

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 master en génie mécanique

Option : Energétique

Analyse de l'Aspect Technico- Economique des Centrales à Cheminée Solaires

Mohamed Nassim KHIAT

Sous la direction de M. Salah LARBI Professeur

Présenté et soutenu publiquement le 29 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

المخلص

يتمثل هذا العمل في تحليل فني و إقتصادي لمحطة توليد الطاقة الكهربائية ذات برج شمسي الحراري. و قد استعملنا النموذج الإقتصادي لشلاك لتقدير تكلفة محطة توليد الطاقة الكهربائية ذات برج شمسي و الكيلو واط الساعي المنتج من طرف هذه المحطة. وأظهرت النتائج أن تكاليف وحدة الاستثمار تنخفض مع زيادة حجم المحطة. وبمقارنة أسعار كيلوواط ساعي المنتج من طرف محطة توليد الطاقة الكهربائية ذات برج شمسي الحراري مع سعر الكيلوواط الساعي المنتج من طرف محطة توليد الطاقة الكهربائية ذات توربينات الغاز، نرى أن سعر كيلوواط ساعي المنتج من طرف محطة توليد الطاقة الكهربائية ذات برج شمسي الحراري يصل إلى ثمانية مرات أغلا من سعر الكيلوواط الساعي المنتج من طرف محطة توليد الطاقة الكهربائية ذات توربينات الغاز.

كلمات مفتاحية: محطة توليد الطاقة الكهربائية ذات برج شمسي، تحليل الفني و الإقتصادي، سعر الكيلوواط الساعي.

Abstract:

The aim of this study is related to technical and economic analysis of solar updraft tower power plants. The economic model developed by Schlaich is used to evaluate the solar chimney power plants (CCPP) construction cost at large- scale and the kWh of energy produced by these power plants. Obtained results showed that investment unit costs decline by increasing the size of the CCPP and it is profitable to build large CCS. Comparing the prices of kWh of energy produced by CCPP and the other produced by gas turbine power plant in Algeria, It is shown that the price of kWh of energy produced by the solar chimney power plants is 8 times more expensive than the other produced by thermal power plant using fossil fuel. Nevertheless, ecological and environmental consideration, have an important role in decision making and investment.

Keywords: Solar updraft tower power plant; Technical and economic analysis; Price of kWh.

Résumé :

Le travail présenté dans ce mémoire est relatif à une analyse technico- économique des centrales à cheminées solaires (CCS). Le modèle économique présenté par Schlaich a été utilisé pour estimer le coût des CCS à échelle industrielle, ainsi que le prix du kWh d'énergie électrique produite par ces centrales. Les résultats obtenus ont montré que les coûts unitaires d'investissement diminuent en augmentant la taille des CCS. Il est ainsi rentable de construire de grandes CCS. Une comparaison du prix du kWh d'électricité produite par une centrale à cheminée solaire avec celui produit par une centrale thermique à base d'une turbine à gaz a été établie pour le cas de l'Algérie. Les résultats obtenus ont montré que le prix du kWh produit à partir d'une centrale à base de cheminée solaire est jusqu'à 8 fois plus cher que celui produit par une centrale thermique. Néanmoins, les considérations d'ordre écologique et environnemental peuvent influencer considérablement sur la prise de décision et l'investissement.

Mots clés : Centrale à cheminée solaire ; Analyse technico économique ; Prix du kWh.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à mes très chers parents pour tous les sacrifices consentis afin que je puisse avoir une bonne éducation et vivre dans le bien être. Sachez qu'aucune dédicace ne serait exprimer l'amour et le respect que j'ai pour vous.

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

A mon frère et mes deux sœurs, en témoignage de mon affection fraternelle, de ma profonde tendresse et reconnaissance, je vous souhaite une vie pleine de bonheur et de succès et que Dieu, le tout puissant, vous protège et vous garde.

Pour tous mes amis, c'est en partie grâce à votre soutien morale et psychologique que j'ai pu gravir plusieurs étapes décisives dans mon parcours étudiantin, je vous remercie infiniment

Pour Chahine, Arslene, Ayoub, Mohamed et Salah, qu'Allah le tout puissant vous accorde sa miséricorde et vous protège.

A tous mes enseignants, depuis le préscolaire jusqu'à l'ENP.

Pour tous les gens qui ont contribué de près ou de loin afin que je puisse arriver là, merci pour tous.

N.M. Khiat

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.....	11
Chapitre I:Généralités sur les centrales à cheminée solaire.....	14
I.1. Historique :.....	14
I.2 La centrale a cheminée solaire :	14
I.2.1 principe de fonctionnement.....	15
I.2.2. Composantes de la cheminée solaire	15
I.2.2.1 Le collecteur :	15
I.2.2.2 la cheminées :.....	16
I.2.2.3 la turbine:.....	18
I.3. Les projets :	19
I.3.1. Prototype de Manzanares:	19
I.3.2 Les projets actuels de cheminées solaires :	21
I.3.2.1 Le projet Australien.....	21
I.3.2.2 Le projet espagnol	22
I.3.2.2 Le projet Namibien	23
Chapitre II: Etat de l’art sur les cheminées solaires.....	26
II.1 Introduction :.....	26
II.2 Etudes théoriques sur les CCS :.....	26
II.3. Etudes relatives au stockage thermique :.....	27
II.4 Etude expérimentale sur les CCS :.....	27
II.3 Etude économique sur les CCS :.....	28
Chapitre IV: Modélisation et calcul du cout d’une CCS à grande échelle	32
III.1 Equations de bilans énergétiques relatives aux centrales à cheminées solaires sans stockage thermique : (Modèle de Schlaich [6]).....	32
III.1.1. Rendement de la centrale à cheminée solaire (CCS):.....	32
III.1.1. 1. Rendement du collecteur.....	32
III.1.1. 2. Rendement de la cheminé.....	34

III.1.1. 3 Rendement de la turbine.....	35
III.2.2. Puissance mécanique produite par la centrale :	37
III.3 Les dimensions typiques pour les CCS :	38
III.4 Modèle économique de Schlaich [6]	38
III.5 Estimation du cout d'une CCS :	39
II.5.1 Le cout d'une cheminée solaire de 100 MW.....	39
III.5.1.1 Estimation du KWh produit	41
III.5.2 Le cout d'une cheminée solaire de 50 MW :	41
III.5.2.1 Estimation du KWh produit	43
III.6 Comparaison avec le tarif de l'électricité en Algérie :	43
Conclusion générale	46
Références Bibliographiques	47

Liste des Tableaux

<i>Tableau II-1 Récapitulatifs les dimensions des centrales a cheminées solaires.....</i>	<i>28</i>
<i>Tableau II-2 Analyse des couts des centrales a cheminées solaires.....</i>	<i>29</i>
<i>Tableau V- 1 les dimensions typiques pour différents CCS.....</i>	<i>38</i>
<i>Tableau V- 2 les données d'exploitations du collecteur pour une CCS de 100 MW.....</i>	<i>39</i>
<i>Tableau V- 3 les données d'exploitation de la cheminées pour une CCS de 100 MW.....</i>	<i>40</i>
<i>Tableau V- 4 Les données d'exploitation e la turbine pour une CCS de 100 MW.....</i>	<i>40</i>
<i>Tableau V- 5 le cout globale de la cheminé de 100 MW.....</i>	<i>40</i>
<i>Tableau V- 6 Données d'exploitation du collecteur pour une CCS de 5 MW.....</i>	<i>41</i>
<i>Tableau V- 7 Données d'exploitation de la cheminé pour une CCS de 5 MW.....</i>	<i>42</i>
<i>Tableau V- 8 Données d'exploitation de la turbine pour une CCS de 5 MW.....</i>	<i>42</i>
<i>Tableau V- 9 Cout globale d'une CCS de5 MW.....</i>	<i>43</i>
<i>Tableau V- 10 Les tarifs de l'électricité en Algérie.....</i>	<i>43</i>

Liste des figures

<i>Figure I- 1 principe de fonctionnement d'une cheminé solaire</i>	15
<i>Figure I- 2 Verrière du collecteur d'une cheminée solaire</i>	16
<i>Figure I- 3 Collecteur d'une cheminée solaire</i>	16
<i>Figure I- 4 Photo montrant une tour cheminée</i>	17
<i>Figure I- 5 cheminées haubanée</i>	17
<i>Figure I- 6 Cheminée autoportante</i>	17
<i>Figure I- 7 Turbine pour Cheminée Solaire de large diamètre</i>	18
<i>Figure I- 8 Petites turbines horizontales</i>	18
<i>Figure I- 9 Turbines verticales</i>	18
<i>Figure I- 10 Photo de la cheminée solaire de Manzanares</i>	20
<i>Figure I- 11 Structure de la cheminée solaire de Manzanares</i>	20
<i>Figure I- 12 Cheminée solaire Australienne</i>	21
<i>Figure I- 13 Cheminée Solaire de Ciudad Real (Espagne)</i>	23
<i>Figure I- 14 Cheminée solaire Namibienne</i>	23
<i>Figure I- 15 Taille comparée de divers projets de Cheminées solaires</i>	24

Nomenclature

A	Surface	m^2
C_p	Chaleur spécifique	J/kg.K
D	Diamètre	m
G	Rayonnement solaire incident	W/m ²
g	Accélération de la pesanteur	m/s ²
\dot{m} ,	Débit massique de l'air	kg/s
η	Rendement	
P	Puissance	W
Q _v	Débit volumétrique	m ³ /s
ρ	Masse volumique	kg/m ³
R	Rayon	m
T	Température	K
ΔT	Différence de températures	K
A_n	Le facteur annuel du cout d'investissement	
B_n	Le facteur annuel du cout d'exploitation.	
n	la période d'amortissement.	
i	le taux d'intérêt.	
e	taux d'inflation.	

Indices :

0	Ambiant
∞	Extérieur du collecteur
A	Air
a,o	Air à la sortie du collecteur entrée cheminée
a,i	Air à l'entrée du collecteur
coll	Collecteur
d	Dynamique
e	Environnement
h	Hydraulique
i	Intérieur du collecteur
max	Maximal
t	Cheminée
tot	Totale
w	Vent
wt	Aérogénérateur

Lettres grecques :

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 ² K)

Introduction Générale

Introduction générale

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].

Face à ce constat, il devient plus que nécessaire de rechercher 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'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 [3]. Plusieurs facteurs en sont la cause : les technologies très avancées sont maîtrisés par un nombre limité de pays, 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...) [4].

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'entrée 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. [5] 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.

Néanmoins, le facteur compétitivité économique des centrales à cheminée solaire comparativement aux centrales conventionnelles n'a toujours pas été en leur faveur compte tenu de leur rendement. En dépit de leur faible rendement, lié à l'intermittence du rayonnement solaire et des systèmes de stockage, le Professeur Jörg Schlaich de l'université de Stuttgart (Allemagne), pionnier dans le domaine, est optimiste, quant à l'avenir de ces centrales en stipulant que l'installation des CCS se trouve dans le désert et que par ailleurs le rendement économique n'est pas trop mauvais, surtout si on peut raisonner avec un horizon temporel suffisamment lointain. Les tours solaires pourraient être qualifiées d'énergie solaire du pauvre et plus précisément, du pauvre urbain : les technologies employées ne sont pas très sophistiquées, de sorte qu'elles puissent facilement être mises en œuvre par les pays pauvres eux-mêmes [6].

C'est pourquoi nous nous sommes intéressés dans le cadre de cette étude à évaluer le prix du kWh produit à partir d'une centrale à cheminée solaire. Le mémoire est structuré en trois chapitres principaux :

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

Le deuxième chapitre consiste en une étude bibliographique décrivant les différents travaux de recherches sur l'aspect économique des centrale a cheminées solaire.

Le troisième est dernier chapitre concerne l'aspect modélisation mathématique relative au coût de ces centrales ainsi que quelques applications. La première partie du chapitre est consacrée au calcul du prix du kWh produit à partir de deux centrales à cheminée solaire de grande échelle en l'occurrence une CCS de 5 MW et une CCS 100 MW, dans la second partie on a comparé le prix du kWh estimé avec le prix du kWh dans le marché Algérien.

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
Généralité sur les centrales a cheminée
solaire

Généralités sur les centrales à cheminée solaire

I.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 [7].

I.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.

I.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.

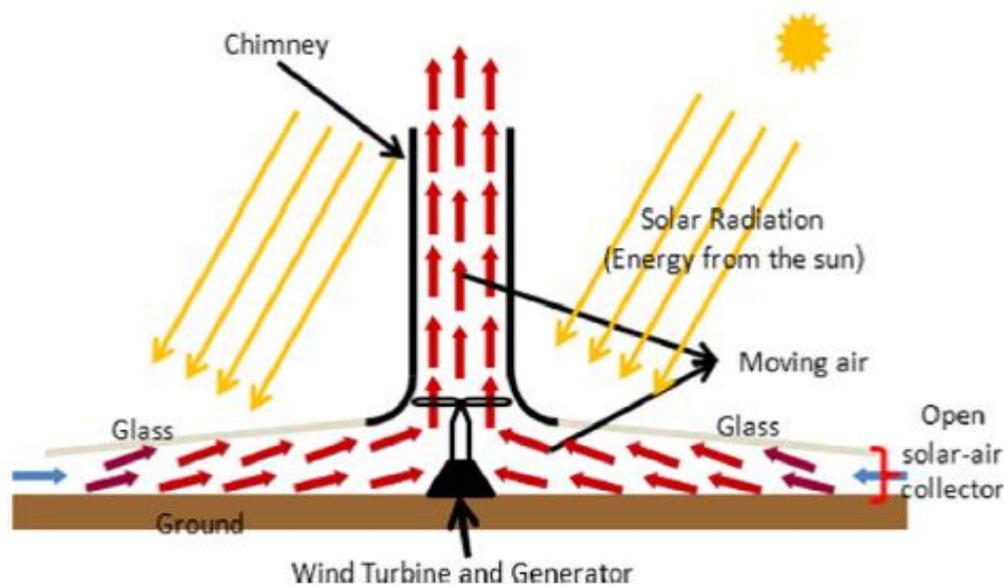


Figure I- 1. Représentation schématique d'une centrale à cheminée solaire.

I.2.2. Composantes de la cheminée solaire :

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

I.2.2.1 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 I.1 et I.2 montrent respectivement la verrière du collecteur et l'ensemble collecteur- cheminée.



Figure I- 1 Verrière du collecteur d'une cheminée solaire.



Figure I- 2 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.

I.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 I- 3 Photo montrant une tour cheminée.



Figure I- 5 Cheminée autoportante



Figure I- 4 cheminées 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".

I.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 I.7 montre une photo de turbine. Elle est placée soit verticalement dans le collecteur(Figure I-8), soit horizontalement (Figure I-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 I- 6 Turbine pour Cheminée Solaire de large diamètre.

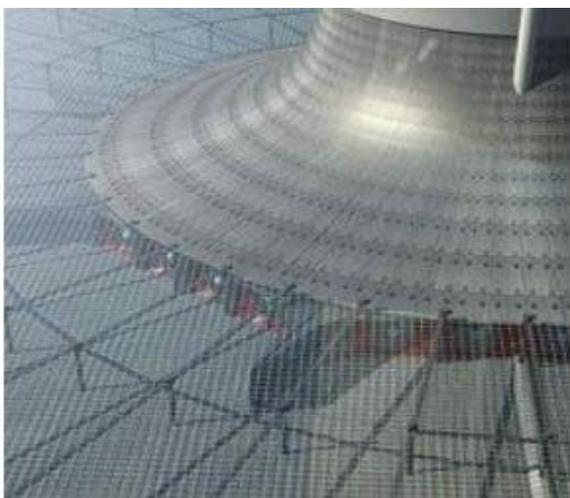


Figure I- 8 Turbines verticales



Figure I- 7 Petites turbines horizontales

I.3. Les projets :

I.3.1. 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 Bergemann & 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 [8].

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 I-10 et I-11 montrent respectivement les photos de la centrale cheminée de Manzanares et de sa structure.



Figure I- 9 Photo de la cheminée solaire de Manzanars.



Figure I- 10 Structure de la cheminée solaire de Manzanars.

I.3.2 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.

I.3.2.1 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 [3]).

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 [9] etc...La figure I-12 montre une vue de la cheminée solaire d'Australie.



Figure I- 11 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 Enviro-Mission dans le désert de Nouvelle-Galles du Sud, dans le comté de Wentsworth. A cause du problème de financement Enviro-Mission s'est lancé dans le développement d'une première version plus petite et moins coûteuse (50 MW) avec une cheminée en béton précontraint haute résistance. On s'inquiète tout de même de la lenteur du projet aux vues des sommes mises en jeu et des investissements déjà réunis.

I.3.2.2 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].

La figure I-13 montre une vue de la cheminée solaire de Ciudad Real (Espagne).



Figure I- 12 Cheminée Solaire de Ciudad Real (Espagne).

I.3.2.3 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 I-14 montre une vue de la cheminée solaire de Namibie.

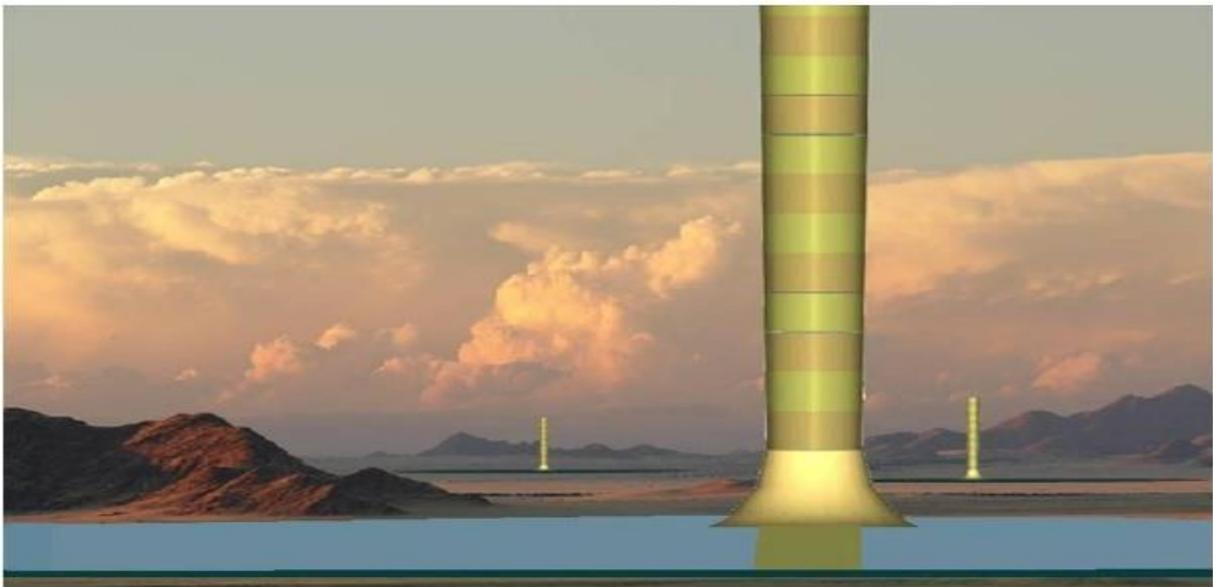


Figure I- 13 Cheminée solaire Namibienne.

La figure I-15 montre une vue comparative des tailles de divers projets de cheminées solaires.

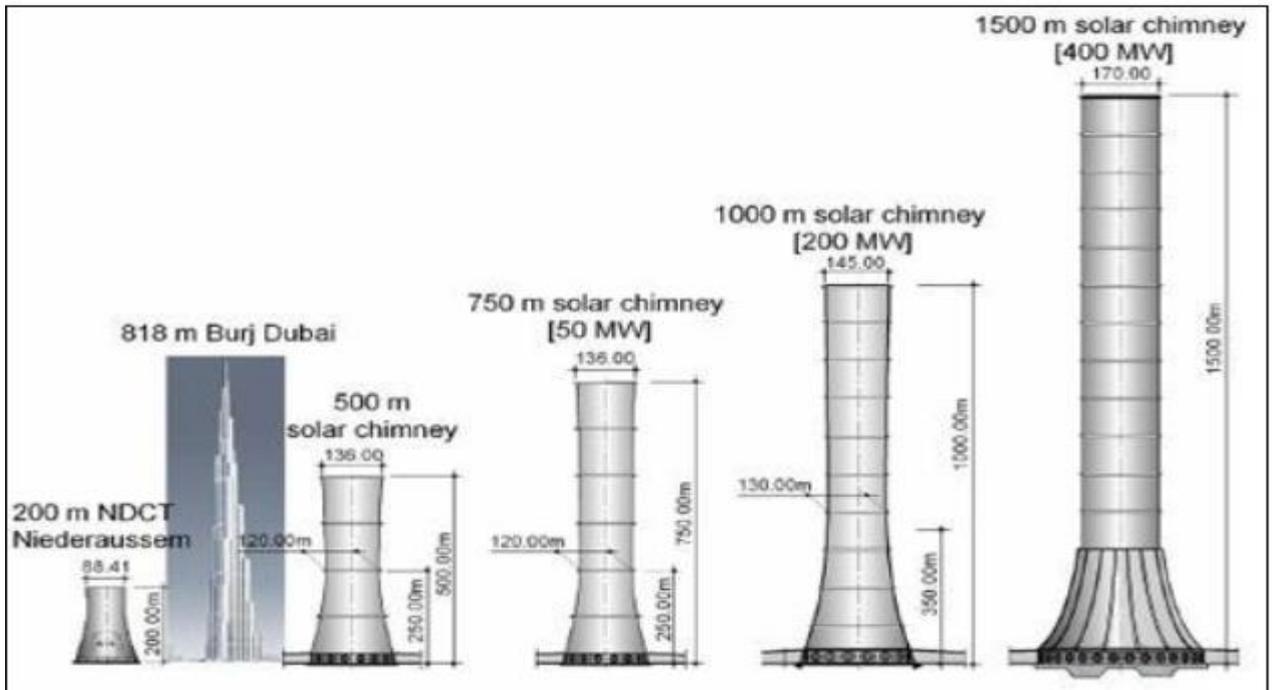


Figure I- 14 Taille comparée de divers projets de Cheminées solaires.

Chapitre II

Etat de l'art sur les cheminées solaires

Etat de l'art sur les centrales à cheminée solaire

II.1 Introduction :

Le cout de construction et d'exploitation d'une CCS sont deux paramètres important afin de prédire la faisabilité économique de la centrale électrique, pour cela plusieurs chercheurs spécialiste du domaine se sont intéressées à développer des modèles qui permettront de prédire le cout de construction et d'exploitation des CCS.

III.2 Etudes théoriques sur les CCS :

Le travail pionnier de J. Schlaich [5] 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 [11] et Haaf et al. [12] 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 [11] 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 [13].

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 telss ystèmes.

Une étude fondamentale sur le prototype de Manzanares (Espagne) a été réalisée par Haaf et al. [12]. 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.

Bernardes et al. [14] 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. [14] 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.

L'étude de Chergui et al. [15] 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. [16] 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.

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 [17] 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.

Hammadi [18] a étudié l'effet du système de stockage thermique sur la production d'énergie de la CCS. Les résultats obtenus par l'auteur ont montré que l'utilisation de sac d'eau comme milieu 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.

Bernardes [19] 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 $Ws^{1/2}/K m^2$.

III.4 Etudes expérimentales sur les CCS :

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 [8].

Le ministère de la science et la technologie de Botswana a conçu et réalisé une installation, pour la recherche, une centrale CCS [20]. 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'Universidade 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 [21].

III.3 Etudes économiques sur les CCS :

Schlaich [11] et Schlaich and al [13] ont présenté un modèle qui permet l'estimation des coûts de tous les composants de la CCS pour différents taille de centrale (5MW, 30 MW et 100 MW). Ce modèle permet d'estimer le coût actualisé de l'électricité (LCOE) et aussi permet effectué une analyse de sensibilité du prix moyen de l'électricité au taux d'intérêt pendant toute la durée de la période d'amortissement. Les matériaux et les coûts de la main-d'œuvre sont tributaires de l'emplacement et la taille de la centrale [24].

Bernardes [22] a modélisé le coût d'une CCS en prenant en considération le prix moyen de l'électricité actualisé pour ensuite dériver un coût paramétrique, le modèle a été développé pour une CCS de 100 MW [24].

L'analyse du coût et le LCEO associé au KWh telle que montré par Fleuri et al [28] révèlent une grande différence dans le coût sur les deux modèles présentés par Schlaich [13] et Schlaich et al [11].

A partir du modèle de Bernardes [22] et en se basant sur les variations des coûts des CCS et le coût de l'électricité produite. Fleuri et al [23] ont mis au point un modèle pour l'estimation des coûts d'une CCS en incluant dans leur étude l'impact des crédits carbone sur LCEO dont ils ont comparé leur résultats avec les résultats d'autres modèles de coût [24].

Le tableau II-1 récapitule les dimensions des centrales a cheminées solaires sur lesquelles se sont basé les publications citées précédemment :

Tableau II-1 Récapitulatifs les dimensions des centrales à cheminée solaire [24].

Configuration	Schlaich [11]	Schlaich et al. [13]	Bernardes [22]
Puissance. MW	100	100	100
Hauteur de la cheminée. (m)	950	1000	850
Diamètre de la cheminée. (m)	115	110	110
Diamètre du collecteur. (m)	36000	43000	49500
Hauteur du collecteur. (m)	6.5	3	3.5
L'énergie électrique produite par année (GWh/a)	305.2	320	281

Le cout de chaque centrale a été analysé dans le tableau II-2 ci-dessous :

Tableau II-2 : Analyse des couts des centrales a cheminées solaires [24].

Configuration	Schlaich Euro	Schlaich and al Euro	Bernardes Euro
Cout du collecteur	134.8	131.0	190.0
Cout de la cheminée	68	156.2	64.4
Le de l'unité de conversion de puissance	79.8	75.0	76.7
Les routes, les bâtiments, les ateliers	2.0	n/a	2.71
Les infrastructures	4.3	n/a	6.5
Planification, gestion du site	2.9	n/a	n/a
Arrondir	8.1	n/a	n/a
Ingénierie, essaie	n/a	40	
Les installations électriques	n/a	n/a	10.5
Assurance			1.58
Le cout global d'investissement	300	402	352.4
Cout de l'exploitation et de l'entretien (Million d'euro) (la 1ère année)	1	1.9	1.0
Période d'amortissement (année)	20	30	30
Période de construction (année)	Nan	Nan	2
Taux d'intérêt réel %	n/a	6	8
Taux d'intérêt nominal	8	n/a	n/a

%			
Taux d'inflation %	3.5	n/a	n/a
LCOE (€/KWh)	0.1045	0.1000	0.0370

Fleuri et al [24] dans leurs étude ont comparé les résultats obtenus par leurs modèle, aux résultats obtenus par Schlaich et al [11] et les résultats obtenus par Bernardes [27]. Dès le départ on constate une différence de cout du collecteur et de la cheminée de 2.5 fois le cout estimé par Bernardes [23]. Ils ont également évalué la puissance de sortie des CCS modélisé par Schlaich et al [11] et Bernardes[23] en utilisant le modèle thermodynamique de Pretorius, ils ont trouvé que la puissance de sortie de la CCS de Schlaich et al [11] était de 66MW et celle de Bernardes[23] était de 62MW nettement inférieure à la puissance de sortie estimée par Schlaich et al [11], et Bernardes[23] qui était de 100MW[24].

L'auteur [24] a aussi estimé le LCEO par KWh de chaque CCS en considérant les mêmes paramètres économique utilisé par les auteurs à savoir pour Schlaich [13] (Taux d'intérêt 6% taux d'inflation 3.5% et une période d'amortissement de 30 ans) et pour Bernardes[22] (Taux d'intérêt 8% taux d'inflation 3.25 %, une période d'amortissement 30 ans, et la période de construction de 2 ans), il a trouvé un LCEO de 0.270€/ KWh pour Schlaich et al [11] tandis les auteurs ont estimé le LCEO a 0.1€/KWh, pour Bernardes ils ont évalué le LCEO a 0.43€/KWh tandis que Bernardes[23] la estimé à 0.125€/ KWh[24].

Weibing Li et al. [25] 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. [26] 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. [27] 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 influée 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 [28] a estimé le coût des composants d'une CCS de 100 MW en excluant certaines dépenses additionnels alors que Zhou and Yang [29] ont estimé le coût d'électricité d'une CCS supposée être installée au désert sur les hauts montagnes du nord-ouest de la chine en excluant également certaines dépenses.

Chapitre III
Modélisation et calcul du cout

Modélisation et calcul du cout d'une CCS à grande échelle :

III.1 Equations de bilans énergétiques relatives aux centrales à cheminées solaires sans stockage thermique : (Modèle de Schlaich [5])

Nous nous sommes au modèle de Schlaich [5] 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.

III.1.1. 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.1.1. 1. Rendement du collecteur :

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

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

Avec :

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

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

A_{coll} : Surface du collecteur.

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

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

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

Où :

\dot{m} : Débit massique de l'air ;

C_p : Chaleur spécifique de l'air ;

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

Avec :

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

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.1.1. 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 diminue dans la turbine.

Δp_d : Composante dynamique décrivant l'énergie cinétique de l'écoulement d'air dans la cheminée.

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

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

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

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

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.

III.1.1. 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).

III.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:

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

III.3 Les dimensions typiques pour les CCS :

Schlaich [6] a montré à partir de son modèle mathématique qu'il n'y a pas d'optimum physique pour le calcul du cout d'une cheminée, même lorsque les conditions météorologiques et le site sont précisément connus.

Le tableau V-1 donne les dimensions typiques pour différentes cheminées solaires. Elles ont été étudiées pour un rayonnement solaire égale à $G=2300 \text{ KWh/m}^2.\text{an}$, sur la base du modèle mathématique de Schlaich [6].

Tableau V- 1 les dimensions typiques pour différents CCS

Puissance de sortie	MW	5	30	100	200
Diamètre du collecteur	m	1110	2200	3600	4000
Hauteur de la cheminée	m	445	750	950	1500
Diamètre de la cheminée	m	54	84	115	175
L'énergie produite par an	GWh/an	13.9	87.4	305.2	600

III.4 Modèle économique de Schlaich [5]

La modélisation du coût de l'énergie électrique produite par une CCS prend en compte le cout d'exploitation, et les coûts d'entretien. Ces deux paramètres dépendent essentiellement de la taille de la centrale, en prenant en considération le taux d'intérêt i , le taux d'inflation e , ainsi que la période d'amortissement n .

$$A_n = \frac{z^n \cdot i}{z^n - 1} \quad (4.1)$$

$$B_n = \frac{(z^n - f^n)}{z^n(z-f)} \cdot \frac{z^n \cdot i}{z^n - 1} \quad (4.2)$$

Avec :

- A_n : Le facteur annuel du cout d'investissement
- B_n : Le facteur annuel du cout d'exploitation.
- n : la période d'amortissement.
- i : le taux d'intérêt.
- e : taux d'inflation.

En utilisant :

$$f = 1 + e \quad (4.3)$$

$$Z = 1 + i \quad (4.4)$$

$$L'investissement\ annuel = A_n * le\ cout\ d'investissement \quad (4.5)$$

$$Le\ cout\ de\ fonctionnement\ annuel = B_n * le\ cout\ d'exploitation\ pour\ la\ 1\ ère\ années \quad (4.6)$$

$$le\ capitale\ emprunté = A_n - \frac{1}{n} * le\ cout\ d'investissement \quad (4.7)$$

$$le\ capitale\ emprunté\ cumulé = le\ capitale\ emprunté * n \quad (4.8)$$

$$le\ cout\ totale = L'investissement\ annuel + Le\ cout\ de\ fonctionnement\ annuel \quad (4.9)$$

$$le\ cout\ de\ l'énergie\ produite = \frac{le\ cout\ totale}{l'énergie\ produite\ par\ an} \quad (4.10)$$

III.5 Estimation du cout d'une CCS :

III.5.1 Le cout d'une cheminée solaire de 100 MW :

Les paramètres économiques utilisés dans le calcul :

- La période d'amortissement est de $n= 20$ ans
- Le taux d'intérêt nominal est de $i = 8\%$
- Le taux d'inflation $e=3.5\%$

$$A_n = 0.101852$$

$$B_n = 1.273$$

1. Le collecteur :

Tableau V- 2 les données d'exploitations du collecteur pour une CCS de 100 MW

Puissance nominale	100 MW
Diamètre du collecteur	3600 m
La surface du toit en verre	10080000 m ²
Double vitrage (2*4 mm)	3570000 m ²
Simple vitrage (1* 4mm)	6510000 m ²
la quantité d'acier (pour les supports, poutres)	96 700 t
Béton C25 pour les fondations	22900 m ³
Quantité d'acier d'armature	1200 t
Le cout de construction	137.84 Millions d'euro

Sachant que 1 DZD=0.0081 €

Le cout de construction du collecteur est estimé à 1.7 Milliards DZD.

2. La cheminée :

Tableau V- 3 les données d'exploitation de la cheminées pour une CCS de 100 MW

Hauteur de la cheminée	950 m
Diamètre de la cheminée	115 m
Epaisseur de la paroi au sommet	0.16 m
Epaisseur de la paroi en bas	0.90 m
Quantité de béton C25 pour les fondations	64 500 m ³
Quantité de béton C45 pour le soutiennent	27 700 m ³
Quantité de béton C45 pour la cheminée	153 500 m ³
La quantité d'acier d'armature	14 550 m ³
Les câbles de rigidification	119 t
Le cout de construction	69.74 Millions d'euros

Le cout de la cheminée est estimé à **8.61 Milliards DZD**

3. La turbine :

Tableau V- 4 Les données d'exploitation e la turbine pour une CCS de 100 MW

turbines à axe vertical	6
Turbines à axes Horizontale	36
Nombre de tr/min	105 tr/min
Le couple	314.5 KN.m
Coûts :	
• pales de rotor	4.14 Millions d'euro
• Générateur	66.98 Millions d'euro
• Les composants électroniques	10.48 Millions d'euro
Le cout des équipements et de l'installation	81.60 Millions d'euros

Le cout de la turbine est estimé à 1.00741 Milliards DZD

Le cout Globale :

Tableau V- 5 le cout globale de la cheminé de 100 MW

Collecteur	1.7 Milliards DZD
Cheminée	8.61 Milliards DZD
Les équipements mécaniques	1.00741 Milliards DZD
Routes, bâtiments, ateliers	253.86412 Millions DZD
Infrastructure	537,03 Millions DZD
Planification, gestion du site	366,66 Millions DZD
Cout Globale	36,86 Milliards DZD
Le cout de l'unité	368 600 DZD/KWh

III.5.1.1 Estimation du KWh produit :

Les paramètres économiques utilisés dans le calcul :

- La période d'amortissement est de $n= 20$ ans
- Le taux d'intérêt nominal est de $i = 8\%$
- Le taux d'inflation $e=3.5\%$

$$A_n = 0.101852$$

$$B_n = 1.273$$

Sachant que 1DZD=0.0081€

Le cout global de la centrale est de 36.86 Milliards de DZD

Le cout d'investissement	36,86	Milliards DZD
Cout de fonctionnement pour la 1ere année	125,926	Millions DZD
La moyenne du cout annuel	160,30	Millions DZD/an
Cout d'investissement par an	3,75	Milliard DZD/ an
Le capital emprunté	1,91	Milliards DZD/ an
La capitale empruntée cumulé	38,2	Milliards DZD
Le cout total	3,95	Milliards DZD/ an
Le cout total cumulé	79,07	Millions DZD
L'énergie produite	305,2	GWh/ an
L'énergie produite cumulé	6104	GWh
Le cout de l'énergie produite	12,81	DZD/ Kwh

Le cout de l'énergie produite par la centrale de 100 MW est estimé à 12,34 DZD/KWh

III.5.2 Estimation du cout d'une CCS de 5MW :**1. Le collecteur :**

Tableau V- 6 Données d'exploitation du collecteur pour une CCS de 5 MW

Puissance nominale	50MW
Diamètre du collecteur	1110 m
La surface du toit en verre	947 100 m ²
Double vitrage (2*4 mm)	328 800m ²
Simple vitrage (1* 4mm)	619300 m ²
la quantité d'acier (pour les supports, poutres)	5 600 t
Béton C25 pour les fondations	22000 m ³
Quantité d'acier d'armature	270 t
Le cout de construction	11.76 Millions d'euro

Le cout de construction du collecteur est 1,45 Milliards de DZD.

2. La cheminée :

Tableau V- 7 Données d'exploitation de la cheminée pour une CCS de 5 MW

Hauteur de la cheminée	445 m
Diamètre de la cheminée	54 m
Epaisseur de la paroi au sommet	0.16 m
Epaisseur de la paroi en bas	0.30 m
Quantité de béton C25 pour les fondations	9600 m ³
Quantité de béton C45 pour le soutiennent	3800 m ³
Quantité de béton C45 pour la tour	13 700 m ³
La quantité d'acier d'armature	3000 m ³
Les câbles de rigidification	30 t
Le cout de construction	9.2 Millions d'euros

Le cout de construction de la cheminée est de 1,1 Milliard de DZD

3. La turbine :

Tableau V- 8 Données d'exploitation de la turbine pour une CCS de 5 MW

turbines à axe vertical	1
Turbines à axes Horizontale	36
Nombre de tr/min	153 tr/min
Le couple	11.9 KNm
Coûts :	
• pales de rotor	0.41 Millions d'euro
• Générateur	3.37 Millions d'euro
• Les composants électroniques	1.28 Millions d'euro
Le cout des équipements et de l'installation	5.06 Millions d'euro

Le cout de la turbine est de 624.69 Milliards de DZD

Le cout Globale :

Collecteur	1.45	Milliards DZD
Cheminée	1.1	Milliards DZD
Les équipements mécaniques	624.69	Milliards DZD
Routes, bâtiments, ateliers	75	Millions DZD
Infrastructure	133	Millions d'euro
Planification, gestion du site	95,062	Millions d'euro
Cout Globale	3,63	Milliards DZD
Le cout de l'unité	726 000	DZD/KW

Tableau V- 9 Cout globale d'une CCS de 5 MW

III.5.2.1 Estimation du KWh produit :

Les paramètres économiques utilisés dans le calcul :

- La période d'amortissement est de $n=20$ ans
- Le taux d'intérêt nominal est de $i=8\%$
- Le taux d'inflation $e=3.5\%$

$$A_n = 0.101852$$

Le cout d'investissement	3,63 Milliards DZD
Cout de fonctionnement pour la 1ere année	46,9136 Millions DZD
La moyenne du cout de fonctionnement	61.73 Millions DZD/ an
Cout d'investissement annuel	372,84 Millions DZD/an
Le capital emprunté	166.7 Milliards DZD/ an
La capitale empruntée cumulé	3,333 Milliard DZD
Le cout total	435,8 Milliards DZD/an
Le cout total cumulé	8,7 Milliards DZD
L'énergie produite	13.9 GWh/an
L'énergie produite cumulé	278 GWh
Le cout de l'énergie produite	30,86 DZD/KWh

$$B_n = 1.273$$

D'après le calcul réalisé le cout de l'énergie produite par la CCS de 100 MW et de 12.34 DZD/ KW, et celle produite par la CCS de 5MW et de 30.86 DZD/ KWh soit 2.5 fois plus chère que le cout de l'énergie produite par la CCS de 100 MW.

A partir de cela on peut déduire que l'efficacité des CCS, ou leur production annuelle d'énergie par m² de surface de collecteur, augmente avec l'augmentation de la taille, et les coûts unitaires d'investissement diminuent en conséquence pour des raisons physiques, il est donc rentable de construire de grandes CCS.

III.6 Comparaison avec le tarif de l'électricité en Algérie :

Le réseau électrique algérien est composé d'un réseau interconnecté dans le nord et de petits réseaux indépendants dans le Sahara, beaucoup plus vaste et désert. Le taux d'électrification du pays est aujourd'hui de 99%.

L'Algérie est le pays du Maghreb où l'électricité est la moins chère grâce notamment à sa richesse en hydrocarbure. Les sociétés en charge de la distribution d'électricité établissent la facturation selon un principe de tarification progressive qui est résumé dans le tableau ci-dessous :

Tableau V- 10 Les tarifs de l'électricité en Algérie

Tarif du KWh pour une consommation ≤ 125 KWh	1,80 DZD/KWh
Tarif du KWh au-delà	4,20 DZD/KWh.

D'après les résultats obtenus à partir de l'analyse technico économique des centrales à cheminées solaires à grande échelle en l'occurrence les cheminées solaires de 100 MW et de 5 MW, on remarque que si on prend un tarif de 4 DZD/KWh le prix du kWh produit par une centrale turbine à gaz en Algérie, le prix du kWh produit par la CCS de 100 MW serait 3 fois plus chère et celui produit par la CCS de 5 MW serait presque 8 fois plus chère.

D'autant plus que la société enviroMission en collaboration avec le bureau d'ingénierie civile allemand SPB (Schlaich Bergemann und Partner) ont estimé que le cout du kWh d'une CCS de 200 MW, serait de 0,08€/ kWh soit 9,88 DZD/ kWh, ce dernier serait 2,5 fois plus chère que le prix du kWh produit par une centrale turbine à gaz en Algérie.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Pour fonctionner au mieux, 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 est donc parmi les endroits les plus remarquables au monde où l'ensoleillement global annuel est maximal et où les surfaces inoccupées ne manquent pas. La cheminée solaire est un système très simple qui ne nécessite pas une grande technologie pour sa construction, tous ces éléments constituant sont très simples et ne coûtent pas très cher. Les centrales à cheminées solaires sont des moyens modernes pour produire de l'énergie électrique sans causer de dégât sur 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 principale handicap pour les centrales à cheminée solaire.

L'objectif principal de notre étude est l'analyse technico économique d'une centrale à cheminée solaire.

Les résultats obtenus montrent qu'il est donc rentable de construire de grandes CCS. Cela ne tient pas compte du fait que des économies considérables sont possibles grâce à la rationalisation, avec de grands collecteurs en particulier. De plus que le prix du KWh produit est de 3 jusqu'à 8 fois plus chère que le KWh produit à partir d'une centrale à turbine à gaz en Algérie.

En se basant sur les résultats obtenus au cours de notre étude on peut dire que la taille d'un projet économiquement intéressant est énorme, ce qui présente des risques considérables pour les investisseurs. Car la tour d'1 km de hauteur serait la structure autoportante la plus haute jamais construite (la plus haute cheminée du monde mesure 419,7 m). Sans la construction d'une centrale de taille moyenne de quelques mégawatts, qui pourrait rassurer les investisseurs, le financement d'un grand projet comme celui de Borunga semble impossible.

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] Schlaich J., The Solar Chimney. Axel Menges Editions, Stuttgart, Germany, 1995.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] Gonzalez P., Les tours solaires, deux approches pour utiliser l'énergie du soleil, Énergies renouvelables. ENSTA, Paris, 2011
- [10] Zhou X., Xu Y., Review Solar updraft tower power generation. J., Solar Energy. Vol 128, pp. 95-125, 2014.
- [11] Schlaich J., Bergemann R., W Schiel ., G Weinrebe., Design of commercial solar towersystems utilization of solar induced convective flows for power generation. chez Proceedings of the International Solar Energy Conference, pp.537-581, 2003.
- [12] 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.
- [13] Schlaich J., Schiel W ., Solar chimney. Encyclopedia of Physical Science and Technology. pp.199-109, 2004.
- [14] Bernardes M., Voß A., Weinrebe G., Thermal and technical analyses of solar chimneys. Solar Energy, Vol. 75, pp. 1511-1524, 2003.

- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] Kreetz H., Theoretische untersuchungen und auslegung eines temporaren was serspeichers fur das auf wind kraft werk.. Diploma Energiever fahrens technik und Umw and lungs techniken regenerativer Energien EVUR, Technical University Berlin; 1997.
- [18] Hammadi S., Solar updraft tower power plant with thermal storage. *Basrah Journal for Engineering Research*, Vol. 98, pp.49–57, 2008.
- [19] Bernardes M., Zhou X., On the heat storage in solar updraft tower collectors water bags. *Sol Energy* 2013;91:22–31.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] Bernardes M ., Ökonomische und Ökologische Analyse von Auf wind kraft werken. IER, Universitat Stuttgart, Stuttgart, Germany, 2004.
- [23] Fluri T, Von Backström T., Performance analysis of the power conversion unit of a solar chimney power plant. *Sol Energy*, Vol, 82, pp.999–1008, 2008.
- [24] Al-Khayiem H H., Aja O C., Historic and recent progress in solar chimney power plant enhancing technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, pp. 1269–1292, 2015.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] 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.

- [28] Papageorgiou C., Optimum design for solar power stations with floating solar chimneys. chez Proceedings of the 32nd National Heat Transfer Conference pp.763-72, 2004.
- [29] 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.