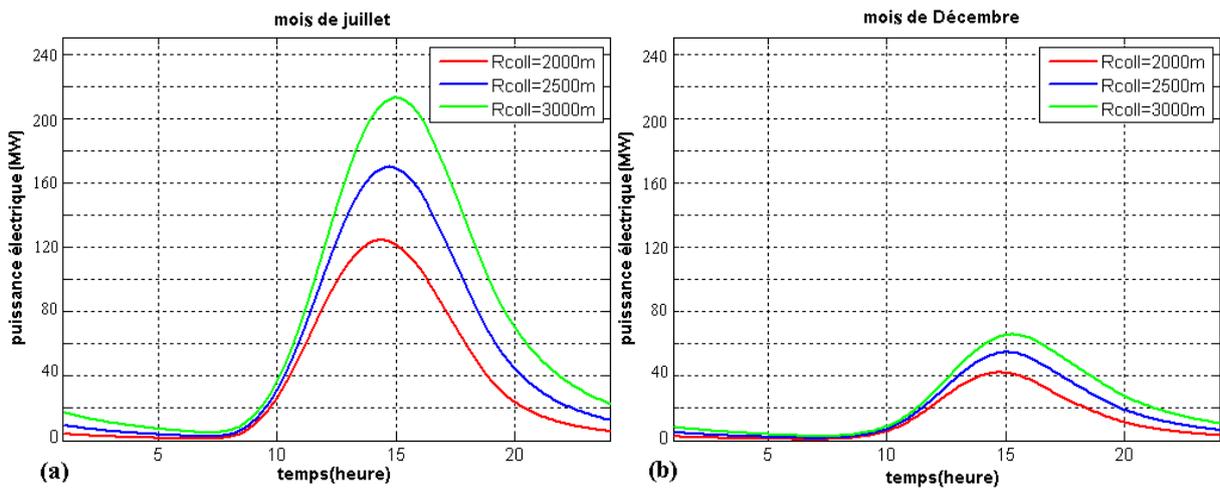


Figure 3.13. Effet de la variation du Rcoll sur le fonctionnement d'une CCS de 200MW.

Les figures (3.13.a) et (3.13.b) montrent les résultats obtenus pour la centrale de 200 MW. Pour cette analyse, nous allons prendre trois rayons différents pour chaque centrale.

Le tableau 3.3 résume les résultats de la variation du diamètre du collecteur pour les quatre CCS durant les deux mois juillet et décembre. Pour ce tableau, trois valeurs d'élargissements potentiels sur le diamètre initial du collecteur sont proposées : un élargissement de 300m, de 600m et de 900m.

Tableau 2.3. Effet de la variation du Dcoll pour les 4 CCS (puissance électrique en MW)

	Dcoll	Juillet			Décembre		
		+300m	+600m	+900m	+300m	+600m	+900m
50MW	max	49.4	54.7	59.7	15.4	16	17.8
	Min	0.6	0.81	1.1	0.33	0.42	0.54
	A 00h	3.5	4.6	5.8	1.7	2.11	2.55
	Moy.jr	15.7	17.7	19.7	5	5.61	6.17

100MW	max	97.60	105.76	113.50	30.57	32.49	34.26
	Min	1.16	1.49	1.87	0.64	0.79	0.96
	A 00h	7.01	8.64	10.42	3.37	4	4.65
	Moy.jr	30.95	34.08	37.19	9.96	10.83	11.68
150MW	Max	123.15	129.91	136.27	36.41	37.87	39.23
	Min	2.45	2.92	3.44	1.19	1.38	1.57
	A 00h	12.98	15.02	17.14	5.55	6.22	6.9
	Moy.jr	41.29	44.30	47.25	12.77	13.55	14.3
200MW	max	257.56	277.15	296.2	86.08	92.05	97.7
	Min	1.4	1.77	2.2	0.9	1.1	1.3
	A 00h	10.1	12.35	14.8	5.6	6.6	7.8
	Moy.jr	76.69	83.76	90.93	25.81	27.97	30.13

La figure 3.13 et le tableau 3.3 montrent que le rayon du collecteur influe directement sur la production d'électricité moyenne et instantanée journalière. On peut noter le même effet pour les quatre types de CCS étudiées pour les mois de juillet et de décembre, plus le rayon du collecteur est élevé plus la puissance électrique journalière produite augmente considérablement.

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

De la figure 3.13 on note que l'élargissement de la surface du collecteur est accompagné d'une augmentation de la puissance électrique produite. On peut déduire que le rayon du collecteur ne peut pas être optimisé en terme surface/production d'électricité, est l'investissement mis pour la CCS est le facteur à prendre en considération pour la décision de la valeur de ce paramètre.

III.4.3. Effet de la variation de la hauteur de la cheminée (Ht) :

La hauteur de la cheminée est aussi considérée comme l'un des paramètres essentiels entrant dans l'étude de faisabilité de la construction des CCS. Une cheminée très élevée nécessitera un investissement colossal, une optimisation de cet paramètre est à donc nécessaire.

Nous allons essayer de comprendre l'effet de la variation de ce paramètre sur la production d'électricité des CCS équipée d'un système de stockage thermique.

Les figures (3.14.a) et (3.14.b) représentent les résultats pour la centrale de 200MW. Pour cette analyse, nous allons prendre trois hauteurs différentes pour chaque centrale.

Le tableau 3.4 résume les résultats de la variation de la hauteur de la cheminée pour les quatre CCS durant les mois de juillet et décembre. Pour ce tableau, trois valeurs d'élévations potentielles sur la hauteur initiale de la cheminée sont proposées : une élévation de 200m, de 300m et de 400m.

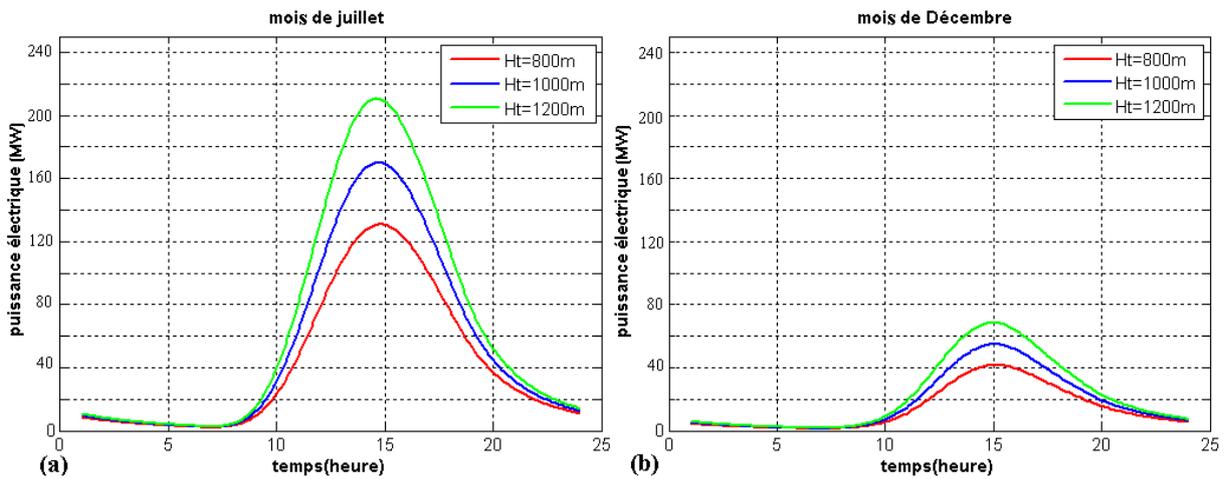


Figure 3.14. Effet de la variation du Ht sur le fonctionnement d'une CCS de 200MW.

La figure 3.14 et le tableau 3. 4 montrent que la production d'électricité journalière est liée directement à la hauteur de la cheminée.

On peut noter le même effet pour les quatre types de CCS étudiées pour les mois de juillet et décembre : plus la hauteur de la cheminée augmente plus la puissance électrique journalière produite augmente considérablement.

Tableau 3.4. Effet de la variation du Ht pour les 4 CCS (puissance électrique en MW)

	Ht	Juillet			Décembre		
		+200m	+300m	+400m	+200m	+300m	+400m
50MW	max	60,9	70	79,29	20	23,17	26,32
	Min	0,47	0,49	0,52	0,3	0,302	0,321
	A 00h	3,11	3,34	3,57	1,63	1,78	1,9
	Moy.jr	18,7	21,35	23,9	6,2	7,1	8

100MW	max	119.28	134.67	150.56	38.91	44.27	49.73
	Min	1	1.05	1.1	0.59	0.63	0.67
	A 00h	6.55	7	7.43	3.38	3.66	3.93
	Moy.jr	36.88	41.48	46.11	12.14	13.71	15.29
150MW	Max	157.84	179.38	201	48.21	55.20	62.36
	Min	2.35	2.5	2.64	1.23	1.34	1.43
	A 00h	13.41	14.51	15.56	6.13	6.73	7.32
	Moy.jr	51.14	57.73	64.39	16.19	18.37	20.57
200MW	max	237.5	320	347.91	98.8	108.38	118.02
	Min	1.093	1.21	1.24	0.78	0.81	0.84
	A 00h	8.1	9.39	9.77	5.21	5.49	5.75
	Moy.jr	69.74	92.7	100.4	29.01	31.71	34.43

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

De la figure 3.14 et le tableau 3.4, on note que l'élévation de la cheminée est accompagnée d'une augmentation inconditionnée de la puissance électrique produite. On peut déduire que la hauteur de la cheminée ne peut pas être optimisée en terme hauteur/production, est seulement l'investissement décidera sa valeur.

III.4.4. Effet de la variation du diamètre de la tour(Dt) :

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

Les figures (3.15.a) et (3.15.b) représentent les résultats pour la centrale de 200 MW. Pour cette analyse, nous allons prendre trois diamètres différents pour chaque centrale.

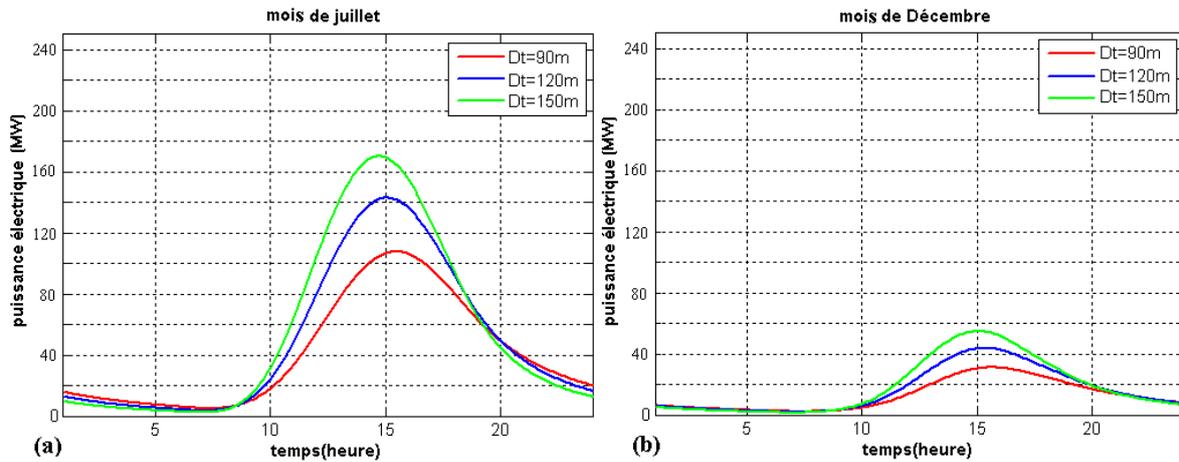


Figure 3.15. Effet de la variation du Dt sur le fonctionnement d'une CCS de 200 MW.

Le tableau 3.5 résume les résultats de la variation du diamètre de la cheminée pour les quatre CCS durant les mois de juillet et décembre. Trois valeurs d'élargissements potentiels sur le diamètre initial de la cheminée sont proposées : un élargissement de 30m, de 60m et de 90m.

La figure 3.16 et le tableau 3.5 montrent que la production d'électricité journalière est liée directement au diamètre de la cheminée. On peut noter le même effet pour les quatre types de CCS étudiés pour les mois de juillet et décembre.

Plus le diamètre de la cheminée est grand plus le sont les puissances, électrique moyenne et instantanée journalière, produite.

Tableau 3.3: Effet de la variation du Dt pour les 4 CCS (puissance électrique en MW).

	Dt	Juillet			Décembre		
		+30m	+60m	+90m	+30m	+60m	+90m
50MW	max	53,4	58,8	61,75	18,08	21,14	23,12
	Min	0,197	0,1	0,061	0,133	0,077	0,04
	A 00h	1,5	0,94	0,611	0,9	0,605	0,41
	Moy.jr	15,44	16,5	17,16	5,28	5,79	6,12
100MW	max	105.84	117.16	124.03	35.56	40.87	45.17
	Min	0.5	0.29	0.18	0.32	0.21	0.13
	A 00h	3.7	2.49	1.73	2.09	1.53	1.12
	Moy.jr	31.14	33.24	34.65	10.55	11.54	12.23
150MW	Max	142.81	163.85	179.17	46.25	54.97	61.63
	Min	1.27	0.81	0.53	0.75	0.52	0.36
	A 00h	8.23	5.94	4.32	4.19	3.34	2.61
	Moy.jr	44.33	48.38	51.19	14.53	16.36	17.68

200MW	max	259.81	274.21	283.6	90.24	99.09	105.47
	Min	0.69	0.45	0.315	0.48	0.33	0.24
	A 00h	5.76	4.17	3.09	3.52	2.68	2.07
	Moy.jr	73.87	76.78	78.92	25.61	27.02	28.08

Cela revient essentiellement au débit d'air ascendant. Puisque la valeur de ce dernier augmente avec l'augmentation de la valeur du diamètre de la cheminée, ce qui se traduit en une augmentation de la vitesse de l'air à l'intérieur de la cheminée et donc de son énergie cinétique qui va être convertie en énergie électrique. La figure 3.16 et le tableau 3.5 montrent aussi que la quantité d'énergie emmagasinée diminue avec l'élargissement du diamètre de la cheminée. Cela revient au fait que cet élargissement est accompagné par une augmentation du débit qui implique une augmentation de la vitesse d'écoulement d'air entre le collecteur et la poche de stockage. Ainsi, le transfert thermique convectif depuis le matériau de stockage vers l'air augmente et la quantité d'énergie emmagasinée diminue.

Il est à noter aussi que l'augmentation linéaire du diamètre de la cheminée est accompagné d'une augmentation plus en plus lente de la production d'électricité de CCS. On peut déduire que le diamètre de la cheminée a une limite pour laquelle la puissance produite n'augmente plus, on déduit que le diamètre est un paramètre à optimiser en terme de production électrique et puis en terme de l'investissement mis en disposition.

III.4.5. Effet de la variation de la vitesse du vent (U_w) :

L'étude de l'implantation d'une CCS dans un site quelconque doit prendre en considération plusieurs paramètres différents dont la vitesse du vent fait partie. Si on se trouve devant deux sites ayant presque le même taux d'ensoleillement, il est nécessaire de passer vers d'autres paramètres. La vitesse du vent qui distingue les deux sites peut être décisive.

Nous allons, sur cette section, essayer de comprendre l'effet de la variation de ce paramètre sur la production d'électricité des CCS équipée d'un système de stockage thermique.

Les figures (3.17.a) et (3.17.b) représentent les résultats pour la centrale de 200 MW. Pour cette analyse, nous allons prendre trois valeurs différentes de la vitesse du vent : 5 m/s, 9 m/s et 13 m/s.

Le tableau 3.6 résume les résultats de la variation de la vitesse du vent pour les quatre CCS durant les deux mois : juillet et décembre. Pour ce tableau, trois valeurs de vitesse du vent sont présentées : 3 m/s, 6 m/s et 9 m/s.

La figure 3.17 et le tableau 3.6 montrent que la vitesse du vent influe énormément sur la production d'électricité moyenne et instantanée journalière.

On peut noter le même effet pour les quatre types de CCS étudiées pour les mois de juillet et décembre. Plus la vitesse du vent est élevée plus la puissance électrique journalière produite diminue considérablement.

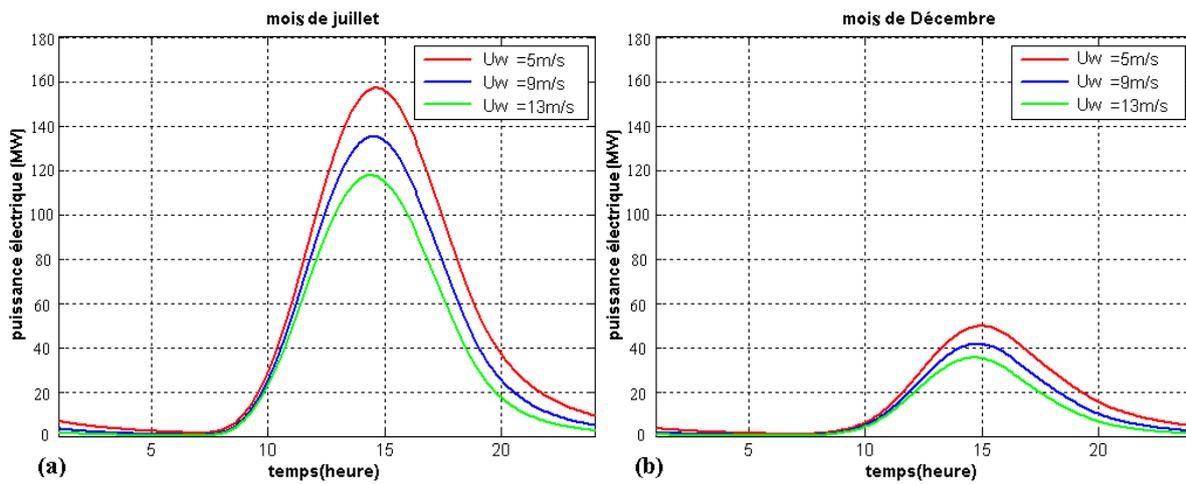


Figure 3.107: Effet de la variation du U_w sur le fonctionnement d'une CCS de 200MW.

Cette diminution revient essentiellement aux pertes thermiques par convection, qui sont proportionnelles à la vitesse du vent et qui aient lieu entre le collecteur et le vent à l'extérieur.

Tableau 3.4: Effet de la variation de U_w pour les 4 CCS (puissance électrique en MW)

	Uw	Juillet			Décembre		
		3 m/s	6 m/s	9 m/s	3 m/s	6 m/s	9 m/s
50MW	max	43	37	32,9	14	11,76	9,96
	Min	0,404	0,132	0,04	0,23	0,07	0,02
	A 00h	2.6	1,37	0,711	1,3	0,65	0,31
	Moy.jr	13,6	11,13	9,32	4,5	3,43	2,75
100MW	max	89	75.97	66.36	28.5	23.71	20.02
	Min	0.88	0.28	0.087	0.5	0.15	0.04
	A 00h	5.55	2.91	1.5	2.7	1.35	0.65
	Moy.jr	27.82	22.64	18.88	9.06	6.94	5.55
150MW	Max	115.98	96.18	80.9	34.82	28.17	23.33

	Min	2.01	0.59	0.16	1.021	0.27	0.07
	A 00h	11.04	5.4	2.61	4.88	2.22	1.01
	Moy.jr	38.22	29.44	23.59	11.96	8.61	6.60
200MW	max	237.5	211.97	190.1	79.89	68.71	60.3
	Min	1.09	0.39	0.13	0.71	0.23	0.07
	A 00h	8.1	4.6	2.56	4.62	2.46	1.29
	Moy.jr	69	59.98	52.27	23.66	19.38	16.25

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

De la figure 3.17 et du tableau 3.6 on peut déduire que l'effet de la vitesse du vent est considérable sur l'énergie électrique produite, c'est pour cette raison que l'étude de ce facteur ne doit en aucun cas être négligée durant le choix du site dédié à l'installation de la CCS.

III.4.6. Effet du type du sol

La wilaya d'Adrar s'étale sur une superficie de 427 368 km². L'étude de l'implantation d'une CCS dans cette région doit prendre en considération la variété du type de sol de cette wilaya. Nous allons ainsi essayer d'analyser l'effet de trois types de sol sur le fonctionnement des 4 CCS : granite, sable et roche calcaire.

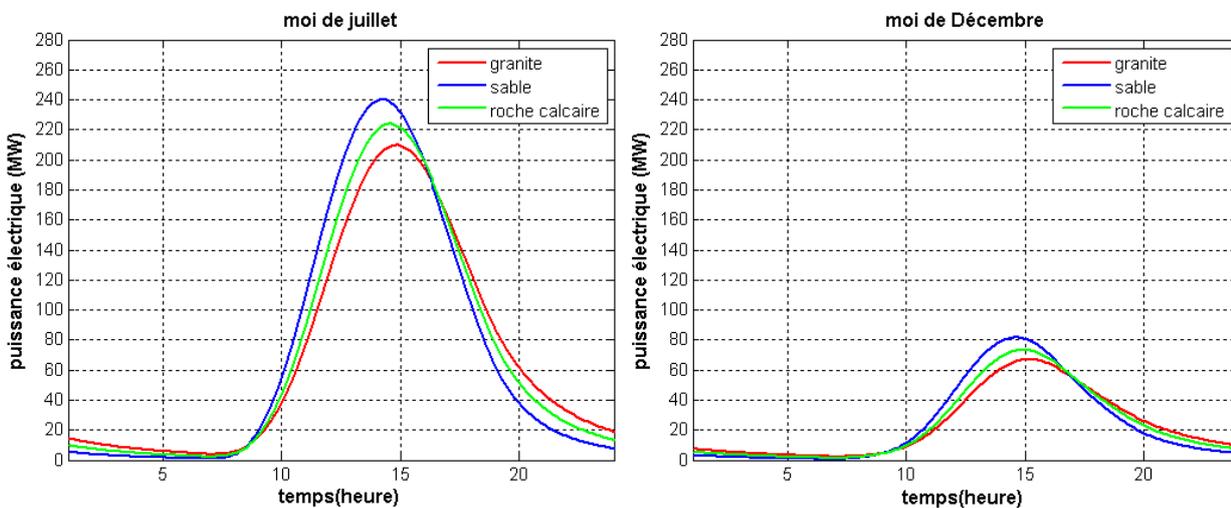


Figure 3.18. Effet du type de sol sur le fonctionnement d'une CCS de 200MW

La figure 3.18 montre que le type du sol influe effectivement sur le fonctionnement de la centrale. Il est clair que les valeurs, maximale et minimale, et les valeurs de la période nocturne de la courbe de production d'électricité sont affectées considérablement par ce paramètre. Le tableau 3.7 montre que le sol en granite représente la plus grande capacité de stockage par rapport aux autres types de sol. En terme de stockage thermique, la roche en calcaire vient en seconde position après le granite puis le sable en dernier. Cela revient essentiellement au produit de la masse volumique et la chaleur spécifique de chaque type de sol.

Du tableau 3.7 on note aussi que la puissance électrique moyenne journalière reste presque constante pour tous les types de sol et pour toutes les CCS. Cette remarque mène à déduire que non pas la quantité d'énergie produite qui change avec le changement du sol, mais seule la distribution de la production d'électricité qui subit un changement et qui se déplace, pour des sols à capacité de stockage élevée, vers les périodes non-enseillées.

Tableau 3.7. Effet du type de sol sur le fonctionnement des 4 CCS (puissance en MW).

	Sol	Juillet			Décembre		
		granite	sable	Roche calcaire	granite	sable	Roche calcaire
50MW	Max	28.42	33.24	30.51	8.19	10.06	9.064
	Min	0.27	0.034	0.125	0.12	0.016	0.059
	A 00h	2.07	0.64	1.34	0.82	0.28	0.56
	Moy.jr	8.971	9.34	9.1357	2.616	2.764	2.67
100MW	max	57.23	67.1	61.60	16.38	20.24	18.17
	Min	0.57	0.07	0.26	0.25	0.035	0.124
	A 00h	4.34	1.36	2.83	1.71	0.6	1.17
	Moy.jr	18.1	18.93	18.49	5.26	5.57	5.39
150MW	Max	93.46	117.56	103.63	27.12	35.48	30.13
	Min	5.69	1.82	3.75	2.46	0.93	1.75
	A 00h	20.06	10.42	15.89	7.74	4.65	6.51
	Moy.jr	37.15	38.31	37.65	11.48	11.99	11.71
200MW	max	209.28	239.53	221.19	67.05	80.62	73.45
	Min	3.92	0.97	2.29	2.31	0.64	1.42
	A 00h	18.86	7.56	13.28	9.51	4.33	7.1
	Moy.jr	68.75	69.81	69.21	23.17	23.69	23.39

III.4.7. Effet de la variation du matériau du stockage

Le coût du système de stockage est lié directement au matériau du stockage. Afin de pouvoir justifier l'investissement en un tel système, il faut tout d'abord justifier le choix d'un matériau par rapport à un autre. Cette étude présente la comparaison entre 3 matériaux souvent proposés dans la littérature pour le stockage thermique, ces matériaux sont le béton, l'eau et l'asphalte avec une épaisseur de stockage de 15cm.

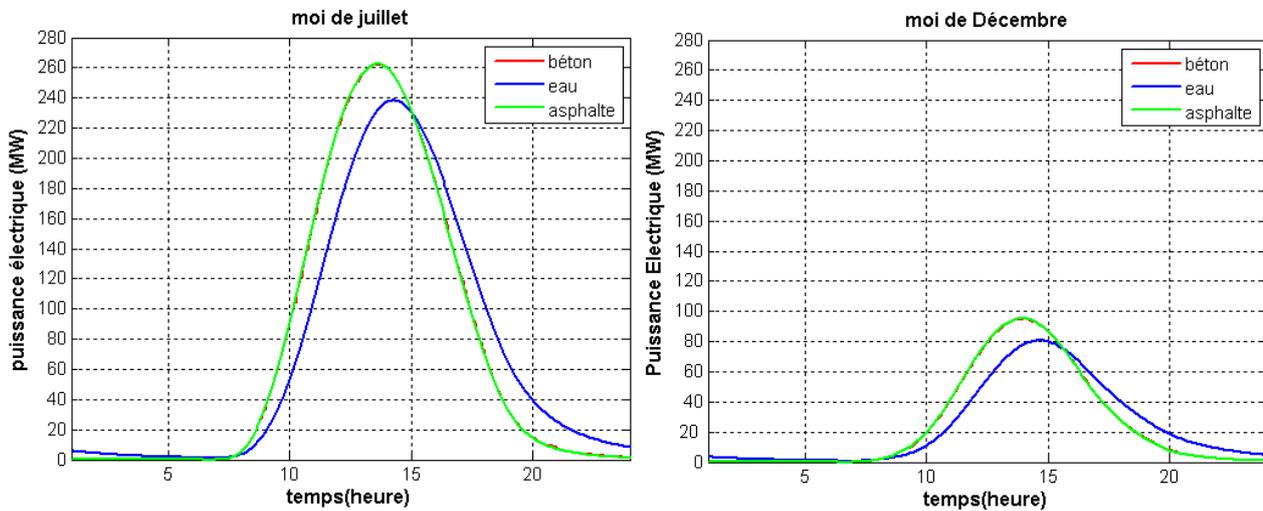


Figure 3.19. Effet du matériau du stockage sur le fonctionnement d'une CCS de 200 MW.

La figure 3.19 montre qu'évidemment le matériau du stockage peut influencer énormément sur la production d'électricité de la CCS comme il se peut que deux matériaux différents présentent presque les mêmes résultats. Sur cette figure on note qu'il est clair que l'eau présente une capacité de stockage beaucoup plus élevée par rapport au béton et l'asphalte.

Tableau 3.5. Effet du matériau du stockage sur les 4 CCS (puissance électrique en MW).

	Milieu	Juillet			Décembre		
		asphalte	eau	béton	asphalte	eau	béton
50MW	max	51.15	43.69	51.18	17.75	14.09	17.78
	Min	0.024	0.4	0.023	0.0162	0.23	0.015
	A 00h	0.44	2.58	0.43	0.26	1.3	0.25
	Moy.jr	13.95	13.59	13.95	4.62	4.44	4.63
100MW	max	104.79	89.04	104.87	36.12	28.50	36.18
	Min	0.054	0.88	0.055	0.035	0.5	0.034
	A 00h	0.97	5.55	0.95	0.56	2.77	0.55
	Moy.jr	28.6	27.82	28.61	9.45	9.06	9.45
150MW	Max	143.71	115.98	143.90	46.54	34.82	46.66

	Min	0.135	2.01	0.13	0.080	1.02	0.077
	A 00h	2.17	11.04	2.12	1.14	4.88	1.12
	Moy.jr	39.78	38.22	39.80	12.66	11.96	12.67
200MW	max	259	237	259	95	80	95
	Min	0.062	1.09	0.06	0.045	0.71	0.0439
	A 00h	1.29	8.13	1.26	0.83	4.62	0.816
	Moy.jr	70.87	69.74	70.87	24.28	23.66	24.29

Les deux courbes représentant la production d'électricité en présence des systèmes de stockage à base de béton et d'asphalte sont presque superposées. Du tableau 3.8 on note que toutes les centrales montrent le même comportement, cela revient essentiellement aux produits de leurs masses volumiques et leurs chaleurs spécifiques qui sont presque égales. Le choix entre ces deux matériaux peut être donc basé sur d'autres critères que celui de leurs capacités du stockage.

Du tableau 3.8 on note que la puissance électrique moyenne journalière reste presque constante pour tous les matériaux de stockage et pour toutes les CCS. Cette remarque mène à déduire que non pas la quantité d'énergie produite qui change avec le changement de matériau de stockage, mais seul la distribution de la production d'électricité qui change et qui se déplace vers les périodes non-enseillées pour des sols à capacité élevée de stockage.

Conclusion générale

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

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

Le stockage thermique proposé comme solution au caractère intermittent du rayonnement solaire a fait l'objet d'une analyse spécifique dans le cadre de cette étude. Les résultats obtenus ont montré que le stockage permet d'élever la puissance produite dans les périodes à faible ensoleillement. La variation de certains paramètres dimensionnels caractérisant les CCS (telles le diamètre du collecteur, le diamètre de la tour et sa hauteur) et d'autres caractérisant le système de stockage (hauteur du stockage, matériau du stockage etc.) a permis de mieux comprendre le comportement de ce type de centrales.

Le modèle utilisé pour cette étude a été validé sur la base de résultats expérimentaux obtenus à Manzanares et sur la base de résultats théoriques issus de la littérature. Les résultats obtenus ont permis de conclure qu'une optimisation du système s'impose pour trouver un compromis entre la puissance électrique produite et le coût de l'installation. Le stockage thermique représente ainsi une solution à l'intermittence du rayonnement solaire. Afin de garantir une production continue, Il permet d'éviter le recours aux énergies non renouvelables non respectueuses de l'environnement

L'effet de l'épaisseur du stockage sur les performances énergétiques des CCS a été montré dans cette étude. En effet, la conclusion à laquelle on a abouti est que plus la quantité de matière de stockage augmente, plus la puissance produite devient presque constante.

Le type du matériau du stockage influe aussi sur les performances de la CCS, plus la capacité de stockage du matériau augmente, moins sont les fluctuations de la production d'électricité. L'élargissement de la base du collecteur et du diamètre de la cheminée s'accompagnent par une augmentation de l'effet du stockage, il est à noter que pour le 2^{ème} paramètre, l'augmentation de cet effet est bien limitée.

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

Bibliographie

- [1] **Schlaich, J.**, The Solar Chimney, Axel Menges Editions, Stuttgart, Germany, 1995.
- [2] **Schlaich, J. et Schiel, W.**, «Solar chimneys,» Encyclopedia of Physical Science and Technology, pp199-109, 2004.
- [3] **Schlaich, J., Bergemann, R., W. Schiel et G. Weinrebe**, «Design of commercial solar tower systems - utilization of solar induced convective flows for power generation,» chez Proceedings of the International Solar Energy Conference, vol 3, pp.537-581, Kohala Coast, United States, 2003.
- [4] **Haaf, W., Friedrich, K., Mayr, G. et Schlaich, J.**, «Solar chimneys, part I: principle and construction of the pilot plant in Manzanares,» J. Solar Energy, vol. 2, pp.13-20, 1983.
- [5] **Mullet, L.**, «The solar chimney overall efficiency, design and performance,» Int. J. Ambient Energy, vol. 8, pp.135-40, 1987.
- [6] **Padki, M. et Sherif, S.**, «Solar chimney for medium- to large scale power generation,» chez Proceedings of the Manila International Symposium on the Development and Management of Energy Resources, Manila, Philippines, 1989.
- [7] **Padki, M. et Sherif, S.**, «Solar chimney for power generation in rural areas,» chez seminar on Energy Conservation and Generation Through Renewable Resources, Ranchi, India, 1989.
- [8] **Pasumarthi, N. et Sherif, S.**, «Experimental and Theoretical Performance of a Demonstration Solar Chimney Model –Part II: Experimental and theoretical results and economic analysis,» Int. J. Energy Res., vol. 22, pp.1443-461, 1998.
- [9] **Yan, M., Sherif, S., Kridli, G., Lee, S. et Padki, M.**, «Thermo-fluid analysis of solar chimneys,» Industrial Applications of Fluid Mechanics, FED, ASME, 1991.
- [10] **Bernardes, M., Valle, R. et Cortez, M.**, «Numerical analysis of natural laminar convection in a radial solar heater,» Int. J. Therm. Sci., vol. 38, pp.142-50, 1999.
- [11] **Haaf, W.**, «Solar chimneys, part II: preliminary test results from the Manzanares Pilot plant,» Int. J. Solar Energy, vol. 2, pp. 1141-161, 1984.
- [12] **Krisst, R.**, «Energy transfer system,» Alternat. Sources Energy, vol. 63, pp. 18-11, 1983.
- [13] **Kulunk H.**, A prototype solar convection chimney operated under Izmit conditions, *Proceedings of seventh MICAES*, 162, 1985.

- [14] **Pasumarthi, N. et Sherif, S.**, «Performance of a demonstration solar chimney model for power generation.» chez Proceedings of the 35th Heat Transfer and Fluid Mechanics, Sacramento, USA, Juin 1997.
- [15] **Zhou, X., Yang, J., Xiao, B. et Hou, G.**, «Experimental study of the temperature field in a solar chimney power setup.» Appl Therm Eng., vol. 27, pp. 12044-2050, 2007.
- [16] **Ketlogetswe, C., Fiszdon, J. et Seabe, O.**, «Solar chimney power generation project—the case for Botswana,» Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 12, pp.12005- 2012, 2008.
- [17] **Ferreira, A., Maia, C., Cortez, M. et Valle, R.**, «Technical feasibility assessment of a solar chimney for food drying,» Solar Energy, vol. 82, pp.1198-205, 2008.
- [18] **Lid, W., Wei, P. et Zhou, X.**, «A cost-benefit analysis of power generation from commercial reinforced concrete solar chimney power plant,», International Journal of Scientific and Research Publications, Vol 5, 2013.
- [19] **SivaReddy, V., Kaushik, S., Ranjan, K. et Tyagi, S.**, «State-of-the-artofsolarthermalpowerplants—A review,» RenewableandSustainableEnergyReviews, vol. 27, pp.1258-273, 2013
- [20] **Xinping, Z., Jiakuan, Y., Fen, W. et Bo, X. b.**, «Economic analysis of power generation from floating solar chimney power plant,» Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 13, pp. 1736-749, 2009.
- [21] **Papageorgiou, C.**, «Optimum design for solar power stations with floating solar chimneys,» chez Proceedings of the 32nd National Heat Transfer Conference,china, pp.763-72, 2004.
- [22] **Zhou X. et Yang J.**, «A novel solar thermal power plant with floating chimney stiffened onto a mountain-side and potential of the power generation in China's deserts,» Heat Transfer Eng, in press, Vol 30, Issue 5, 400-407, 2009
- [23] **Shérif. S.A. et Pasumarthi, N.**, «Experimental and theoretical performance of a demonstration solar chimney,» international journal of energy research, pp.1443-461, 1998.
- [24] **Zhou, X., Yang, J., Xiao, B. et Hou, G.**, «Simulation of a pilot solar chimney thermal power generating equipment,» Renewable Energy, pp. 11637-1644, 2007.
- [25] **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.
- [26] **Bonnelle, D.**, «Solar chimney, water spraying energy tower, and linked renewable energy conversion devices: presentation, criticism and linked

- renewable energy conversion devices: presentation, criticism and proposals.,»
University Claude Bernard, Lion., 2004.
- [27] **Hedderwick, R.**, «Performance evaluation of a solar chimney power plant,»
Stellenbosch, South Africa., Department of Mechanical Engineering, University
of Stellenbosch, 2001.
- [28] **Pretorius, J.**, «Solar tower power plant performance characteristics.,»
Stellenbosch, South Africa., Department of Mechanical Engineering, University
of Stellenbosch, 2004
- [29] **Hammadi, S.**, «Solar updraft tower power plant with thermal storage.,» *Basrah
Journal for Engineering Research.* 98:49–57, 2008.
- [30] **Miqdam, T. et Hussein, A.**, «Basement kind effects on air temperature of a
solar chimney in Baghdad–Iraq weather.,» *International Journal of Applied
Sciences*, pp.112-20, 2011.
- [31] **Zheng, Y., Ming, T., Zhou, Z., Yu, X., Wang, H., Pan, Y. et Liu, W.**,
«Unsteady numerical simulation of solar chimney power plant system with
energy storage layer.,» *Journal of the Energy Institute*, pp.186-92, 2010.
- [32] **T. Ming, F. Meng, W. Liu, Y. Pan and R. Kiesgen de Richter**, Analysis of
output power smoothing method of the solar chimney power generating system,
International Journal of Energy Research, vol 37,pp1657-1668, 2012.
- [33] **Zhou, Y., Liu, X. et Lid, Q.**, «Unsteady conjugate numerical simulation of the
solar chimney power plant system with vertical heat collector,» *Materials
Science Forum*, pp. 1704-705, 535-540, 2011.
- [34] **Xu, G., Ming, T., Pan, Y., Meng, F. et Zhou, C.**, «Numerical analysis on the
performance of solar chimney power plant system,» *Energy Conversion and
Managemen*, pp. 1876-883, 2010.
- [35] **M. Bernardes, A. Voß et G. Weinrebe**, «Thermal and technical analyses of
solar chimneys.,» *Solar Energy*, n° %1511-524, p. 75, 2003.
- [36] **Bernardes, M.**, «Ökonomische und Ökologische Analyse von
Aufwindkraftwerken,» *IER, Universität Stuttgart, Stuttgart, Germany.*, 2004.
- [37] **Pretorius, J. et Kröger, D.**, «Critical evaluation of solar chimney power plant
performance,» *Sol Energy*, pp.1235-41, 2004.
- [38] **Sangi, R., Amidpour, M. et Hosseinizadeh, B.** , «Modeling and numerical
simulation of solar chimney power plants.,» *Sol Energy*, pp. 1829-38, 2011.
- [39] **Kreetz, H.**, «Theoretische Untersuchungen und Auslegung eines temporären
Wasserspeichers für das Aufwindkraftwerk.,» *chez Energie und
Verfahrenstechnik der TU Berlin, Berlin.*, 1997.

- [40] **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.
- [41] **Bergman, L. T., Lavine, S. A., Incropera, P. F. et Dewitt, D. D.**, Fundamentals on heat and mass transfer, United States: John Wiley and Sons, 2012.
- [42] **Hurtado, F., Kaiser, A. et Zamora, B.**, «Evaluation of the influence of soil thermal inertia on the performance of a solar chimney power plant,» ELSEVIER-energy, vol. 47, pp. 213-224, 2012.